

Dispositivo electrónico de medición del caudal de agua para canales abiertos

Electronic device of mensuration of the flow of water for open channels

Ing. Julio Cesar Ayala López, Dr.C. Roberto Albóniga Gil

Universidad Agraria de La Habana (UNAH). Centro de Mecanización Agropecuaria, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba.

RESUMEN. El método de riego por inundación, que desplaza el agua mediante canales abiertos y surcos ha sido usado durante años en la producción agrícola, aunque requiere una gran cantidad de agua y su eficacia no es muy alta ya que la mayoría del agua no se puede extraer directamente en las raíces de las plantas. Siendo de vital importancia lograr datos de campo confiables y lo suficientemente precisos que nos permitan estudiar y proyectar manejos del agua con el menor grado de incertidumbre posible. Para poder aplicar conocimientos actuales de la relación agua-suelo-planta debemos conocer la cantidad de agua en el campo o en regiones específicas del mismo, para así poder prever un uso eficiente del agua mediante la aplicación en el momento oportuno y en volúmenes adecuados, Por lo que en el Centro de Mecanización Agropecuaria (CEMA) diseñó un dispositivo electrónico de medición e indicación de caudales y consumo de agua para canales abiertos, aplicable para cualquier estructura hidráulica que relacione el nivel de agua de una sección de área conocida, con el caudal de agua que pasa por la misma sección, con el propósito de crear un dispositivo preciso y económico, capaz de realizar mediciones en el campo.

Palabras clave: método de riego, inundación, producción agrícola.

ABSTRACT. The method of irrigation by inundation, which transports the water by channels and furrows, has been used during years in the agriculture production, although require a big amount of water and his efficacy is not very high because almost all the water can't be extracted directly by the roots of the plants. So, is of vital important to obtain reliable and very precise data in the field that allowed to study and project water handling with the less grade of possible uncertainty. With the actual knowledge of the relation water-floor-plant and the possibility by this kind of measure devices to know the quantity of water in the field or in more specific region of it, we can anticipate an effective use of the water by the application of the exact volume in the right moment. For these reasons the Center of Agricultural Mechanization (CEMA) designed an electronic device for measure and indicate the flow and waste of water for open channels, applied for any hydraulic structure that relate the water level of a section of known area, with the water flow that pass by the same section, with the propose of create a device precise and economic, capable of made measures in the field.

Keywords: irrigation method, inundation, agriculture production.

INTRODUCCIÓN

El uso del riego en la agricultura es una práctica antigua, desarrollada con la finalidad de proveer una cantidad adecuada de agua para el correcto desarrollo de los cultivos y permitir así la producción de alimentos en la época seca, en la cual no existen lluvias frecuentes. Esto posibilitó la existencia constante de comida y gracias a esto los pueblos lograron asentarse y desarrollarse. El agua es tan importante para la agricultura debido a que crea una solución en el suelo en la cual se encuentran disueltos los nutrientes y mediante la absorción efectuada por sus raíces, las plantas logran acceder a estos (LaNasa y Upp, 2014).

La agricultura es el sistema de producción que mayor demanda de agua tiene a nivel global, tan solo el 3% es agua dulce y de esta, la agricultura consume cerca del 70% (Cosgrove y Rijsberman, 2014), lo cual sumado a la influencia del cambio climático, que, en ciertas áreas, modifica el régimen de lluvias, ya sea aumentándolo o disminuyéndolo, y a la gran presión que ejerce nuestra creciente población mundial, hace que sea imperativo buscar métodos para disminuir el consumo de agua de la agricultura, pero manteniendo o aumentando la producción por área de cultivo y además permitiendo obtener

productos que logren satisfacer la demanda en cuanto a calidad que el consumidor le ha impuesto al mercado.

Aunque la irrigación es una herramienta agronómica y tal vez económicamente viable, es importante mencionar que un abuso en su uso puede causar severos daños ambientales, tales como la erosión y la salinización del suelo, ocasionados por el arrastre que ejerce el agua sobre la superficie y a la utilización de agua de riego con altos contenidos de sales, respectivamente. El uso excesivo de este recurso para este fin puede afectar los ciclos químicos y biológicos del cuerpo de agua del cual está siendo extraído, pudiendo causar alteraciones que muchas veces son irreversibles, por ejemplo, la pérdida del Mar Aral, originado por una excesiva extracción de agua para irrigación agrícola.

Los diferentes usos del agua en Cuba no compiten entre sí; el sistema para la planificación anual respeta las prioridades establecidas para las que el abastecimiento de la población ocupa el primer lugar. La distribución y manejo integral de los volúmenes asignados incluyen el uso conjunto de las aguas superficiales y subterráneas. La Figura 1 muestra el volumen de agua planificado en el año 2009.

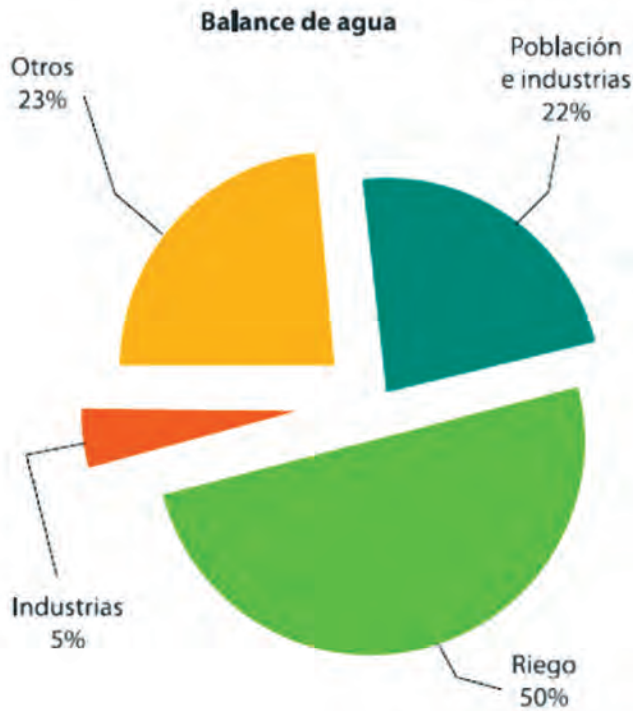


FIGURA 1. Recursos hidráulicos planificados para su uso.

