

# CONSTRUCCIÓN CON TECNOLOGÍA ABIERTA DE UN SENSOR DE TURBIDEZ DE BAJO COSTO

## THE CONSTRUCTION OF AN OPEN SOURCE BASED LOW COST TURBIDITY SENSOR

**Cristhian Román-Herrera**

Ingeniero Mecatrónico (C)  
Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE.  
Sangolquí, Ecuador  
cproman@espe.edu.ec

**David Loza-Matovelle**

M. Sc. Ingeniería de Procesos  
Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE.  
Sangolquí, Ecuador.  
dcloza@espe.edu.ec

**Luis Segura**

M. Sc. Sistemas de Manufactura  
Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE  
Sangolquí, Ecuador  
ljsegura@espe.edu.ec

**Reza Dabirian**

Ph. D. Física Química  
Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE.  
Sangolquí, Ecuador.  
dabirian@gmail.com

**Resumen–** Un dispositivo para medir turbidez fue desarrollado incorporando componentes de bajo costo y tecnología abierta, como Arduino, impresoras 3D y software libre. El dispositivo consta de un LED que emite luz y un sensor que recepta la luz que atraviesa el líquido por medir. Se cuantifica la cantidad de luz que se recepta para obtener una medida. Se analizaron diferentes alternativas y se seleccionó un sistema con dos receptores dispuestos a 90° para obtener los resultados requeridos. Para su calibración se realizaron diferentes pruebas y se obtuvo un rango efectivo entre 50 NTU hasta 650 unidades nefelométricas de turbidez (NTU). Para validar el equipo se comparó con un turbidímetro comercial modelo HACH 2100Q obteniendo resultados con un error 3.3%. La aplicabilidad de este equipo va dirigida al control de la eficiencia de remoción de sólidos suspendidos en plantas de tratamiento de aguas servidas en regiones rurales del Ecuador.

**Palabras clave–** Arduino, bajo costo, código abierto, turbiedad.

**Abstract–** A novel device for measuring turbidity was designed and built. The device was prepared using low cost components and open source technology such as Arduinos, 3-D printers and open source software. The device consists of two main parts; firstly a LED which emits light and secondly a system that measures the light that passes through the sample holder. The amount of light is quantified to obtain a value of the turbidity of the sample. A detector setup with two light receptors aligned at 90° with respect to each other was chosen in order to increase the sensitivity of the instrument. The device was calibrated and showed a sensitivity range between 50 and 650 Nephelometric Turbidity Unit (NTU). As part of the system validation test samples of the device were

compared with those of a commercial HACH turbidity sensor and the disparity was just 3.3%. The device is intended to be used to monitor the efficiency of removal of suspended particles in soils as well as treatment of wastewater in rural regions of Ecuador.

**Keywords–** Arduino, low cost, open source, turbidity.

### 1. INTRODUCCIÓN

La filosofía open-source ha cambiado la forma en que entendemos el desarrollo de *software* y productos actualmente. Durante los últimos años esta tendencia ha progresado inmensamente y se han creado varios laboratorios en el mundo que se dedican exclusivamente a la construcción de equipos científicos utilizando esta metodología. Estos tipos de laboratorio emplean Raspberry Pi y plataformas abiertas basadas en Arduino, así como *software* libre para su implementación [1]. También, existen muchas aplicaciones en el campo educativo y el e-learning [2] y diseñadas para la experimentación remota [3] dentro de estos laboratorios.

Estas ideas están basadas mayormente en tres desarrollos importantes: *software* libre, impresoras 3D y *hardware* de bajo costo que son los tres pilares fundamentales para el desarrollo de un equipo científico de bajo costo [4].

Richard Stallman en los ochenta buscó una alternativa diferente al no tener acceso al código fuente de los programas. Producto de estos desarrollos nació Linux [5]. Con lo cual se comenzó el movimiento del *software*, libre cuyo objetivo es tener acceso a los programas, estudiar, copiar y modificarlos.

