

## Sistema de monitoreo de caudal y tirante para el Laboratorio Piloto de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas

### Flow and hydraulic depth monitoring system for the Hydraulic Laboratory of the Faculty of Mathematical and Physical Sciences

Corapi, Pietro; Acaro Chacón, Ximena Carolina; Gaibor Nieto, Joseph Alejandro; Villavicencio Bajaña, Willian Francisco



**Pietro Corapi**  
Universidad de Guayaquil, Ecuador  
**Ximena Carolina Acaro Chacón**  
Universidad de Guayaquil, Ecuador  
**Joseph Alejandro Gaibor Nieto**  
Universidad de Guayaquil, Ecuador  
**Willian Francisco Villavicencio Bajaña**  
Universidad de Guayaquil, Ecuador

**Investigación, Tecnología e Innovación**  
Universidad de Guayaquil, Ecuador  
ISSN: 1390-5147  
ISSN-e: 2661-6548  
Periodicidad: Anual  
vol. 13, núm. 14, 2021  
revistaiti@ug.edu.ec

Recepción: 13 Julio 2021  
Aprobación: 29 Octubre 2021

URL: <http://portal.amelica.org/ameli/jatsRepo/593/5932716001/index.html>

Los autores que publican en Investigación, Tecnología e Innovación conocen y aceptan las siguientes condiciones: Los autores retienen los derechos de copia (copyright) sobre los trabajos, y ceden a Investigación, Tecnología e Innovación el derecho de la primera publicación del trabajo, bajo licencia internacional Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 que permite a terceros compartir la obra siempre que se indique su autor y su primera publicación esta revista. Los autores conservan los derechos de autor y garantizan a Investigación, Tecnología e Innovación el derecho de publicar el trabajo a través de los canales que considere adecuados. Los autores son libres de compartir, copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la versión del trabajo publicado en Investigación, Tecnología e Innovación, haciendo reconocimiento a su publicación en esta revista. Se autoriza a los autores a difundir electrónicamente sus trabajos una vez que sean aceptados para publicación. Las obras están bajo licencia: Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0) Usted es libre de: Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato. Bajo los siguientes términos: Atribución — Usted debe dar crédito de

**Resumen:** Contexto: El presente trabajo tiene como objetivo la elaboración de un sistema de medición y monitoreo de caudal y tirante para el Laboratorio Piloto de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Matemáticas y Física de la Universidad de Guayaquil, que permita mostrar caudal y tirante en tiempo real además de almacenarlos en un servidor IoT (internet de las cosas). Método: El uso de hardware y software libre proporcionan una solución práctica y accesible. El prototipo consta de un sensor de presión diferencial MPX 5500, sensores ultrasónicos HC-SR04 para las mediciones de caudal-tirante según las variaciones y características del flujo. Resultados: La plataforma IoT permite a docentes y alumnos analizar los datos receptados por cada uno de los sensores en tiempo real durante las prácticas de hidráulica. Conclusiones: El diseño del prototipo se realizó con componentes y software open-source. La calibración de los sensores se efectuó con datos empíricos y prácticas realizadas en el laboratorio proporcionados por docentes de la Carrera de Ingeniería Civil.

**Palabras clave:** Arduino, Sensores, Tirante, Caudal, IoT.

**Abstract:** Context: The objective of this work is to develop a system for measuring and monitoring flow and hydraulic depth for the Hydraulics Pilot Laboratory of the Faculty of Mathematics and Physics of the University of Guayaquil, to show flow and hydraulic depth in real time and store them in an IoT (Internet of Things) server. Method: The use of free hardware and software provides a practical and accessible solution. Using the Arduino microcontroller, an MPX 5500 differential pressure sensor and HC-SR04 ultrasonic sensors for measurements according to variations in flow characteristics. Results: The IoT platform allows teachers and students to analyze the data received by each sensor in real time during hydraulics practices. Conclusions: The prototype was designed with open-source components and software. The calibration of the sensors was carried out with empirical data and practices performed in the laboratory provided by teachers of the Civil Engineering Career.

manera adecuada, brindar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante. NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con propósitos comerciales. SinDerivadas — Si remezcla, transforma o crea a partir del material, no podrá distribuir el material modificado.



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional.

**Keywords:** Arduino, Sensors, hydraulic depth, Flow rate, IoT.

## INTRODUCCIÓN

En el mercado nacional e internacional se cuenta con instrumentos y dispositivos para la hidráulica que se utilizan para medir caudales en corrientes naturales y artificiales (Chaudhry, 2008). Dentro de los dispositivos más utilizados por su facilidad de construcción e instalación se pueden mencionar los vertederos y el canal Parshall que es una estructura hidráulica utilizada comúnmente para la medición del caudal en canales abiertos, los cuales se diseñan y construyen para ser utilizados dentro de los ensayos de laboratorio de los cursos de Hidráulica, a efecto de complementar la enseñanza experimental y práctica del estudiante acerca del correcto uso de cada uno de estos medidores de caudal. Los límites de aplicación y la determinación de cada una de las ecuaciones de calibración, con lo cual se logra una mejor comprensión de dichos dispositivos, al comparar los resultados obtenidos de forma experimental con los teóricos, adquiriendo un mejor criterio al decidir qué método o fórmula utilizar, dependen del grado de precisión que se desee obtener (Agustin, 2010).