Balace de áreas bajo riego

En Cuba de todo el riego el riego superficial ocupa el 72% del área total irrigada lo cual se puede apreciar en la Figura 2 (Ministerio de la Agricultura, 2006¹). Estos sistemas de irrigación presentan un crítico estado tecnológico debido a la falta de inversiones en mejoras. Las condiciones climáticas adversas en Cuba, debido a la sequía agrícola y desertificación, obligan

a la implementación de la mecanización y automatización de este método de regadío a escala parcelaria, mediante formas de entrega de agua a surcos y bandas más eficientes.

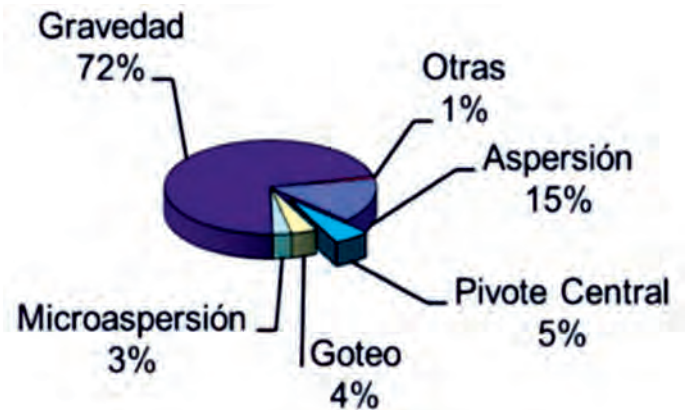


FIGURA 2. Distribución de las áreas bajo riego por técnicas de regadío.

Según Grassi, (1981²), este método es el más sencillo en la agricultura, y normalmente no requiere el uso de bombas. El tipo más común de inundación es el riego con surcos, donde el agua se dirige o bombea hacia una serie de surcos que se inundan. Esta tecnología requiere cierta inclinación del terreno, para que el agua pueda fluir fácilmente de un extremo a otro del surco, sin desbordarse por los lados. La misma cantidad de agua debe llegar a cada zona de los surcos. El riego por inundación requiere una gran cantidad de agua y su eficacia no es muy alta ya que la mayoría del agua no se puede extraer directamente en las raíces de las plantas. Por lo tanto, se suele utilizar en zonas en que se dispone de gran cantidad de agua. Además, la zona a inundar debe ser llana, si no es el caso, la zona se allana formando terrazas, algo que podemos ver en diversas zonas del mundo.

Aunque es el método más sencillo de utilizar es el método más difícil de controlar o establecer gastos, ya que como el agua es transportada por canales abiertos no se puede conocer con exactitud las pérdidas o el agua que se abastece a cada región del campo (Chaudhry, 2007).

La necesidad creciente de utilizar toda el agua disponible, aún en regiones húmedas, y el aumento en los costos para desarrollar nuevas fuentes de agua hacen necesario que ésta sea aprovechada con menores costos y sin desperdicio. Esto no puede lograrse si no se utilizan sistemas de medición adecuados (Cadavid, 2006). Esto hace que para manejar el recurso hídrico de un curso de agua (río, canal, etc.) con distintos propósitos (agua potable, energía, riego, atenuación de crecidas, etc.) de una manera eficiente, requiera del conocimiento de la cantidad de agua que pasa por un lugar en un tiempo determinado (el caudal).

De allí que es menester lograr datos de campo confiables y lo suficientemente precisos que nos permitan estudiar y proyectar manejos del agua con el menor grado de incertidumbre posible para satisfacer las demandas cada vez más crecientes de los cultivos (Mott, 1996).

¹ MINISTERIO DE LA AGRICULTURA: Balance Nacional de Áreas bajo riego (cierre 2005), Viceministerio de Mecanización e Instituto de Riego y Drenaje, 203pp., La Habana, Cuba, 2006.

² GRASSI, C.J.: Métodos de riego, Ed. Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras, 1981.

Las principales funciones de la medición del flujo de agua para canales abiertos serían (Chanson, 2004):

Determinar las pérdidas por conducción, localizar fugas, y hacer una buena distribución del agua en su recorrido

Controlar el volumen de agua que fluye hacia el campo, evitando que el sembradío reciba más agua de la que puede consumir, para así poder regular la entrada con las necesidades aguas abajo. Ya que con los conocimientos actuales de la relación agua-suelo-planta, podemos prever un uso eficiente del agua mediante la aplicación en el momento oportuno y en volúmenes adecuados, basados en la capacidad de infiltración del suelo. Estos conocimientos pueden ser usados efectivamente cuando se está capacitado para medir el agua con una exactitud razonable.

En la explotación de un sistema de riego es importante poder medir con exactitud el caudal en las derivaciones y en las tomas del canal de modo que el agua disponible pueda

suministrarse a las zonas que verdaderamente la necesitan y evitar su distribución incorrecta.