A partir del 2000 estas ideas se empezaron a aplicar en la electrónica, diseñando circuitos libres. Muchos circuitos están disponibles actualmente en Internet. En el 2005 nació el proyecto Arduino [6] que es actualmente el *hardware* libre de mayor difusión.

En el 2008, Adrian Bowyer, un investigador inglés, construyó la primera impresora 3D libre, dentro del proyecto REPRAP [7]. Este tipo de equipos están libres en la red y cuentan con una comunidad grande para su desarrollo. Actualmente hay más de 200 tipos de impresoras diferentes y la mayor parte de ellas de forma gratuita en la red.

Hoy en día es posible construir equipos científicos de bajo costo, incluso algunos diseños se encuentran totalmente libres en el Internet. Esta alternativa ha abierto la posibilidad para que los investigadores construyan sus propios instrumentos a bajo precio y con similares prestaciones a los equipos comerciales usados en laboratorios.

Las ventajas de este tipo de tecnologías son: equipos que se adapten a las necesidades, reducir la dependencia tecnológica, fomento de la industria local, costos reducidos entre otras ventajas. La tendencia en el uso de estos equipos se ha acrecentado a tal punto que existe *software* comercial como Matlab y LabView que han incluido librerías para trabajar con este tipo de placas. Por ejemplo, se utilizan para realizar trabajos en conjunto por Internet con LabView y diferentes equipos [8] y también para el control de un robot bípedo a través de Matlab [9]. En general, estas aplicaciones van desde el control de diversos motores, sensores, etc. hasta el uso de visión artificial, internet, wireless; por decir algunas de las principales aplicaciones que tienen actualmente estos dispositivos.

Muchos de los elementos en este trabajo se efectuaron con esta filosofía. Se utilizó una impresora 3D la cual permitió realizar diferentes portamuestras adecuados y adaptados a nuestras

necesidades particulares y al tipo de diseño que se deseaba analizar.

Se entiende por turbidez la relación que tienen los líquidos con la pérdida de transparencia. La turbidez no tiene que ver con el color de la muestra, sino que está relacionada con las partículas en suspensión o material coloidal que se encuentra dentro de la muestra.

Se define como turbiedad a la reducción de la transparencia de un líquido causada por la presencia de material no disuelto [10]. Antiguamente se empleaba el turbidímetro de vela de Jackson [11], sin embargo este tipo de instrumento era muy subjetivo, ya que dependía del ojo del observador, por ello los resultados eran poco exactos e imprecisos, por lo cual este método como otros similares pierden veracidad por su falta de precisión y exactitud en las mediciones, requiriendo ya en la era digital sensores mucho más precisos y exactos, de esta manera se desarrollaron turbidímetros digitales con sensores de precisión y exactitud variables.

Las fuentes de agua superficial son eje de desarrollo de los seres humanos que permiten el abastecimiento para las diferentes actividades socioeconómicas llevadas a cabo en los asentamientos poblacionales; no obstante, de forma paradójica muchas de estas actividades causan alteración y deterioro de las mismas [12].

El equipo medidor de turbidez de bajo costo supone una gran herramienta a la hora de evaluar tres aspectos fundamentales de la calidad del agua para consumo en zonas rurales. El primer aspecto es la estética, que como sabemos, un agua clara y transparente es mucho más agradable a la vista y por ende generará un mejor gusto. Otro aspecto es la tratabilidad, es decir, en función de los sólidos en suspensión se puede fijar una premisa para el tratamiento que se le deberá dar al líquido vital. Por último aspecto, tenemos que la turbidez es además uno de los nueve parámetros para determinar los índices de calidad de agua [13].

La finalidad del presente trabajo es elaborar un sensor de turbidez de bajo costo, el cual, a través de su aplicación pueda contribuir a mejorar la calidad de vida de poblaciones rurales.