El Centro de Mecanización Agropecuaria (CEMA), diseñó un dispositivo electrónico de medición 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 (Ayala & Albóniga, 2015).

En los últimos años, la aplicación de la tecnología acústica Doppler a la medición en el campo de la hidráulica ha permitido una mejor definición de los sistemas fluviales observados, con la obtención de grandes volúmenes de registros y de mayor precisión. La incorporación de un instrumento portátil de tecnología Doppler, el FlowTracker® ADV (Acoustic Doppler Velocity) de SonTek en el Departamento de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la Universidad Nacional del Litoral en Argentina, motivó la realización de una serie de ensayos de laboratorio y campo a fin de conocer sus prestaciones. El equipo admite registrar velocidades de corriente y los ensayos se llevaron a cabo en los canales del Laboratorio de Hidráulica para caudales entre 20 y 53 l/s, tirantes entre 0,18 m y 0,90 m y velocidades medias entre 0,03 y 0,76 m/s (Palman, 2015).

En el Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica de la Universidad de San Carlos de Guatemala se propuso el desarrollo de modelos matemáticos que evalúen el caudal en vertederos tipo sutro para la estimación de velocidad media de agua en cada vertedero, donde se utilizan los tirantes para que la variación de las velocidades sea mínima. Encontrando un modelo matemático que relaciona la velocidad media (SandovalMendozaI, 2017).

En la Carrera de Ingeniería Civil de la Universidad de Guayaquil, se imparten cursos de hidráulica que requieren la realización de prácticas relacionadas a la mecánica de fluidos. Con el objetivo de proporcionar herramientas que permitan comprobar las ecuaciones de continuidad y el teorema de Bernoulli se propuso el desarrollo de un prototipo de medición de caudal y tirante para el canal del Laboratorio Piloto de Hidráulica; y a su vez facilitar tanto a docentes y/o estudiantes la medición y almacenamiento de datos dentro de una herramienta IoT. El laboratorio posee infraestructura para el aprendizaje práctico, pero carece de herramientas o tecnología que le permita realizar mediciones de manera automática.

## MÉTODO Y MATERIALES

Con el uso del método investigativo-experimental se fijó las variables dependientes e independientes. Las independientes como volumen, tiempo, las dependientes: caudal y tirante; que son parámetros observables y medibles experimentalmente. El caudal se define como el volumen de agua que atraviesa una superficie en un tiempo determinado (l/s). Para la determinar el caudal existen varios métodos: ecuación de la continuidad, ecuación de Chezy, ecuación de Bazin, ecuación de Manning, ecuación de Kutter y ecuación de Venturi que será objeto de estudio para la realización del prototipo (Manzano Juan, 2015).

### Tubo de Venturi

El tubo de Venturi como se observa en la Figura 1. es un dispositivo utilizado para poder medir la velocidad de un fluido mediante el efecto Venturi. Este consiste en una tubería con dos secciones, donde la primera sección es mayor a la segunda, dando esto como resultado un estrechamiento entre las secciones donde el antes y el después del estrechamiento son  $A_1$  y  $A_2$ , de tal manera que  $A_1 > A_2$ , de esta manera se logra acelerar la velocidad del fluido en el tubo, que está conectado a un manómetro de tubo en U diferencial, útil a la medición de la variación de presión entre la sección 1 y la sección 2. (Manzano-Juaréz, 2008) (Ortega, 2013).

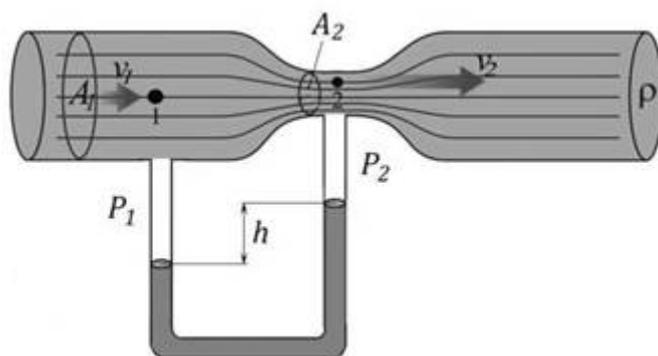


FIGURA 1.  
Tubo de Venturi.  
(Ortega, 2013)

El efecto de Venturi radica en un fluido en movimiento dentro de un canal cerrado, luego de pasar por una sección de menor área hacia una sección de mayor área, disminuye su presión y aumenta su velocidad. El efecto es debido a que existe un estrechamiento entre dos secciones de tuberías intercaladas y elaborada con la intención de provocar una disminución desde la sección de entrada y un aumento en la sección de salida, para poder así evitar turbulencias.

### Curva de Descarga

La curva de descarga es una serie de datos que se realizan por un tiempo determinado, permitiendo de esta manera crear una relación entre el caudal y el nivel del agua (tirante) de un tramo de un canal o un cauce, la toma de datos para hallar esta curva de descarga es en periodos largos para poder simular de manera más acertada y mostrar el caudal máximo y mínimo.

Por medio de las mediciones tomadas de manera directa y regular, se puede determinar una ecuación que se va a relacionar con el nivel de lectura limnimétrico. A estas mediciones se los conoce también como curvas

de calibración de la sección, donde cada sección transversal tendrá su propia curva de descarga (Chaudhry, 2008).

