

Sonda modular para monitoreo básico de calidad del agua y el aire

Andrés Calvillo Téllez ^A., Marianne Martínez Zanzarric ^B., José Cruz Núñez Pérez ^C.

^A M. en C., Instituto Politécnico Nacional CITEDI, calvillo@citedi.mx, Tijuana, Baja California, México, C.P. 22435.

^B Ing, UABC, marianne.martinez@uabc.edu.mx, Tijuana, Baja California, México. Blvd. Universitario #1000 C.P. 22260.

^C Dr. Instituto Politécnico Nacional CITEDI, calvillo@citedi.mx, Tijuana, Baja California, México, C.P. 22435.

Resumen

Se presenta un sistema modular que permite realizar monitoreo básico tanto de calidad del agua como del aire. El monitoreo es imprescindible para disciplinas de medio ambiente, acuícolas y agrícolas, donde este tipo de instrumentación es necesario para el levantamiento de datos. El sistema emplea componentes de bajo costo, que permite realizar lecturas cercanas a las que presentan sondas de costo elevado. La sonda recolecta lecturas como las coordenadas de la posición geográfica, así como el horario en que registra los parámetros objetivo del monitoreo. Los módulos o subsistemas que integran la sonda son, el de posicionamiento global (GPS), que muestra los datos de altitud, latitud y longitud del punto donde registrara lectura, una etapa de reloj de tiempo real, fecha marcando la hora, el módulo de memoria SD almacena de forma continua los datos, el sistema de adquisición de datos, la unidad de procesamiento central y el de energía. El sistema adquiere parámetros para medir la calidad del agua, conductividad, presión y temperatura y para el aire se censaron tres tipos de gases amoníaco, dióxido y monóxido de carbono. La información obtenida permitió identificar el horario de modificación de los parámetros, y la identificación de las condiciones idóneas para el crecimiento de microorganismos en el agua.

Palabras clave— Calibración, calidad del agua, conductividad, monitoreo, Registro de datos.

Abstract

A modular system that performs basic monitoring of both water and air quality is presented. Monitoring is essential for environmental, aquaculture and agricultural disciplines, where this type of instrumentation is necessary for data collection. The system uses low-cost components, which allows readings close to those with high-cost probes. The probe collects readings such as the coordinates of the geographical position, as well as the time it records the target parameters of the monitored. The modules or subsystems that make up the probe are, the global positioning (GPS), which shows the altitude, latitude and longitude data of the point where the reading will be recorded, a real-time clock stage, date marking the time, the module SD memory continuously stores data, data acquisition system, central processing unit, and energy. The system acquires parameters to measure water quality, conductivity, pressure, and temperature and for air three types of ammonia, dioxide, and carbon monoxide gases

were censored. The information obtained allowed us to identify the schedule of modification of the parameters, and the identification of the ideal conditions for the growth of microorganisms in the water.

Keywords— Calibration, Conductivity, Datalogger, Monitoring, Real Time Clock, Water Quality.

1. INTRODUCCIÓN

El agua es un elemento fundamental del desarrollo socioeconómico sostenible, debido a que es ampliamente empleada en la producción de alimentos, así como de los ecosistemas elementales para la supervivencia de los reinos, vegetal animal y humano. El agua es crucial el vínculo entre la sociedad, el medioambiente, en el cambio climático [1].

Lo escasa y aunado al mal uso problematiza el desarrollo sostenible junto con el medio ambiente. Esto representa una amenaza para la salud humana, su bienestar y la seguridad alimentaria. Este riesgo puede ser cuantificado empleando sistemas de monitoreo [2].

Del total de agua dulce a nivel mundial, México contempla el 0.1% tomando en cuenta las exportaciones e importaciones de agua, el país tiene 471.5 mil millones de metros cúbicos de agua dulce renovable cada año [3].

La principal contaminación de los cuerpos de agua lo constituyen las descargas residuales ya sea de tipo doméstico, industrial, agrícola, pecuario o minero. En 2010, el 70% de los cuerpos de agua del país presentaba algún indicio de contaminación. El costo económico del agua residual no tratada fue de 57 403 millones de pesos [4-6].

El término calidad del agua expresa el grado de pureza con respecto a materia orgánica e inorgánica, así como la cualidad para utilizarse en varios procesos acorde con los parámetros, de concentración de sustancias [7-8].