## 2. MÉTODOS

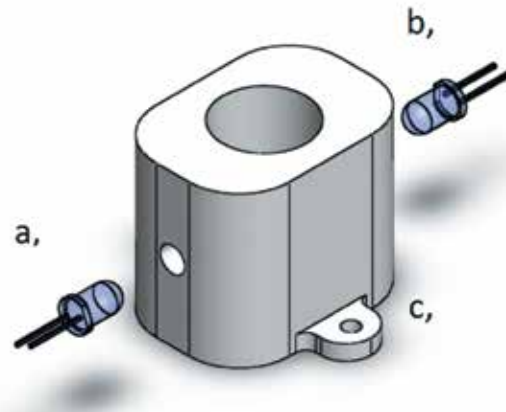
### 2.1 Diseño y construcción

El medidor de turbidez (turbidímetro) se construyó empleando tecnología de bajo costo, con componentes electrónicos accesibles, LEDs, fotoceldas, una placa Arduino Uno (microcontrolador ATmega328) [6] para el procesamiento de datos y una impresora 3D para construir la estructura del sensor. La programación se realizó con el lenguaje abierto “wiring” [14] que es propio del Arduino y algunas plataformas libres.

Para el diseño del sensor se investigaron varios métodos que permiten realizar la medición de turbidez. El primer diseño Fig.1, fue construido utilizando un LED infrarrojo (emisor de luz) y un fototransistor (receptor de luz) ubicados uno frente al otro, montados en una estructura impresa de tal forma que la luz atravesase la muestra totalmente. El circuito implementado se puede ver en la Fig.2, que contiene un emisor y un receptor en un ángulo de 90° y con el cual se logró obtener un voltaje proporcional a la luz que logra atravesar el líquido. Se hicieron pruebas con el receptor en otras posiciones pero se obtenían menores sensibilidades. Para este diseño los rangos de medida fueron bajos (en el orden de 400 a 650 NTU) y con poca repetibilidad y exactitud.

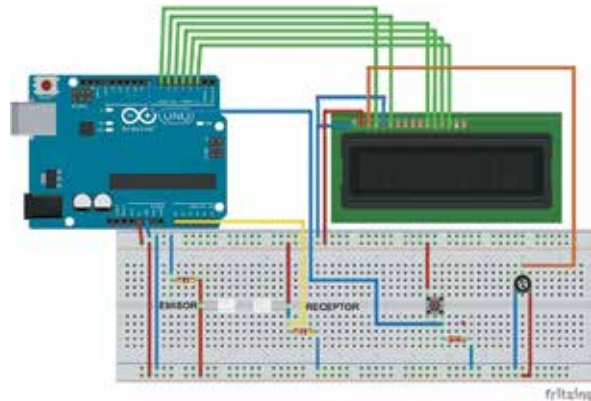
A partir de estos resultados se decidió diseñar un nuevo sensor. En esta versión se utilizaron dos LED's de luz blanca y dos LDR's (“light-dependent resistor”) con esta propuesta se logró mejor resolución y sensibilidad, debido a que se duplicó la cantidad de luz que atraviesa el portamuestra. Se receptan la luz emitida por los LED's la cual atraviesa el portamuestras que contiene el líquido por medir. También, se replanteo el portamuestras, el cual se puede observar en la Fig.3, se aprecia que la estructura de la base del sensor (color azul) cubre completamente el tubo de ensayo. Además, para mejorar la repetibilidad se tomaron en cuenta detalles como la orientación del tubo de ensayo y el número de muestras por tomar. En la Fig. 3, también se puede ver un modelo con el sistema de los dos LED's y los dos LDR's utilizados, ubicados a 90° uno con respecto del otro. Los beneficios aportados por este sistema son una mayor sensibilidad y un mayor rango (entre 50 a 650 NTU) con una adecuada exactitud.