La ecuación (1) que se implementa en la curva de descarga matemáticamente es:

$$Q = K * H^b \quad (1)$$

Donde Q es el caudal, K y b son los parámetros de ajustes y H el nivel del agua.

## Medición de niveles de agua

La determinación de los niveles que puede alcanzar el agua o las alturas de agua de un río, se deben hacer en una sección determinada. Las mediciones de las alturas de agua de un río se hacen en estaciones hidrométricas, y todas las mediciones de alturas de agua, medidas en metros y centímetros, deben referirse a un cero. La altura de agua se mide con escalas hidrométricas o limnómetro. Son reglas graduadas en metros, decímetros y centímetros, que deben colocarse en un lugar visible para el observador, en un solo tramo si el río lo permite, o en tramos escalonados hacia fuera del centro del cauce, de modo de medir con precisión los valores mínimos y máximos (Rodríguez, 2016).

## Materiales

Arduino: es una plataforma electrónica de código abierto basada en hardware y software libre. Las placas Arduino pueden leer entradas (luz en un sensor, un dedo en un botón o un mensaje de Twitter) y convertirlo en una salida: activar un motor, encender un LED, publicar algo en línea. Una placa Arduino puede ser programada y configurada para realizar diversas instrucciones. Utiliza el software Arduino (IDE), basado en el procesamiento (Arduino, 2021). La placa Arduino Mega 2560 es la tarjeta seleccionada para el desarrollo del prototipo ya que es una tarjeta construida con el microcontrolador Atmega como lo muestra la Figura 2. La selección del microcontrolador Arduino Mega como principal dispositivo para el desarrollo del proyecto se debe a varios motivos:

- Permite la lectura de sensores analógicos
- Hardware basado en código abierto
- Software libre
- Bajo costo
- Cantidad de pines digitales y analógicos

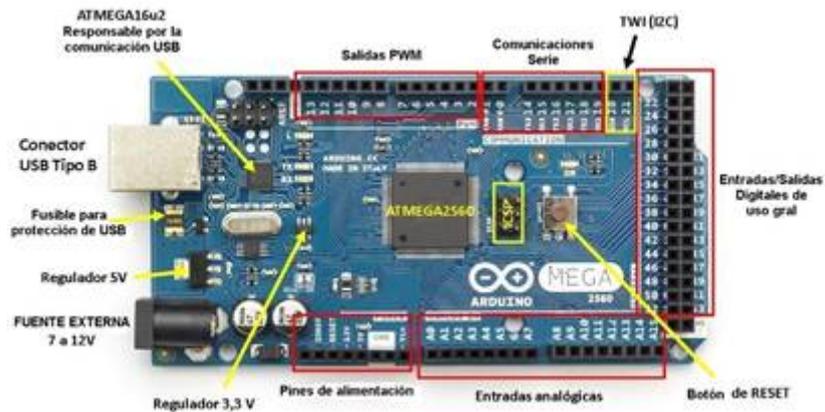


FIGURA 2.  
 Arduino Mega 2560.  
 (Arduino, 2021)

La placa de Arduino mega presenta las siguientes características:

- Microcontrolador: ATmega2560.
- Voltaje Operativo: 5V.
- Tensión de Entrada: 7-12V.
- Voltaje de Entrada (límites): 6-20V.
- Pines digitales de Entrada/Salida: 54 (de los cuales 14 proveen salida PWM).
- Pines análogos de entrada: 16.
- Corriente DC por cada Pin Entrada/Salida: 40 mA.
- Corriente DC entregada en el Pin 3.3V: 50 mA.
- Memoria Flash: 256 KB (8KB usados por el bootloader).
- SRAM: 8KB.
- EEPROM: 4KB.
- Clock Speed: 16 MHz.

Sensores: Para el proyecto se utilizaron 2 tipos de sensores. El sensor de presión MPX5500 que se muestra en la Figura 3. y el sensor ultrasónico HC-SR04 Figura 4. El transductor piezo-resistivo MPX5500, es un sensor de presión de silicio monolítico diseñado para una amplia gama de aplicaciones, particularmente es empleado con un microcontrolador o microprocesador con entrada A/D. Este transductor patentado combina técnicas avanzadas de micro mecanizado, metalizado de película delgada y procesamiento bipolar para proporcionar una señal analógica de salida precisa, que es proporcional a la presión aplicada.



FIGURA 5.  
Sensor de presión MPX5500DP.  
Autores

Las especificaciones técnicas del sensor según son las siguientes:

- Presión de trabajo: 0 a 500 kPa (0 to 72.5 psi).
- Voltaje de trabajo: 0.2 a 4.7 V.
- Empaquetado: Freescale 867C.
- Exactitud: 2.5%.
- Rango de temperatura de trabajo: -40°C a 125°C.
- Corriente: 7mA.
- 2.5% de error máximo sobre 0° a 85°.
- Ideal para sistemas basados en microprocesadores.
- Medidor de tensión cortante.
- Elemento Encapsulado Epóxico de alta durabilidad.
- Disponible en configuraciones diferenciales y de calibres.