Un buen programa ambiental debe considerar atenuar el impacto potencial de contaminación focalizando y geolocalizando la evolución del problema, realizar un monitoreo continuo para determinar su extensión, realizar procedimientos de acción para el control y pasar a la legislación para asegurar que se implementen las acciones pertinentes y finalmente monitorear el proceso para garantizar que el problema se ha contenido [9], por ello el de monitoreo es pieza fundamental. Los métodos para analizar la calidad del agua los hay clásicos e instrumentales. Son rápidos, exactos y de bajo costo, aunque son susceptibles a interferencias. Los métodos instrumentales son adecuados cuando se trata de bajas concentraciones, son rápidos de realizar y se pueden automatizar. Entre estos se cuenta con los métodos cromatográficos, espectro-métricos y electroquímicos [10].

Los análisis en el campo producen resultados instantáneos, aunque las condiciones analíticas en las que se mide pueden estar lejos de ser idóneas. La exactitud y la precisión analíticas suelen ser menores que un análisis de laboratorio, pero se eliminan errores por almacenamiento. Existe la posibilidad, con equipo apropiado, de monitoreo continuo en el campo, lo cual no es posible con análisis de laboratorio. El muestreo automático puede reducir errores humanos y costos

de trabajo, proveer muestras de manera más frecuente, y es usado más hoy en día [11].

El costo de instrumentos comerciales es una barrera significativa para establecer grandes redes de monitoreo aún para programas de investigación bien financiados. Actualmente diversos grupos están trabajando para crear alternativas de menor costo con microcontroladores Arduino [12], pero muchos de estos proyectos presentan distintos problemas, algunas sondas de bajo costo sólo monitorean parámetros físicos del agua, otras realizan mediciones de las propiedades electroquímicas del agua, pero no llevan un registro de datos, requieren de redes de transmisión con protocolos inalámbricos haciendo necesario equipo adicional a la sonda y otras reúnen las características mencionadas a un alto costo.

2. CONTENIDO

El desarrollo del sistema incluye al módulo que almacena y fechar los valores de las variables de temperatura, presión y conductividad de cuerpos de agua, para su posterior análisis de valores, estos históricos muestran.

Diseño eléctrico

La conductividad eléctrica de una disolución es la aptitud que permite el flujo de corriente eléctrica, y su magnitud depende, del voltaje aplicado, de la movilidad de los iones presentes y de la viscosidad del medio en el que estos han de moverse. Al ser el medio agua, su viscosidad disminuye con el incremento de la temperatura, la facilidad del flujo iónico o conductividad aumenta proporcionalmente con el incremento de la temperatura [15]. Este parámetro es un importante indicativo de la calidad del agua corriente. Cada corriente de agua presenta un rango de conductividad relativamente constante, el cual una vez determinado puede ser considerado como base para comparar medidas regulares de conductividad. Cambios significativos en este parámetro pueden ser indicadores de descargas o que otro tipo de fuente de contaminación ha ingresado en la corriente [11, 13].

Para medir la conductividad se utiliza el sensor de DFRobot con constante de celda de $K=0.98 \text{ cm}^{-1}$, utilizado para monitorear agua. En la figura 1 se muestra el rango de operación de diversos electrodos según su constante de celda. El instrumento consta de una sonda, fuente de corriente alterna para reducir la polarización y una placa que provee una señal de salida analógica filtrada, con valores desde 0 V hasta 5 V.

El valor de la constante de celda (K) se obtiene de la división del valor de la distancia entre las terminales del electrodo (l) y el área de superficie del electrodo (A) como se presenta en la ecuación 1:

$$K = \frac{l}{A} \quad (1)$$

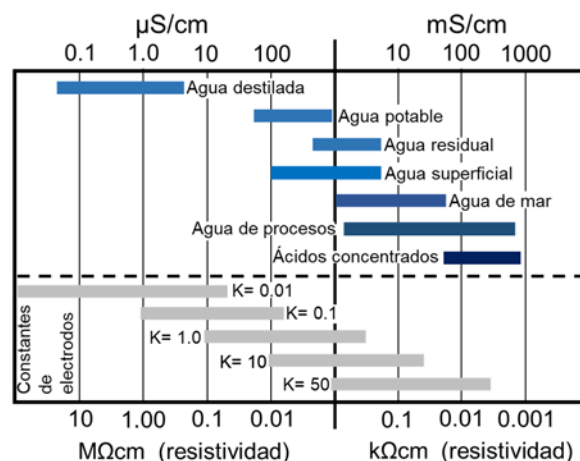


Figura 1 Rangos de conductividad según las condiciones del agua.

La conductividad electrolítica es sensible a cambios de temperatura de la solución [12, 14].

En la sonda se usa el sensor digital de temperatura DS18B20, que utiliza el protocolo 1-Wire que con un pin de datos permite conectar más de un sensor al mismo canal, el sensor de encapsulado TO-92 está insertado en un tubo de acero inoxidable, opera de -55°C a 125°C , su resolución es programable, de 9 hasta 12 bits [13-16].