Fig. 1. SENSOR DE TURBIDEZ VERSIÓN INFRARROJO: (A) LED INFRARROJO, (B) FOTOTRANSISTOR, (C) BASE



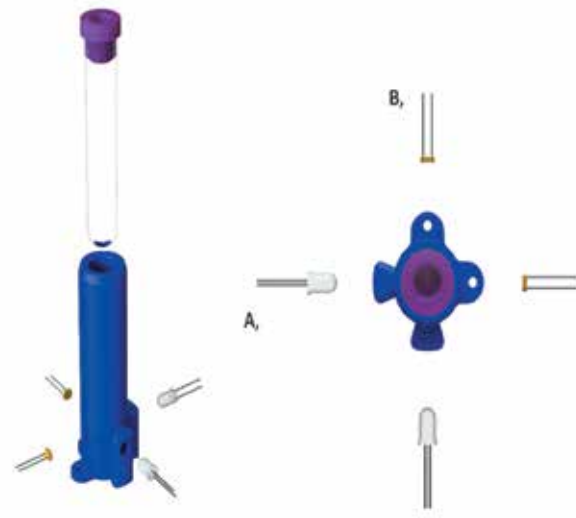
Fuente: autores.

Fig. 2. CIRCUITO SENSOR DE TURBIDEZ, VERSIÓN INFRARROJO



Fuente: autores.

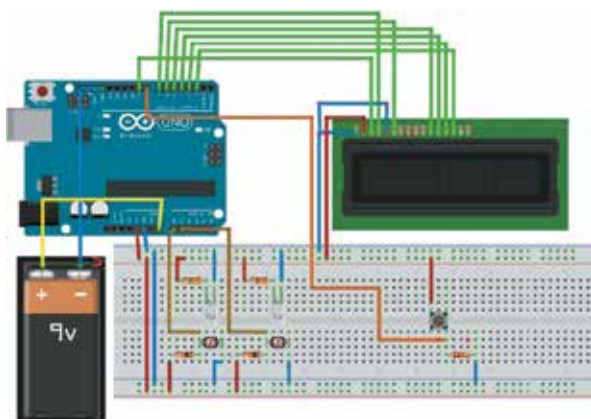
Fig. 3. SENSOR DE TURBIDEZ VERSIÓN LED CON UBICACIÓN DE: (A) DIODO EMISOR DE LUZ, (B) RECEPTOR DE LUZ



Fuente: autores.

El circuito que se puede ver en la Fig. 4, indica el sistema de conexiones tanto a los LEDs, sensores y el LCD. Así como las conexiones a las entradas y salidas analógicas/digitales y la alimentación que es a través de una batería de 9V. Por medio de esta configuración se obtuvo un mayor rango en la señal de salida con respecto a las pruebas iniciales. Los datos de voltaje obtenidos pasan por una primera etapa de procesamiento en donde se toman 20 datos, cada uno en un intervalo de 100 milisegundos. Posteriormente, a través de estadística se eliminan los valores aberrantes y, finalmente, se obtienen los resultados en NTU los cuales se visualizan por el usuario en el LCD. También, se observa en la figura la fuente de energía del equipo que es una batería de 9 voltios común, la que permite que el turbidímetro sea un equipo portátil y posibilite el uso en zonas rurales.

Fig. 4. CIRCUITO SENSOR DE TURBIDEZ VERSIÓN LED



Fuente: autores.

Finalmente, todos los elementos descritos se ubicaron dentro de una carcasa Fig. 5, teniendo el *hardware* del turbidímetro finalizado y listo para proceder con la calibración.

Fig. 5. EQUIPO FINAL



Fuente: autores.

Fig.6. COMPONENTES

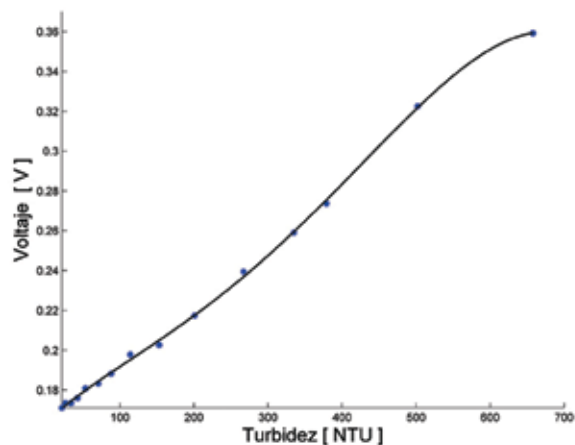


Fuente: autores.