El sensor ultrasónico HC-SR04, es escogido para este trabajo debido a su bajo costo, precisión de detección y su facilidad de uso. Utiliza el sonido para determinar la distancia entre el sensor y la superficie del objeto, este sonido opera a una frecuencia cercana al oído humano. Para el cálculo de la distancia usando la ecuación (2) el sensor ultrasónico HC-SR04 se sabe que la velocidad del sonido es 0.034 (cm/μseg) a este valor se debe de especificar que es de ida y vuelta, para saber cada tramo solo basta con dividir para 2, quedando en cada tramo de 0.017(cm/μseg) con esto la ecuación que utiliza este sensor para medir la distancia es la siguiente:

$$d = v * t \tag{2}$$

Donde d es la distancia con el objeto, v es la velocidad y t el tiempo.

Las especificaciones técnicas del sensor ultrasónico son las siguientes:



FIGURA 4.  
Sensor ultrasónico HC SR04.  
Autores

- Fuente de alimentación: +5V DC.
- Corriente de reposo: <2mA.
- Fuente de alimentación de +5V DC
- Corriente de trabajo: 15mA.
- Ángulo de trabajo: <15°.
- Distancia de rango: 2400 cm.
- Resolución: 0.3 cm.
- Angulo de medición: 30°.
- Ancho de pulso de entrada: 10µS.
- Dimensión: 45mm x 20mm x 15mm.
- Peso aprox. 10g.

Módulo de ethernet: El Shield Ethernet W1500 que se muestra en la Figura 5. es el módulo encargado de brindar conexión a internet a la placa Arduino, permitiendo así que los datos capturados de la medición del tirante y caudal se almacenen en la base de datos.



FIGURA 5.  
Módulo Ethernet.  
Autores

## Internet de las cosas (IoT)

El Internet de las cosas (IoT) hace referencia a una tecnología basada en la conexión de objetos cotidianos a Internet que intercambian, agregan y procesan información sobre su entorno físico para proporcionar servicios de valor añadido a los usuarios finales (Andres, 2018).

Cayenne: es una plataforma que destaca por ser el primer constructor de proyectos de IoT de arrastrar y soltar (drag and drop) que permite a los usuarios crear rápidamente prototipos y compartir sus proyectos de dispositivos conectados. Está diseñado para ayudar a los usuarios a crear prototipos basados en la IoT y llevarlos a la producción. Además, las aplicaciones móviles Cayenne permiten supervisar y controlar remotamente los proyectos de IoT desde las aplicaciones de teléfonos inteligentes Android o iOS y navegadores populares. También, facilita visualizar datos mediante widgets personalizables, establecer reglas, programar eventos con Cayenne Online Dashboard (Cayenne, 2021).

## Prototipo

En el Laboratorio Piloto de Hidráulica (LPH) de la Facultad de Matemáticas y Físicas, se cuenta con un canal hidráulico abierto inclinable que se muestra en la Figura 6. para prácticas de hidráulica, donde se adecuaron las tuberías preinstaladas para la conexión sensor de presión Figura 7, la sección seleccionada fue al inicio del canal, pues la presión es menor en este punto. La reducción fue de 4" a 3" y para poder acoplarlo a la tubería de 4" se le instaló dos reductores de campana de 4" a 3", además de esto en uno de los lados, se agregó una unión para 4" para evitar la fuga del agua por los reductores y en el otro extremo se lo aseguro con una abrazadera de presión.



FIGURA 6. (A)  
Canal hidráulico abierto de la Carrera de Ingeniería Civil.  
Autores

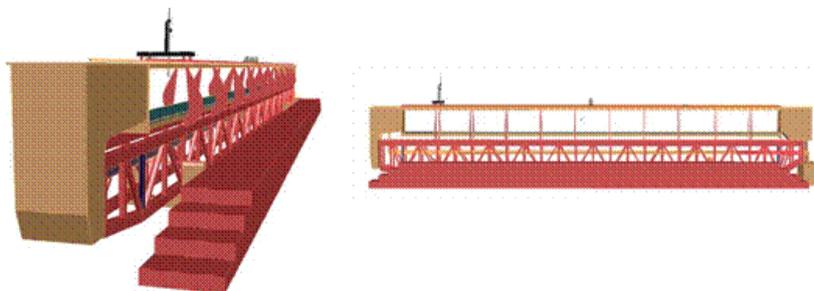


FIGURA 6. (B)  
Vista lateral derecha y la isometría frontal del canal.  
Autores



FIGURA 7.  
Tubería del LPH.  
Autores

El prototipo de medición de caudal y tirante para el Laboratorio Piloto de Hidráulica está compuesto por un microcontrolador Arduino (mega 2560), este dispositivo tendrá un módulo de ethernet (w5100) para la conexión a una base de datos en tiempo real, los sensores y una pantalla LCD 16x2 como se muestra en la Figura 8, los datos A, B y C que se muestran en la pantalla, corresponde a la lectura de los sensores ultrasónicos del tirante en el canal en cm y el valor de Q el caudal en l/s. En cuanto a la alimentación se emplea corriente alterna conectada a un transformador que reducirá de 110 a 12V que es el nivel de voltaje necesario para alimentar la placa Arduino. Los sensores, pantalla LCD y módulo ethernet están conectados al microcontrolador que proporciona los 5V necesarios para su funcionamiento.