La presión es otra de las variables físicas relacionada a cambios en la conductividad es la profundidad a la que registra el dato. El sensor MS5803-14BA tiene una exactitud de $\pm 20 \text{ mbar}$ y una resolución de 24 bits en lecturas de presión de 0 a 6 bar [17-19].

Los requerimientos de la unidad de proceso central los puede cubrir la tarjeta electrónica Arduino Uno.

Para realizar la función de almacenamiento de datos de censado, geoposición, fecha y hora se integra el módulo datalogger, y se comunica mediante un Bus Serial Peripheral Interface.

El sensor de calidad del aire MQ-135, realiza lecturas y detecta la presencia de varios tipos de gases suspendidos en el aire. Su función la realizan cuando un elemento del sensor incrementa su temperatura modificando su conductividad en función de la concentración de los distintos gases del exterior.

Integración eléctrica

A partir de los requerimientos mencionados y las características de los componentes se definieron las conexiones de comunicación de cada uno de los sensores y módulos a la tarjeta de adquisición. La sonda de medición de conductividad eléctrica se alimenta con 5 V y envía una señal analógica recibida por el conector A1 de la placa Arduino Uno. El módulo de sensor de presión recibe 3.3 V y se conecta a Arduino mediante la interfaz de comunicación I2C. El sensor de temperatura DS18B20 solo requiere un pin para lo que se destina el segundo conector digital. El módulo de almacenamiento utiliza el protocolo SPI. En la figura 2 se muestran los dispositivos utilizados.

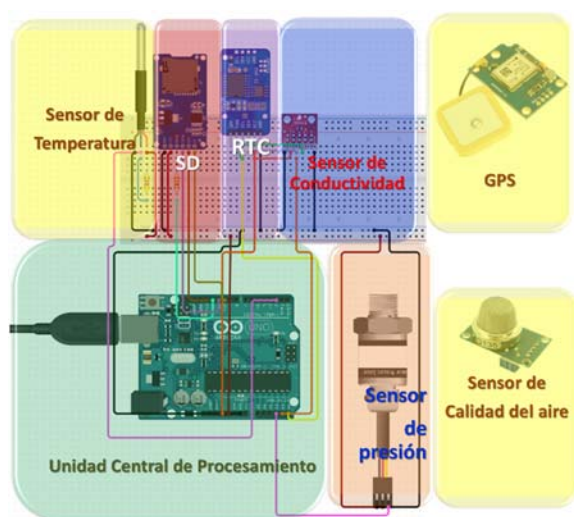


Figura 2. Sonda con sus módulos.

Programación

La sonda debe ser capaz de sumergirse para medir la calidad del agua y requiere seguridad suficiente para protegerse de fallos debido a filtraciones de líquido. En caso de que se reconozca alguna lectura de error, como cuando dejen de registrar lecturas los sensores, la tarjeta de adquisición se protege cerrando los puertos de comunicación, registrando las lecturas y almacenando el error en el módulo. Finalmente se comunica al usuario el estado de fallo con un indicador luminoso. El flujo de instrucciones de programa se expone en la figura 4.

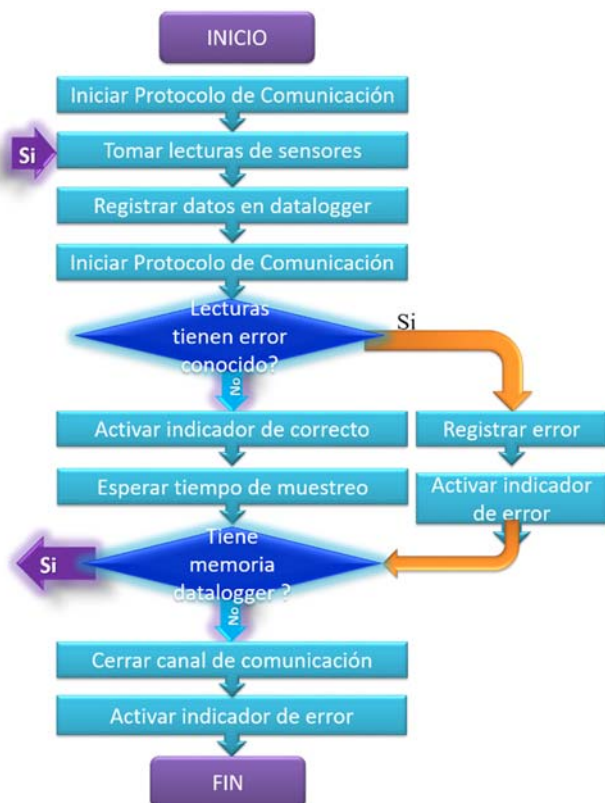


Figura 4 Diagrama de flujo.