Aforadores de caudal para canales abiertos

La mayoría de las obras de medición o de regulación de caudales constan de un tramo convergente (Figura 3), en donde el agua, que llega en régimen suscritico, se acelera y conduce hacia una contracción o garganta, en la que alcanza una velocidad supercrítica, a partir de la cual esta velocidad se va reduciendo gradualmente, hasta llegar, de nuevo, a un régimen suscritico, en el que se recupera la energía potencial.

Aguas arriba de la obra existe un canal de aproximación, que es necesario para que se produzca un régimen laminar, de modo que la superficie del agua se mantenga estable y poder medir su altura con exactitud. Aguas abajo del medidor hay un canal de cola, que es de capital importancia para el diseño de la obra, debido a que la gama de niveles de agua en el mismo, que resultan de variar los caudales, será la que determine la altura del resalto en el estrangulamiento, con respecto a la cota de la solera de éste canal de cola.

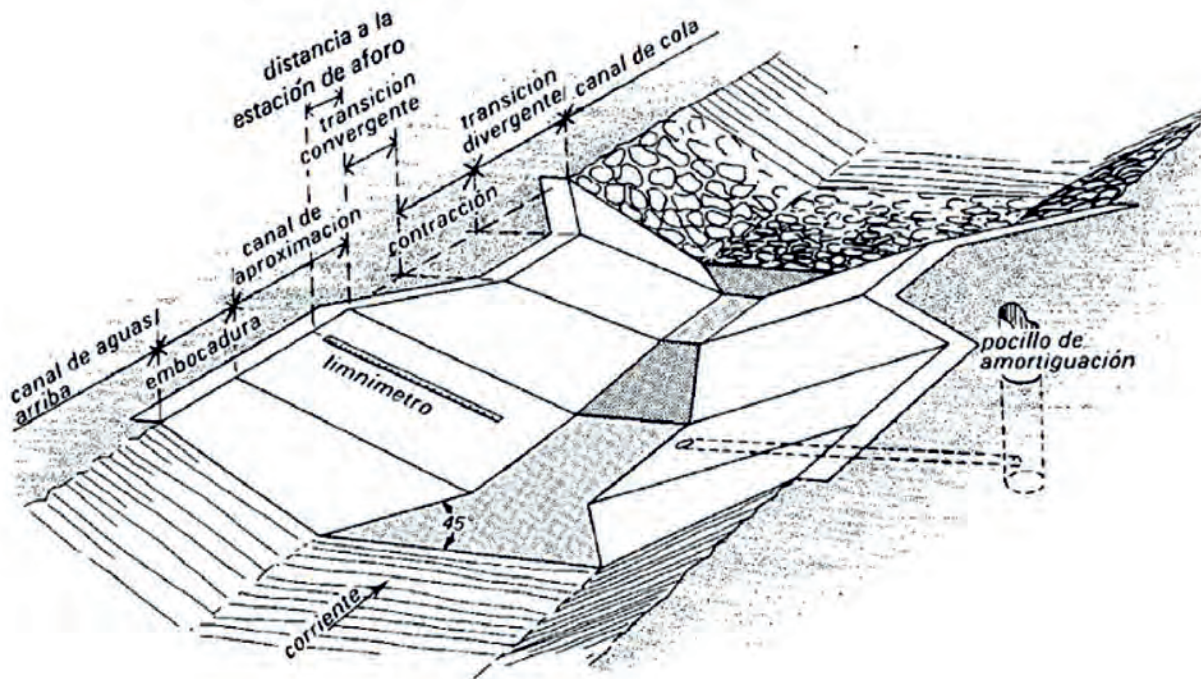


FIGURA 3. Disposición general de una obra para medición de caudales (Bos *et al.*, 1986).

Algunas obras de medición comúnmente aceptadas eliminan o prescinden de uno o más de estos elementos y, en consecuencia, la función de la parte suprimida no se realiza, quedando reducidas por ello sus posibilidades de aplicación. De todos los elementos, el más importante es el estrangulamiento o garganta, de cierta longitud, en donde el caudal entra sin derivación alguna y hace posible aplicar los conocimientos teóricos de hidráulica, de manera que sea posible predecir con exactitud el comportamiento hidráulico de las obras con diferentes formas que puedan utilizarse.

La parte del canal de aproximación en la que se mide la altura de la lámina de agua se llama ‘sección de medida de la altura de carga’ o ‘estación de aforo’.

El término ‘vertedero’ se utiliza cuando la sección de control se forma esencialmente elevando el fondo del canal, y se denomina ‘aforador’ cuando se realiza un estrechamiento lateral del canal siendo ambos muy similares desde un punto de vista hidráulico. También se denomina, normalmente, aforador cuando la sección de control se forma elevando el fondo y estrechando las paredes a un tiempo. No obstante, existe una porción de obras y dispositivos de medida que pueden denominarse, indistintamente, vertederos o aforadores.

Dentro de las obras semejantes a las descritas se clasifican como estructuras hidráulicas aquellos vertederos o aforadores en los que, a su paso por la garganta, y en la denominada sección de control, las líneas de corriente van paralelas (o casi paralelas), al menos en una corta distancia. Se aconseja el uso de este tipo de medidores para aforar o para regular las corrientes de agua en canales abiertos, siempre que la superficie del agua en la sección de control pueda permanecer libre.

En esta metodología de medición de caudal, se debe contar con un dispositivo primario estándar y un dispositivo secundario que permita registrar valores de nivel. Entre los dispositivos primarios, se encuentran los: vertederos y canaletas.

Instrumentos de medición

En su mayoría los instrumentos de mediciones de caudales (Spitzer, 1991) de forma continua, utilizan un sensor de nivel electrónico incorporado en una estructura hidráulica (Dawson, 1994³) encargada de hacer corresponder la variación del nivel de agua en un punto directamente con el caudal que pasa por una estructura de dimensiones conocidas.