FIGURA 8.  
Tubería del LPH.  
Autores

El microcontrolador estará conectado a 2 sensores ultrasónicos, que medirán el tirante del canal, la información que generen estos sensores se enviará al microcontrolador y estos valores serán almacenados en la base de datos Cayenne; los valores procesados se mostrarán en una pantalla LCD, el intervalo de capturas de estos sensores podrá ser modificado en el código fuente del Arduino. El sensor diferencial de presión MPX

5500, determina el caudal del canal usando el efecto de Venturi, que a partir de la presión tomada en dos puntos con áreas diferentes va a generar un diferencial de presión que va a ser leído en kPa para luego ser transformado a m, este sensor es susceptible a pérdidas a causa de la longitud de las mangueras de circulación de la presión que se pueden corregir con calibración en el código, para este caso se ha generado un margen de calibración de 0,12 m.

En la Tabla 1 se indica el hardware necesario para el desarrollo del prototipo.

TABLA 1.  
Hardware

Cantidad	Descripción
1	Sensor de Presión MPX 5500DP
3	Sensor Ultrasónico HC-SR04
1	Display LCD
1	Arduino Mega 2560
1	Módulo ethernet WS100
1	Protocolo de comunicación I2C

Autores

En la siguiente Tabla 2 se detalla el software utilizado.

TABLA 2.  
Software

Cantidad	Descripción
Cayenne myDevice	Plataforma IoT que permite ser configurada para alojar una base de datos y guardar datos de manera sencilla.
Arduino IDE	Software que permite realizar el código que posteriormente se subirá a la placa.

Autores

El montaje del módulo ethernet y los sensores ultrasónicos se detallan en la Figura 9, haciendo coincidir los pines digitales 10, 11, 12, y 13 que son los que manejan la comunicación, pero solo a modo de puente ya que se los podrán utilizar para entradas y salidas sin afectar el funcionamiento de la placa.

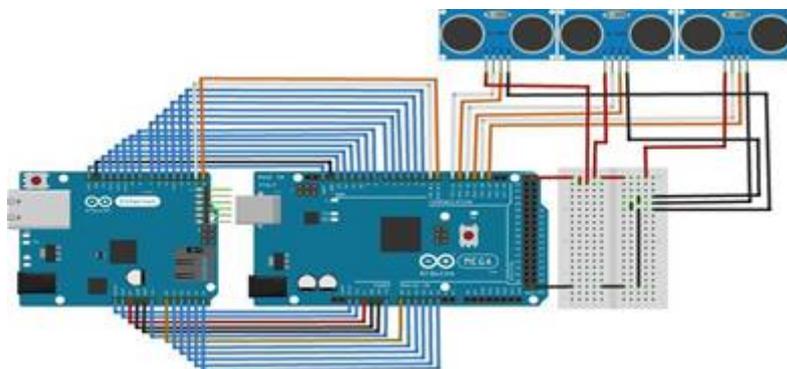


FIGURA 9.  
Montaje módulo Ethernet y los sensores HC-SR04.

Autores

Los sensores ultrasónicos HC-SR04, poseen 4 pines, 2 para la alimentación eléctrica (VCC positivo y GND negativo o tierra), y los pines restantes para la comunicación con la placa de Arduino (TRIG transmisor y

ECHO como receptor) estos permiten detectar la presencia de objetos frente a ellos generando una onda de ultrasonido que se envía desde el TRIG en forma de ráfaga hasta encontrar un objeto y realizar un rebote el cual es captado por el pin echo y dependiendo del tiempo que tarda en regresar la onda se calcula la distancia. A este módulo se lo puede alimentar desde Arduino o por alguna fuente externa que no sobrepase los 5V, en cuanto a los pines TRIG y ECHO se los debe conectar al módulo Arduino en los pines de comunicación serial disponibles (TX y RX), para el prototipo se usan tres conectados como se muestra en la en la Figura 9.

La pantalla LCD también conocida como pantalla de cristal líquido la cual se usa para la presentación de datos es un display de 16x02, se ve en la en la Figura 10, es decir, tiene dos filas que permiten 16 caracteres en cada una, es una tecnología disponible en el mercado hace algunos años atrás y se la puede conectar de manera directa a la placa Arduino pero esto demanda de un uso excesivo de pines, para solucionar esto está el protocolo de comunicación I2C que simplifica la conexión a tan solo 4 pines dos para alimentación eléctrica (VCC y GND) y los otros para comunicación serial (SCL y SDA) para esto tenemos la placa LCM 1602 IIC que realiza esta función. LCM 1602 IIC permite conectar varios maestros a múltiples esclavos debido a sus puertos que se sincronizan de manera continuación:

SDA: Línea de transmisión de datos.

SCL: Línea de pulsos de reloj de sincronización del sistema.