En caso de que no se reconozca alguna lectura errónea se enciende un indicador que indique buen estado y las medidas se registran en el módulo de memoria mientras tenga espacio de memoria disponible.

La sonda realizada en este proyecto requiere que los sensores comiencen el registro de conductividad, temperatura y presión en cuanto el usuario lo necesite sin alguna tarea de preparación previa, así que el código provisto junto con su librería es modificado para permitir calibración en cualquier momento, además de almacenar las fechas y los valores de constante de celda adquiridos durante el proceso.

Calibración

Para mantener el sistema calibrado es recomendable limpiar las placas del electrodo con agua desionizada después de utilizarlo, luego se sumerge en un recipiente de plástico con una solución estándar de calibración, con temperatura de 25 °C, si no es posible hacer la calibración a esa temperatura el sistema tiene la capacidad de hacer la corrección, midiendo la temperatura de la solución. Con esos datos se calcula la constante de celda, que será almacenada y utilizada en las nuevas lecturas de conductividad.

Elaboración de la estructura

Para construir el prototipo se prefirió utilizar tubería de PVC, se requieren 3 partes de tubería de 4 pulgadas de diámetro: un tubo de 6 pulgadas de longitud y dos tapas, de las cuales una tiene rosca. La ventaja principal de utilizar una tapa con rosca es que se puede abrir y cerrar fácilmente el dispositivo, así las tareas de cambiar la tarjeta de almacenamiento, batería, o hacer modificaciones son más sencillas. Las dimensiones de la sonda son de 24 cm de altura y 12 cm de diámetro. Es preferible que la estructura tenga el mínimo volumen para disminuir el empuje del agua, pero que sea suficiente para poder manipular los elementos dentro de ella o agregar nuevos módulos y sensores. El peso necesario para que la sonda se hunda debe ser suficiente para vencer la fuerza de empuje, basado en el principio de Arquímedes, donde la fuerza de empuje (E) está en función de la densidad del fluido (ρ), la constante de gravedad (g) y el volumen del cuerpo sumergido (V) expresándose como:

$$E = \rho g V \quad (2)$$

Siendo la fuerza de empuje de 26.61 Newtons, se requiere una masa de 2.71 kilogramos para hundir completamente el instrumento. El modelo base presentado es la estructura principal. Cada uno de los sensores será rodeado por un tubo de PVC con diámetro suficiente solo para cubrir las nuevas protuberancias, el orificio que se haga para acomodar el sensor se sellará con resina epóxica y luego un sellador como adhesivos resistentes al agua marina o epoxi líquido. La estructura se muestra en la figura 5.

Para la etapa de pruebas se le adaptaron a la sonda placas metálicas para hundirla en un contenedor de agua con metro de profundidad. A diferencia de las primeras pruebas hechas para asegurar que el sistema no tendría filtraciones, en estas

se pusieron los circuitos dentro de la estructura, funcionando simultáneamente. La sonda tomó las medidas de conductividad, presión y temperatura por un día, en intervalos de cuatro segundos y almacenó la información en la tarjeta SD. En la figura 6 se muestra el proceso.



Figura 2 Pruebas al prototipo.

Cuando se necesite extraer los datos almacenados del sistema solo se requiere abrir la sonda y retirar la tarjeta SD del módulo datalogger. La información es encontrada en un archivo de texto que puede abrir directamente en una hoja de cálculo. Para sustituir la tarjeta se debe apagar el sistema, insertar la nueva tarjeta y encenderlo nuevamente. Es preferible que la nueva tarjeta no contenga archivos. Se comparan las mediciones de conductividad y temperatura de un instrumento de monitoreo de calidad de agua potable marca GlowGeek, su precio es de 15 dólares y puede ser comprado en línea. Las medidas presentadas en las figuras 7 y 8 se realizaron simultáneamente en una solución de calibración de 1.413 ms/cm. Todas las gráficas presentadas a continuación presentan en color azul las lecturas de los sensores del sistema propuesto.

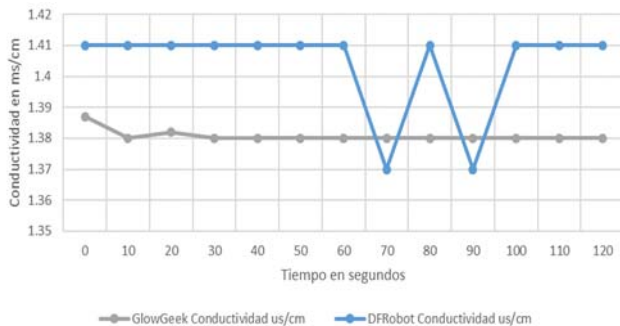


Figura 3 Comparación de lecturas de conductividad.