## 2.2 Calibración

El dispositivo se calibró en forma paralela con un medidor de turbidez HACH Modelo 2100P ISO [15]. Para realizar la calibración del sensor se prepararon mezclas de agua destilada con diferentes porcentajes de impurezas. Primeramente, se obtuvo la turbidez en NTU de cada una de las muestras en el medidor comercial, una vez conocida la turbidez de la muestra se midió en el sensor construido. Repitiendo el procedimiento anterior para cada una de las muestras se obtuvo la curva característica del sensor, la cual se puede ver en la Fig.6.

Fig. 7. CURVA DE CALIBRACIÓN



Fuente: autores.

## 3. RESULTADOS

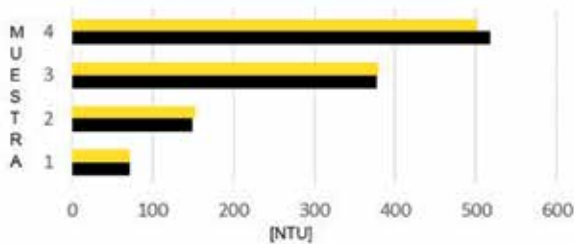
Para un primer diseño en una etapa de pruebas se realizó una comparación de la señal de salida obtenida (voltaje), con el voltaje de salida de un sensor comercial que se utiliza en lavado-



ras [16] y se evidenció que el método empleado no presentó la sensibilidad necesaria requerida para este trabajo. Después de replantear el modelo inicial se obtuvo un mejor rango y una mayor sensibilidad.

Con el segundo diseño, para verificar la calibración realizada se prepararon cuatro muestras de agua mezclado con leche con valores desconocidos de impureza. Se procedió a medir cada una de las muestras en el turbidímetro comercial y en el desarrollado ya calibrado obteniendo resultados, tabla I. En la comparación se observa un máximo error del 3.3%. El error está dentro de los límites aceptables para un equipo diseñado de esta manera.

Fig. 8. VALIDACIÓN DE DATOS



Fuente: autores.

TABLA I  
VALIDACIÓN DE DATOS

	1	2	3	4
<span style="color: yellow;">■</span> Turbidímetro comercial	70,9	153	379	502
<span style="color: black;">■</span> Turbidímetro calibrado	70,8	148	376,3	516,6

Fuente: autores.

De los datos obtenidos en esta versión del equipo se definió el rango en el que se puede realizar mediciones fiables, siendo este de los 50 hasta los 650 NTU. El medidor de turbidez de bajo presupuesto demostró precisión y exactitud en un rango entre 50 y 650 NTU y su aplicabilidad puede ser dirigida al control de la eficiencia de remoción de sólidos suspendidos en plantas de tratamiento de aguas servidas, tanto en las regiones pobladas como rurales. Es importante aumentar la señal de respuesta o establecerla en un rango más amplio, lo que probablemente incremente algo el costo del equipo, sin embargo puede no aumentarse tanto como los otros tipos de equipos.

Para futuros desarrollos se plantea cambiar el sistema de adquisición de datos por una señal en frecuencia con lo cual se ampliaría el rango de medidas hasta 10 NTU y en ese caso se pueda utilizar para la verificación de aguas de consumo que es el objetivo final del proyecto. Cabe mencionar que los cambios propuestos son compatibles con la versión propuesta en el documento. Dentro de las investigaciones y caracterizaciones de efluentes líquidos de vertidos residuales, destaca que es muy importante la portabilidad de los equipos por lo que un turbidímetro pequeño favorecería de gran manera al campo investigativo, siendo más allá de un equipo funcional, un equipo cómodo y de amplia aplicación.