Para el diseño de este dispositivo se analizaron distintas alternativas a la hora de seleccionar los componentes más adecuados para lograr una solución lo más eficiente, precisa, duradera y económica posible.

La Figura 4 muestra el esquema de la solución emanada del análisis de la estructura de funciones y de la mejor combi-

nación de solución como se muestra en la Figura 5, en la cual puede apreciarse una gran simplicidad en la concepción del diseño, cumpliendo con los requerimientos necesarios, lo cual se sustenta en los siguientes elementos distintivos.

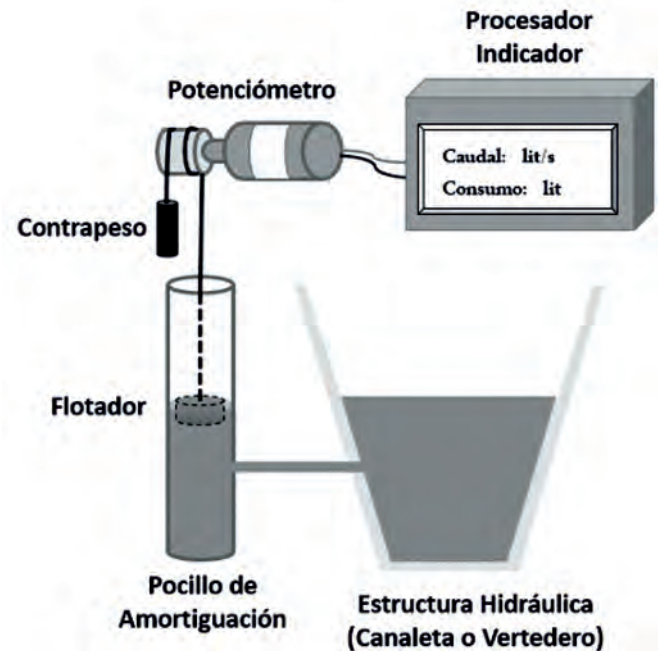


FIGURA 4. Esquema conceptual del sistema para el registro del caudal y el consumo de agua en una estructura hidráulica.

Componentes	Posibles alternativas			
	1	2	3	4
1 Captación de la señal de posición	Encoders	Ondas de frecuencia	Inductivos	Resistivos
2 Posicionamiento del sensor	Pozo de amortiguación	interior de la estructura hidráulica		
3 Registrador de señal	Arduino	Microcontrolador	Voltímetro	PC
4 Muestreo de la señal	PC	pantalla LCD	7 Segmentos	
5 Energía para captación y registro	Batería 9V	AC		

FIGURA 5. Selección de los componentes

Componentes seleccionados:

- Potenciómetro como elemento sensor de desplazamiento para convertir el desplazamiento en una señal eléctrica correspondiente.
- El Arduino UNO R3 como codificador y controlador de la señal eléctrica del sensor, realizando todo el procesamiento de la señal para poder representarla en la pantalla.
- Pantalla LCD 16x2 como alternativa de bajo costo para la representación visual de la información.
- Alimentación independiente con una batería de 9V.

Generando así una solución de bajo costo, para crear la medición electrónica con gran precisión del caudal y consumo del agua en distintas estructuras hidráulicas (vertederos y canaletas) como se observa en la Figura 6.

³ DAWSON, B.: "Open Channel Flowmeters", Isco, Inc, 2038: 7-98, USA, 1994.

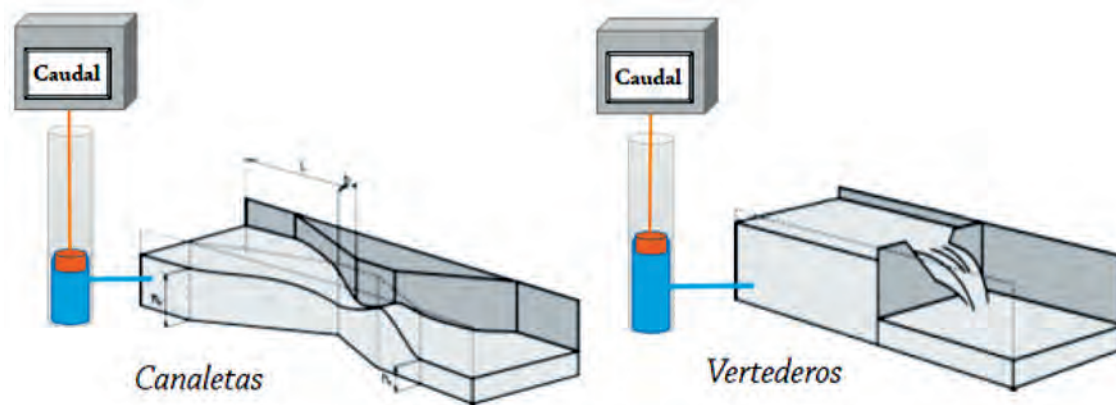


FIGURA 6. Posibles estructuras donde colocar el instrumento

Captación de la señal de nivel

Un sensor o captador es un dispositivo diseñado para recibir información de una magnitud del exterior transformarla en otra magnitud, normalmente eléctrica, que seamos capaces de cuantificar y manipular (Méndez, 2001).

Normalmente estos dispositivos se encuentran realizados mediante la utilización de componentes pasivos (resistencia variable, PTC, NTC, LDR etc. todos aquellos componentes que varían su magnitud en función de alguna variable), y la utilización de componentes activos (Lynnworth, 2013).

Los principales sensores que se pueden utilizar para la medición de la posición son:

a) Encoders

La resolución de estos sensores es fija y viene dada por el número de anillos que posea el disco, o lo que es lo mismo, el número de bits del código utilizado. Normalmente se usan de 8 a 19 bits. Son dispositivos especialmente sensibles a golpes y vibraciones.