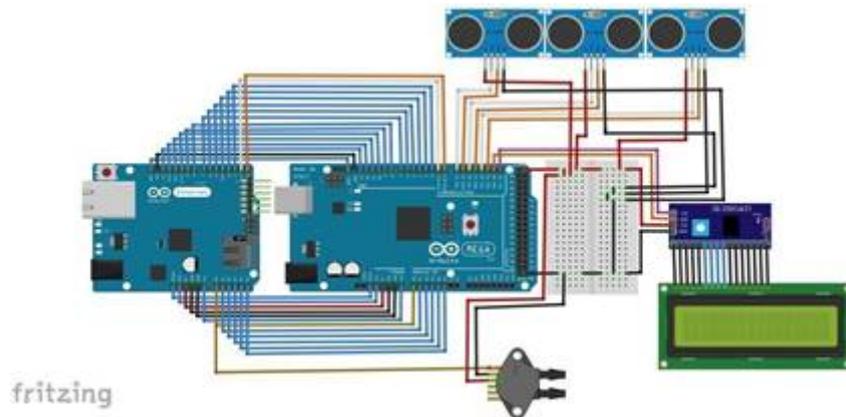


FIGURA 10.  
Conexión del sensor de presión MPX 5500DP.

Autores

El sensor de presión diferencial MPX5500 que conecta su salida a un pin analógico del Arduino y los siguientes 2 pines son para la alimentación. La estructura de este proyecto radica en 3 partes fundamentales que son:

- La entrada compuesta por los sensores ultrasónicos y el sensor de presión.
- El proceso que está compuesto por una programación basada en C++ y Cayenne.
- La salida que serán la pantalla LCD de 16x2 y la base de datos Cayenne.

El módulo Ethernet WS5100 que permite la conexión a Internet por medio de un cable RJ45 para poder registrar los datos de todos los sensores. La pantalla LCD de 16x2 se mostrará los valores de los 3 sensores ultrasónicos, el promedio de estos datos será mostrados a su vez junto con el valor del sensor de presión. Para así evitar que el administrador o usuario se esté conectando a la base de datos cada vez que haga uso del prototipo.

## Ubicación de los equipos

En la Figura 11, se muestra la ubicación de todos los equipos en el canal del Laboratorio Piloto de Hidráulica. El sensor ultrasónico HCSR404 es el encargado de recolectar la información sobre la distancia que existe entre el borde del agua y la entrada del sensor, este es un medida tomada que será un valor variable, debido a que la superficie del agua no tiene la misma distancia con el sensor en todo momento, así mismo este sensor comenzará a tomar medidas desde el llenado del canal, permitiendo así monitorear el tirante del canal desde el inicio, Para el procesamiento de datos entregados por los sensores ultrasónicos la ecuación para poder especificar de forma correcta el tirante del canal se describe usando la ecuación (3).

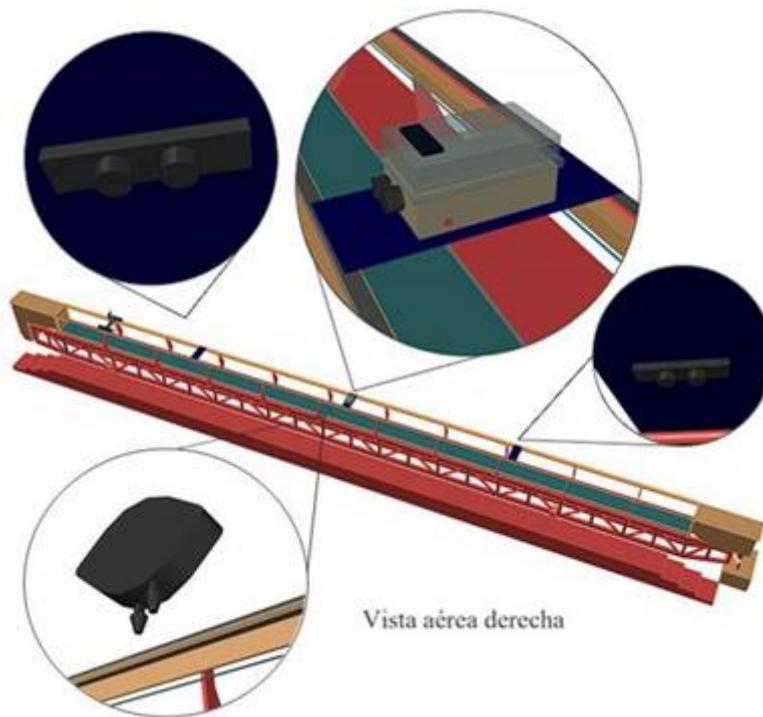


FIGURA 11.  
Montaje del prototipo en el canal.  
Autores

Donde, T= tirante, DB= distancia que existe entre el sensor ultrasónico y la base del canal. DS= Distancia que existe entre el sensor ultrasónico HCSR04 y la superficie del agua detallado en la Figura 12(a y b).

$$T = DB - DS \quad (3)$$

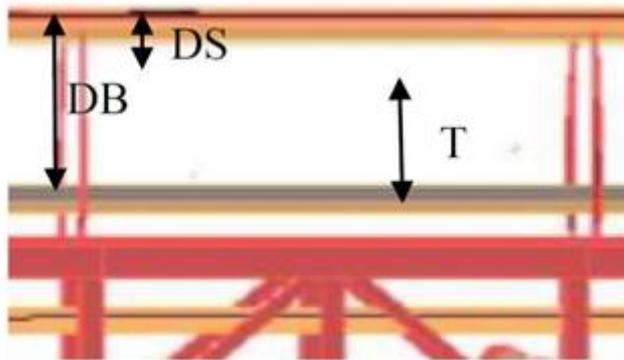


FIGURA 12(A).  
Tubería del LPH.