#### 4. CONCLUSIONES

Se construyó un turbidímetro de bajo presupuesto que se calibró a través de un medidor comercial de alta precisión. Con el método propuesto se logró obtener un instrumento con medidas confiables para su aplicabilidad en estudios de calidad de agua en zonas de pocos recursos en rango de 50 hasta 650 NTU.

Se concluye que este tipo de turbidímetro podría representar una disminución de costes en varias líneas de producción, además de otros varios equipos que requieren este tipo de mecanismo y para los cuales la precisión y exactitud deban ser consideradas a partir de 50 NTU.

En cuanto a precios, un medidor de turbidez comercial profesional con una alta precisión en el mercado cuesta alrededor de USD 1000, el sensor construido se realizó con un presupuesto de USD 150. Por lo que se concluye, que este equipo es una alternativa de bajo costo con una calidad aceptable y gran aplicabilidad en el mercado.

#### AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue patrocinado por el Proyecto Prometeo de la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación de la República del Ecuador. Se agradece al ingeniero Santiago Castellanos Villa por su ayuda en la impresión 3D de las partes del equipo, al ingeniero Xavier Segovia por su ayuda en la parte electrónica y al ingeniero Ramiro Rubén Calahorrano por las discusiones sobre las aplicaciones del sensor.

**REFERENCIAS**

- [1] M. Kalúz, L. Čirka, "ArPi lab: A low-cost remote laboratory for control education," presentado en 19th IFAC World Congress, Ciudad de Cabo, Sur África, 2014. pp. 9057-9062.
- [2] B. Campos, I. Angulo, "Easily deployable low-cost remote lab platform", presentado en Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV) Conference, Bilbao, España, 2012.
- [3] M. Huba, M. Halás, "Hydraulic plants for face-to-face training and remote experiments," presentado en 9th Emerging eLearning Technologies and Applications (ICETA), Stara Lesna, Eslovaquia, 2011.
- [4] J.M. Pearce, "Introduction to Open-Source Hardware for Science", ISBN: 9780124104624, Elsevier, 2014.
- [5] LINUX Foundation, "An Overview of the Linux Operating System", (2014), [Online], Disponible en: <https://www.linux.com/learn/new-user-guides/376-linux-is-everywhere-an-overview-of-the-linux-operating-system>
- [6] Arduino, "What is Arduino?," (2015), [Online] Disponible en: <http://www.arduino.cc/>
- [7] Reprap, "Welcome to RepRap.org," (2015), [Online] Disponible en: <http://reprap.org/>
- [8] V. Georgitzikis, "Controlling physical objects via the Internet using the Arduino platform over 802.15.4 networks," Revista IEEE America Latina, vol.10, no.3, pp. 1686-1689, Jun.2012.
- [9] A. Al-Busaidi, "Development of an educational environment for online control of a biped robot using MATLAB and Arduino," presentado en 7th Europe-Asia Congress on Research and Education in Mechatronics (REM), París, Francia, 2012. pp. 337-344.
- [10] "Calidad del agua: Determinación de la turbiedad," ISO 7027,1999.
- [11] "Standard methods for the examination of water and waste water," American Public Health Association, ed. 22, 2012.
- [12] P. Torres, "Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano," Revista Ingenierías Universidad de Medellín, vol. 8, no. 15, pp. 79-94, 2010.
- [13] Water Research Center, "Monitoring the Quality of Surfacewater," (2014), [online] Disponible en: <http://www.water-research.net/>
- [14] Wiring, "What will you do with the W?," 2015, [online] Disponible en: <http://wiring.org.co/>
- [15] HACH Company, "Turbidímetro portátil modelo 2100," 2014, [online] Disponible en: [www.hach.com/asset-get.download.jsa?id=7639984909](http://www.hach.com/asset-get.download.jsa?id=7639984909)
- [16] Newark, "Amphenol advanced sensors, Tsd-10 turbidity sensor, 5vdc, phototransistor," 2014, [online] Disponible en: <http://www.newark.com/amphenol-advanced-sensors/tsd-10/turbidity-sensor-5vdc-phototransistor/dp/18X9859>