- **Encoders incrementales:** Se utilizan fundamentalmente para el cálculo de posición angular. Básicamente consta de un disco transparente, el cual tiene una serie de marcas opacas colocadas radialmente y equidistantes entre sí; de un elemento emisor de luz (como un diodo LED), y de elemento fotosensible que actúa como receptor. El eje cuya posición angular se va a medir va acoplado al disco.
- **Encoders absolutos:** Es similar al anterior, sin embargo, en este caso lo que se va a medir no es el incremento de esa posición, sino la posición exacta. La disposición es parecida a los encoders incrementales. También se dispone de una fuente de luz de un disco graduado y de un elemento fotoreceptor. La diferencia radica en la graduación o codificación del disco. En este caso el disco se divide en un número fijo de sectores y se codifica cada uno con un código crítico. No es necesaria ninguna mejora para detectar el sentido del giro, ya que la codificación de los distintos sectores angulares es absoluta.

b) Ondas de frecuencia:

Este tipo de sensores representan una opción para realizar mediciones de posición a distancia y sin contacto mediante ondas de frecuencia y amplitud constante. Su principio de

operación básicamente es la transmisión de una señal piloto ultrasónica o laser y la recepción de una señal reflejada, para determinar si existe un objeto en el área de detección. La transmisión y recepción de energía es la base de muchos medidores de ondas de frecuencia y de velocidad. Cuando las ondas inciden en un objeto, parte de su energía es reflejada, según cuanto tarde estas en volver, se sabe dónde se encuentra el objeto.

c) Inductivos:

Son instrumentos electromecánicos en los que las características magnéticas de su circuito eléctrico cambian en respuesta al movimiento de un objeto. Con este movimiento se genera una respuesta electromotriz o se genera una tensión. Entre los sensores inductivos los que se destaca el transformador diferencial de variación lineal (LVDT) debido a su casi infinita resolución, poco rozamiento y alta repetitividad.

Su funcionamiento consiste en la utilización de un núcleo de material ferromagnético unido al eje cuyo movimiento de quiere medir. Este núcleo se mueve linealmente entre un devanado primario y dos secundarios, haciendo con su movimiento que varíe la inductancia entre ellos. Al variar la posición del núcleo, hace crecer la tensión de un devanado y disminuir la del otro. Del estudio de la tensión se deduce que esta es proporcional a la diferencia de inductancias mutuas entre el devanado primario con cada uno de los secundarios, y que por tanto depende linealmente del desplazamiento del vástago solidario al núcleo.

Además de las ventajas señaladas, el LVDT presenta una alta linealidad, gran sensibilidad y una respuesta dinámica elevada. Su uso está ampliamente extendido, a pesar del inconveniente de poder ser aplicado únicamente a la medición de pequeños desplazamientos.

d) Resistivos

Como es el caso de los potenciómetros se trata de una resistencia y un cursor que se desplaza sobre ella. Se alimenta la resistencia con un voltaje regulado y del cursor a tierra obtenemos un voltaje proporcional al desplazamiento producido. Hay de diferentes formas, lineales, circulares, logarítmicos, etc. material película de carbón bobinados sobre cerámica, etc.

- Potenciómetro de desplazamiento lineal

También llamado reglas potenciométricas, consisten en una pista recta y entera de resistencia constante, tomada por

pistas de polímeros conductores. Por encima de ellas se mueve en cursor que da la medida en voltaje respecto a tierra

- Potenciómetro de desplazamiento angular

Trabajan de la misma manera que los de desplazamiento rectilíneo, pero en este caso la pista es de toma circular permitiendo así la medición de variación de ángulos. Nos podemos encontrar con potenciómetros de dos tipos, los de una vuelta, en los que la pista es un círculo en el mismo plano, y los de más de una vuelta donde el círculo se convierte en un espiral que crece según el eje perpendicular de este círculo. En ambos casos el cursor se desplaza por encima de la pista creando una relación de linealidad entre la resistencia total y la parte desplazada del cursor.

Algunos de estos sensores pueden ser descartados debido a condiciones de trabajo, como es el caso del encoder, que son bastantes sensibles a los golpes y vibraciones, además de que la recepción de los datos sería mucho más compleja ya que el registrador no cuenta con una entrada de encoder por lo que se requiere algo sencillo y de bajo costo.

Otros sensores se descartaron debido a que son muy caros o difíciles de utilizar, como puede ser el láser y el ultrasónico, y para la aplicación demandada se requiere algo sencillo y de bajo costo mientras cumpla con la adecuada precisión.

Es por esto que al final se optó por utilizar un sensor de tipo resistivo, específicamente un potenciómetro de desplazamiento angular, pues tiene un bajo costo, son fáciles de manejar y tienen las características suficientes para la aplicación, además de que son muy utilizados para medir desplazamiento (Lledó, 2012⁴).

Es necesario el cálculo de la resolución del registrador de datos así como el ángulo que debe girar. Se compara la resolución del potenciómetro con la del registrador en este caso la tarjeta Arduino R3 tiene 10 bits que en total hacen (2^{10}) 1024 valores, y la tensión es de 9 voltios, por lo que al dividir 9 entre 1024 valores nos da la resolución del registrador que sería 8,79 mV. Para luego comprar esta resolución con la de los potenciómetros y si esta es mayor que la de la tarjeta, entonces se podrá ajustar más el giro que provoca el flotador, pero si es menor, de poco sirve que se ajuste y que gire más o menos grados. Así que se tiene que seleccionar un potenciómetro cuya resolución este lo más cercano a 8,79 mV pero siempre por encima de este valor.