FIGURA 12(B).  
Sección del canal.  
Autores

El sensor de presión MPX 5500 es el encargado de aportar el diferencial de presión que existe entre las tuberías de 4” y de 3”, este dato es usado en la ecuación (4) que permite determinar la velocidad, que circula por la tubería de sección A1:

$$V_1 = A_2 \sqrt{\frac{2gh}{A_1^2 - A_2^2}} \tag{4}$$

Donde, V1= velocidad del fluido, A1= área total de la sección del tubo de 4”, A2= Área total de la sección del tubo de 3”, g= gravedad y h= diferencia de altura del fluido.

Como se especifica en la ecuación (5) el valor que brindará el sensor de presión será h, el cual consiste en el diferencial de presión permitiendo calcular la velocidad que pasa por la tubería. El valor del caudal expresado será en #3/# . La ubicación del sensor en el canal muestra en la Figura 13.

$$Q = V_l * A_1 \tag{5}$$



FIGURA 13.  
Ubicación del sensor MPX 5500 en el canal.  
Autores

## Monitoreo

La plataforma Cayenne ofrece un cuadro de mandos personalizable para customizar con widgets arrastrar y soltar, permitiendo un control total sobre el proyecto para mostrar las lecturas y datos procesados por el microcontrolador. También facilita al usuario controlar remotamente y crear nuevos proyectos a partir de las aplicaciones móviles proporcionando acceso y visualización en tiempo real a datos históricos.

En la figura 14, se observa la pantalla principal del aplicativo. Se presenta la interfaz correspondiente al monitoreo de: tirante (sensor 1,2,3) y caudal.

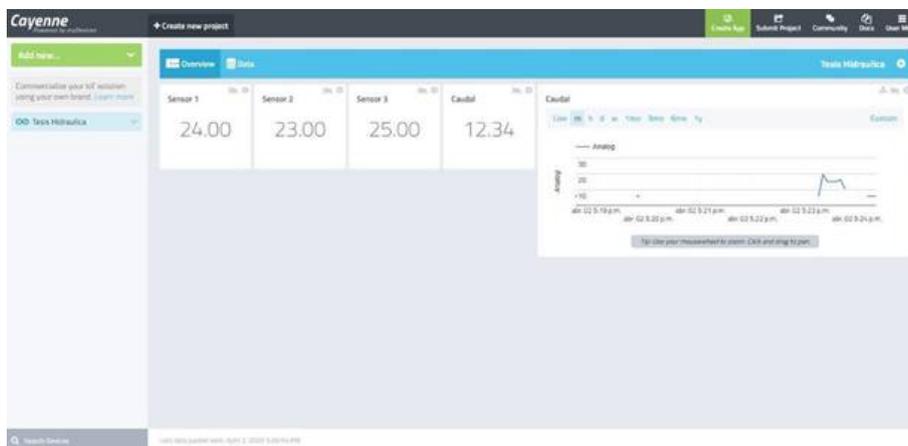


FIGURA 14.  
Interfaz de monitoreo.  
Autores

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El valor mínimo de caudal 10,65 l/s se lo obtuvo a partir de la presión mínima el cual es el punto inicial o cero, a partir del cual se incrementó progresivamente la presión para obtener distintos valores de caudal hasta llegar a un caudal máximo de 24,89 l/s. Se realizaron pruebas del funcionamiento para determinar el nivel de caudal y el tirante hidráulico en diferentes puntos del canal, los cuales están reflejados en la Tabla 3.

TABLA 3.  
Lecturas de los sensores

Lecturas	Tirante (cm)	Caudal (l/s)
1	14 13	24,89
	12 11	21
	10 9	17,55
		16,40
		13,83
		12,34
2	14 13	24
	13 12	23,27
	11 10	22,42
		16,40
		13,83
		12,34

3	12 12 13	24,89
	12 11 12	24,09
	11 10	19,64
		18,63
		17,55
		16,40
		13,83
		12,34

Autores ecuacion

La curva de descarga o de calibración de caudales de las pruebas realizadas se muestra en la Figura 15, donde se evidencia el comportamiento del caudal en función del tirante hidráulico. El propósito de la curva de descarga es determinar caudales al conocer la altura de los niveles de agua, usando la función  $Q = f(h)$  que se detalló en la ecuación 1. La curva de descarga característica del canal, en los rangos de caudal anteriormente descritos, es presentada a continuación ecuación (6) :

$$Q = 2352 * H^{0.5584} \tag{6}$$

Con un  $R^2$  de 0.94.

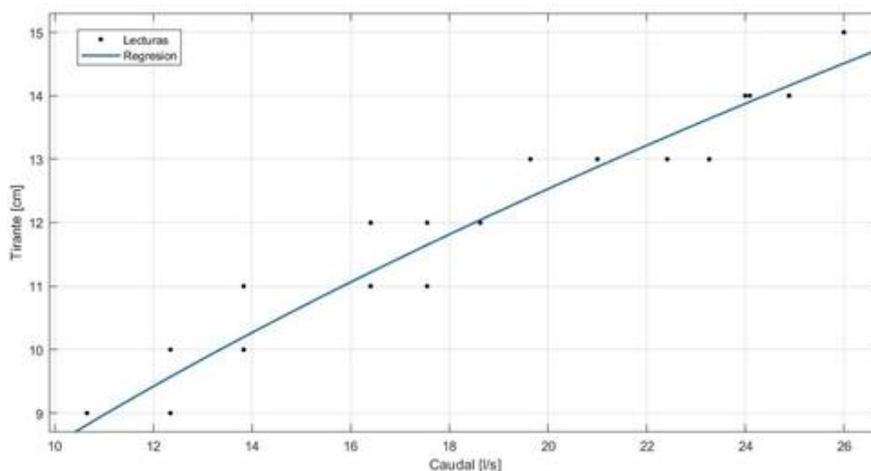


FIGURA 15.  
Curva de descarga.