Se decide utilizar un flotador como la parte móvil que está en contacto directo con el agua para girar el potenciómetro mientras varía el nivel de agua; debido a que los registradores accionados por flotador son los instrumentos más utilizados para la medición de nivel, por su gran exactitud (presentando a la hora de medir un error aproximado de $\pm 0,005$ m) (Bos *et al.*, 1986). los cuales constan de un flotador de diámetro lo suficientemente grande, unido a un extremo de una banda o cable que pasa por una polea, solidaria al mecanismo registrador, y de cuyo otro extremo cuelga un contrapeso. El flotador sube o baja con el nivel del agua y su movimiento hace girar la polea (girando a su vez

el potenciómetro), quedando el nivel registrado.

Posicionamiento del sensor

Para el adecuado funcionamiento, el flotador debe colocarse en agua tranquila, por lo que, en todas las instalaciones de campo, es preciso disponer de un pozo remansador. Para evitar la incertidumbre que provoca el contacto del flotador con corrientes de agua.

El pocillo remansador se utiliza con dos fines (Henderson, 1996):

1. para facilitar el registro exacto de un nivel de agua o piezométrico, en un punto de aforo en el que la superficie del agua del canal está agitada por remolinos u oleaje, y/o
2. para albergar el flotador de un limnógrafo automático. En caso de registrar la altura del agua con un instrumento automático, deberá también instalarse una escala limnimétrica, para poder comparar el nivel del agua en el canal con la altura en el interior del pocillo, y poder así detectar las obturaciones del tubo que conecta el canal con este pocillo de amortiguación.

La dimensión de la sección transversal del pozo (Henderson, 1996) depende, principalmente, del método utilizado para medir la altura del agua. Podemos distinguir tres métodos fundamentales: varilla calibrada, escala limnimétrica y limnógrafo accionado por un flotador.

Registrador de señal

Se ha escogido una arquitectura de comunicación centralizada en el que el órgano central, es decir el servidor, es una placa Arduino en vez de un PC, porque pensamos que la placa tiene las características necesarias para que cumpla con garantía el funcionamiento del sistema. En la Figura 7 se muestran las conexiones de entrada y de salida del mismo.

El mismo consiste en una plataforma de hardware libre, basada en una placa con un microcontrolador y un entorno de desarrollo, diseñada para facilitar el uso de la electrónica en proyectos multidisciplinarios. Realizar ajustes al código es muy sencillo, sólo se necesita un cable USB y el IDE se encarga de compilar el programa y cargarlo en la memoria del Arduino.

Posee las siguientes ventajas por encima de las otras alternativas de controladores capaces del cálculo, del registro y de mostrar el resultado en la pantalla.

Asequible: las placas Arduino son más asequibles comparadas con otras plataformas de microcontroladores.

Multi-Plataforma: el software de Arduino funciona en los sistemas operativos Windows, Macintosh OSX y Linux.

Entorno de programación simple y directo: el entorno de programación de Arduino es fácil de usar para principiantes y lo suficientemente flexible para los usuarios avanzados.

Software ampliable y de código abierto: el software Arduino está publicado bajo una licencia libre.

⁴ LLEDÓ, S. E.: Diseño de un sistema de control doméstico basado en la plataforma Arduino, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Informática, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España, 2012.

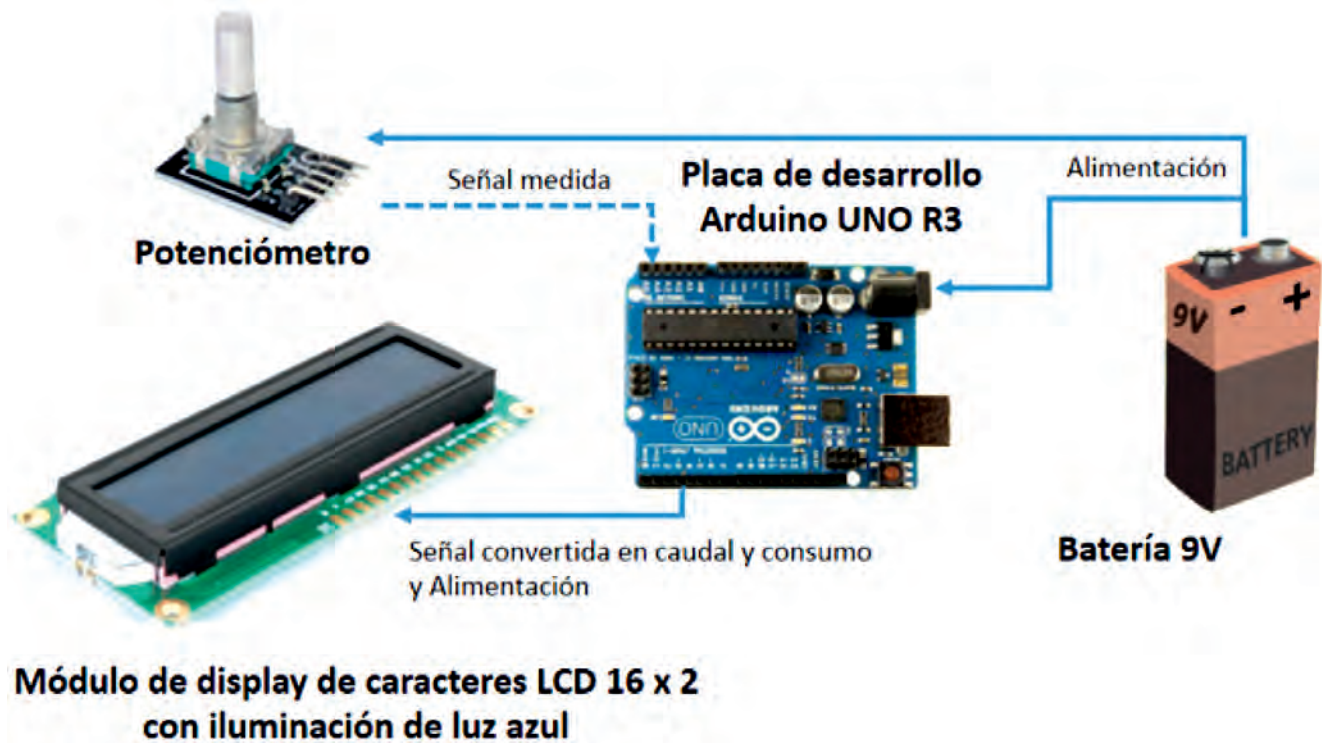


FIGURA 7. Esquema interno del procesador indicador.

Muestra de la señal

De todas las posibles formas de mostrar la medición realizada se seleccionó la pantalla LCD por ser barata y muy fácil de comunicar con la tarjeta Arduino, no más barata y robusta que los 7 segmentos, pero estos suponían una mayor circuitería y espacio en memoria para la programar la comunicación con la tarjeta además de poseer sus desventajas a la hora de imprimir caracteres. El uso de la PC no está del todo descartado ya que se puede conectar a la tarjeta Arduino cuando se desee digitalizar y almacenar estos datos de forma directa para realizar experimentos o almacenar comportamientos del flujo para su posterior análisis, pero no se tiene en cuenta como elemento fijo del dispositivo por las condiciones de trabajo donde usualmente se utilizan estos dispositivos y el costo de las mismas.

Energía para captación y registro

La alimentación seleccionada es una batería de 9 V por las condiciones de trabajo, ya que en el campo no se encuentra con mucha facilidad el abastecimiento de fluido eléctrico. El voltaje que se selecciona es de 9 V debido a que es el voltaje con el que trabaja la placa de desarrollo Arduino UNO R3, y con ese mismo voltaje se puede alimentar el sensor.

Programación del registrador de señal

El modelo matemático que se programó en Arduino fue desarrollado por Replogle (Bos *et al.*, 1986) para obtener las relaciones carga caudal de vertederos o aforadores, ya ha sido programado para ordenadores digitales en otras ocasiones en otros lenguajes de programación.

Este modelo matemático intenta corregir los efectos escalonados asociados con la viscosidad. No se pretende acabar con los errores debidos a la curvatura de las líneas de corriente o a medidas incorrectas.

Para la gama de condiciones establecidas, se exige al modelo de ordenador que dé el valor del caudal real con una precisión superior al 2%. El modelo no responde de los errores en el campo, ya sean de dimensiones del aforador (incluyendo la medida de la carga), o de la medición del caudal determinada por otros procedimientos.

La capacidad de los modelos matemáticos para predecir exactamente los procesos físicos está limitada por la precisión de las ecuaciones, y de los coeficientes relacionados con ellas, utilizadas para describir dichos procesos. Siempre que sea posible, y razonablemente práctico, los modelos se basan en principios físicos fundamentales, junto con coeficientes que responden de forma bien definida a los factores ambientales.

En primer lugar, se calcula el caudal para un fluido ideal, tomándose éste valor como una estimación del gasto real. A continuación, se calculan los coeficientes de pérdidas por rozamiento y de distribución de velocidad para el caudal estimado, y con todo ello se obtiene el caudal real de la corriente y la profundidad crítica. El proceso de aproximaciones sucesivas se repite (como en el caso del caudal del fluido ideal) hasta que se acota el valor. El caudal obtenido se contrasta con los correspondientes a los anteriores valores, comparándose, desde el primero hasta el último, con el valor de Q_i (caudal ideal), para flujo ideal. Si no llegara a acotarse el valor del caudal se calculan los valores con el nuevo Q (caudal) y se repite el proceso hasta que se logre. En la Figura 8 se ilustra gráficamente este procedimiento