Autores

Cuando se proceda a tomar lecturas de tirante, se debe esperar a que se instaure el flujo permanente uniforme en el canal. Una vez obtenida la ecuación (6) mediante regresión, se podrá calcular el tirante relativo a cada caudal o viceversa. Según investigaciones que han realizado calibraciones de sensores ultrasónicos y de presión se han obtenido valores de  $R^2$  mayores a 0,90 que indican la alta relación entre la señal eléctrica y la variable física (Shadadpuri Goplani, 2018) (Ascencios, 2020).

## CONCLUSIONES

El diseño del prototipo se realizó con componentes y software open-source. Se demostró que el dispositivo es totalmente funcional en este ambiente en específico, y gracias a esto puede ser la base de mejora para implementarse en otras áreas o ambientes con las debidas modificaciones. Los valores que se muestran en el dispositivo en las mediciones realizadas en las pruebas fueron satisfactorios, pues estas están bajo un intervalo de aceptación adecuado que fue comprobado por docentes de la Carrera de Ingeniería Civil.

La base de datos que se implementó permite el almacenamiento de los valores tomados para un posterior análisis tanto de docentes y estudiantes. Los valores de las mediciones validan la teoría con la experimentación. La aplicación directa de este prototipo experimental en la ingeniería es para la observación y cálculo de caudal y tirante en el Laboratorio Piloto de Hidráulica de la Facultad de Matemáticas y Físicas. Se realizó la comparación entre los datos obtenidos por el prototipo y los valores realizados de manera manual y/o empírica.

A partir de la recopilación de las lecturas de los sensores en una sección del canal fue posible analizar la variación de caudal en función del tirante para fines didácticos. La construcción del prototipo es viable y representa un bajo costo de implementación.

Utilizar el prototipo de monitoreo requiere una capacitación previa del docente a cargo de las prácticas de hidráulica. Además, se recomienda trimestral o cuatrimestralmente calibrar los sensores ya que el rango de sensibilidad decrece con el aumento de la temperatura y de la humedad en el ambiente. Como trabajo a futuro se considera la implementación de un sensor de humedad y temperatura que permita generar disparadores cuando se detecten cambios bruscos en los niveles de humedad/temperatura en el ambiente ocasionando variaciones en la lectura sensores.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agustin, L. M. (2010). MEDIDORES DE FLUJO EN CANALES ABIERTOS. Guatemala: UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA.
- Andres, M. B. (2018). Internet de las Cosas. Madrid: REUS.
- Ascencios, D. M. (2020). alibración, validación y automatización del sistema de riego por goteo subterráneo usando un microcontrolador Arduino. Revista de Investigaciones Altoandinas, 22(1), 95-105.
- Ayala, L., & Albóniga, G. (2015). Dispositivo electrónico de medición del caudal de agua para canales abiertos. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 91-99.
- Cayenne. (Julio de 2021). CAYENNE MY DEVICES. Obtenido de CAYENNE MY DEVICES: <https://developers.mydevices.com/cayenne/features/>
- Chaudhry, M. H. (2008). Open-Channel Flow. En M. H. Chaudhry, Open-Channel Flow Second Edition (pág. 523). Prentice Hall.
- Manzano Juan, P. V. (2015). Design and installation alternatives of Venturi injectors in drip irrigation. Brazil: Universidade Federal do Ceará.
- Manzano-Juaréz, J. (2008). Análisis del inyector Venturi y mejora de su instalación en los sistemas de riego localizado. Valencia: Universitat Politècnica de València.
- Ortega, R. (2013). Diseño Construcción y Operación de un Banco Hidráulico y Venturímetro para Pruebas Hidráulicas. Quito: Universidad Central del Ecuador.
- Palman, L. &. (2015). Mediciones en laboratorio con equipo flowtracker (ADV). . IV SIMPOSIO SOBRE MÉTODOS EXPERIMENTALES EN HIDRÁULICA, 10.
- Rodriguez, J. M. (2016). Manual de Hidrometria Basica. España: SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGIA E HIDROLOGIA.
- Sandoval-Mendoza I. (Julio de 2017). Modelos matemáticos para la estimación del caudal en vertedores Suro utilizados en sistemas de riego. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 26(3), 3038.
- Shadadpuri Goplani, S. (2018). Analisis, caracterizacion y calibracion de sensores de bajo coste para Arduino. Univer, 166.
- CADAVID, J.H.: Hidráulica de canales: fundamentos, Ed. Universidad Eafit, ISBN-9588281288, España, 2006.
- WSC (Water Survey of Canada) (2006). "Comparison Measurements between SonTek FlowTracker Acoustic Doppler Velocimeter and Price Current Meters". En: <http://www.wmo.int> - Fecha de acceso: 05-12-2014