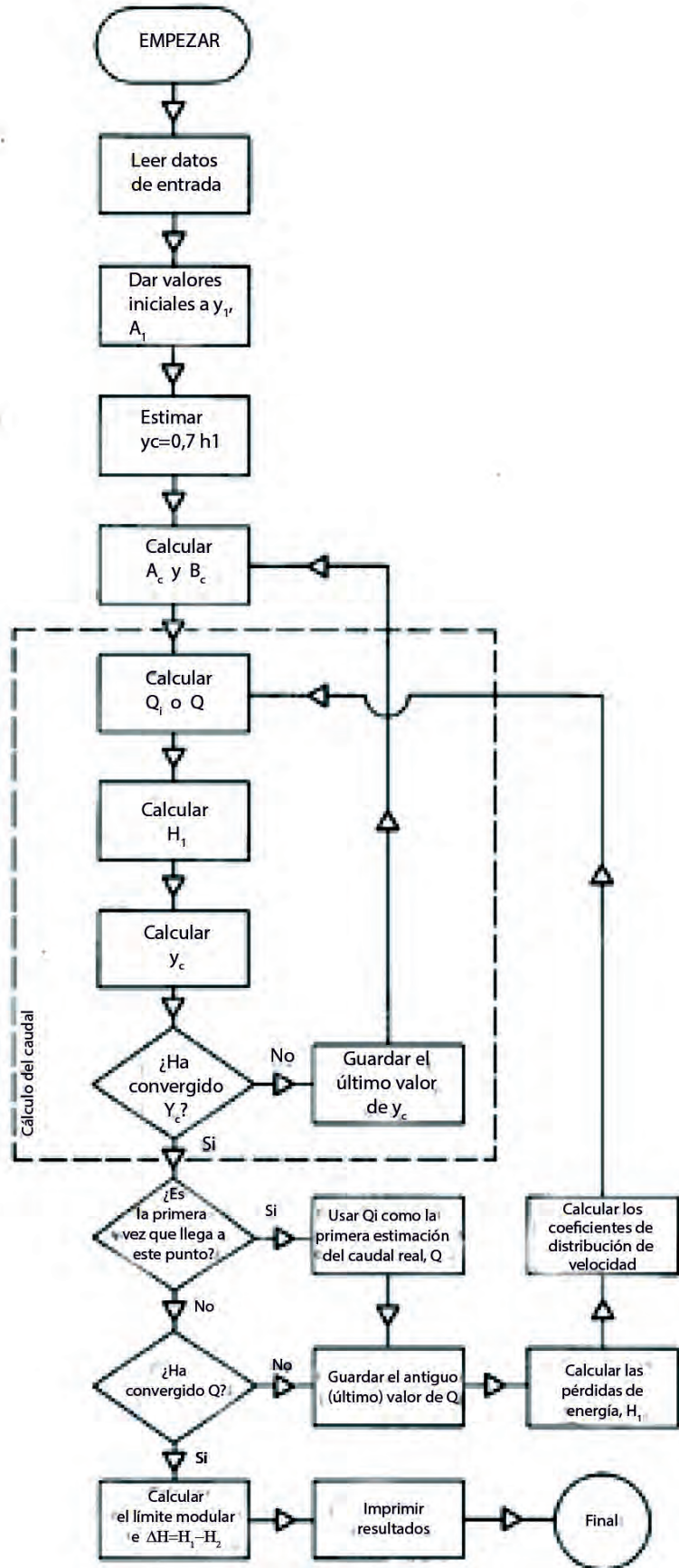


FIGURA 8. Diagrama de flujo para el cálculo del caudal y del límite modular (Bos *et al.*, 1986).

Costo de los componentes

Como bien se puede observar en la Figura 9 la construcción de este dispositivo incluyendo la estructura hidráulica seleccionada no debe sobrepasar los US\$ 100.00, que sería un valor aproximado del costo de construcción del dispositivo eléctrico con el flotador, potenciómetro, cables, botones y corazas que se necesiten. Que comparado con el precio de los caudalímetros comerciales para

canales abiertos a nivel mundial que tienen un valor que oscila entre los US\$ 400.00 y US\$ 900.00, lo cual podría significar un ahorro de hasta US\$ 300.00 por unidad, pudiendo diferir solamente en el tipo de sensor ya que casi todos los equipos de medición para canales abiertos utilizan sensores ultrasónicos y alguna salida de la señal que pueda poseer para enviarla mayores distancias (ejemplos: wifi, modem, 4-20 mA, entre otras).

Componentes	Precio
Placa de desarrollo Arduino UNO R3 con Microcontrolador MEGA328P ATMEGA16U2	US\$ 10,67
Módulo de display de caracteres LCD 16 x 2 con iluminación de luz azul	US\$ 3,28
Batería de 9 V	US\$ 4,00
TOTAL	US\$ 17,95

FIGURA 9. Precio de los principales componentes eléctricos utilizados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BOS, M.G.; REPLOGLE, J.A.; CLEMMENS, A.J.: *Aforadores de caudal para canales abiertos*, Ed. International Institute for Land Reclamation and Improvement, ISBN-9070260921 9789070260927, Wageningen, Güeldres, Países Bajos, 1986.
- CADAVID, J.H.: *Hidráulica de canales: fundamentos*, Ed. Universidad Eafit, ISBN-9588281288, España, 2006.
- CHANSON, H.: *Hydraulics of open channel flow*, Ed. Butterworth-Heinemann, ISBN-008047297, USA, 2004.
- CHAUDHRY, M.H.: *Open-channel flow*, Ed. Springer Science & Business Media, ISBN-0387686487, USA, 2007.
- COSGROVE, W.J.; RIJSBERMAN, F.R.: *World water vision: making water everybody's business*, Ed. Routledge, ISBN-1134201621, USA, 2014.
- HENDERSON, F.M.: *Open channel flow*, Ed. Macmillan, ISBN-0023535105, USA, 1996.
- LANASA, P.J.; UPP, E.L.: *Fluid Flow Measurement: A Practical Guide to Accurate Flow Measurement*, Ed. Butterworth-Heinemann, ISBN-0124095321, USA, 2014.
- LYNNWORTH, L.C.: *Ultrasonic measurements for process control: theory, techniques, applications*, Ed. Academic press, ISBN-0323138039, USA, 2013.
- MÉNDEZ, M.V.: *Elementos de hidráulica de canales*, Ed. Universidad Católica San Andrés, ISBN-9802442526, Bolivia, 2001.
- MOTT, R.L.: *Mecánica de fluidos aplicada*, Ed. Pearson Educación, ISBN-9688805424, USA, 1996.
- SPITZER, D.W.: *Flow measurement: practical guides for measurement and control*, Ed. Isa, ISBN-1556173342, USA, 1991.

Recibido: 18 de marzo de 2015.

Aprobado: 13 de noviembre de 2015.

Publicado: 30 de diciembre de 2015.

Julio Cesar Ayala López, Adiestrado, Universidad Agraria de La Habana (UNAH). Centro de Mecanización Agropecuaria, Apto. Postal: 18-19, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba, CP: 32 700. Correo electrónico: juliocesar@unah.edu.cu

Roberto Alboniga Gil, Correo electrónico: ralboniga@unah.edu.cu