Ambos dispositivos se sumergieron en la solución a partir del segundo 0, fueron registradas las lecturas cada 10 segundos durante dos minutos. A excepción de las medidas en los segundos 70 y 90 la señal del sistema se mantuvo estable, las

comparaciones se hacen por 120 segundos porque la sonda comercial se apaga automáticamente después de ese intervalo. Ambos dispositivos estaban fuera del agua hasta que se empiezan a registrar las lecturas. En la figura 8 Se aprecia que la temperatura del sensor DS18B20 se mantuvo por más tiempo en equilibrio.

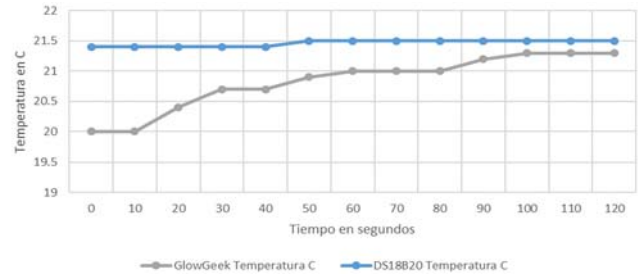


Figura 4 Comparación de lecturas de temperatura.

En la figura 9 se muestran las medidas de temperatura tomadas por ambos dispositivos fuera del agua.

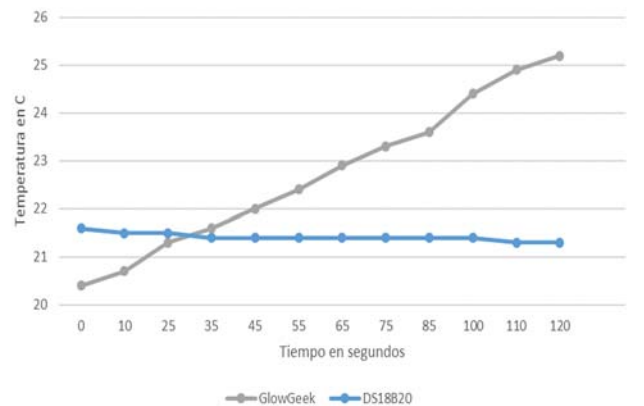


Figura 5 Comparación de lecturas de temperatura fuera del agua.

El sensor de temperatura en la sonda comercial empieza a calentarse cuando el sistema se enciende fuera del agua, y continúa de manera indefinida, mientras que el sistema propuesto registra la temperatura del ambiente sin problemas. La sonda se sumergió a un metro de profundidad dentro de un contenedor lleno de agua, desde las 21:20 horas hasta las 5:40 del siguiente día. Las lecturas registradas se presentan en la figura 10.

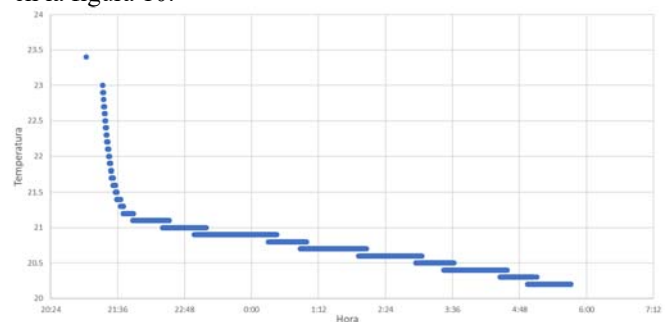


Figura 6 Comportamiento de la temperatura a diferentes horas.

El sistema desarrollado es suficientemente sensible para registrar las fluctuaciones de temperatura a diferentes horas, y puede registrar la temperatura, presión y conductividad continuamente. En la tabla 2 se presenta una comparación entre dos proyectos realizados para medir la calidad del agua en la que se consideran el costo y las capacidades de los sistemas [19, 20]. Los parámetros comparados son potencial de hidrógeno (pH), luz, temperatura (T), oxígeno disuelto (OD), conductividad eléctrica (CE), potencial de reducción (ORP), turbidez (Tur), presión (P) y total de sólidos disueltos (TDS). Se marcan con una X las características que tiene cada sistema y su costo es en dólares. Cabe destacar que los prototipos con los que se comparan los resultados de este proyecto no tienen la capacidad de sumergirse completamente en el agua, ni memoria expandible, pero cuentan con comunicación inalámbrica.

3. CONCLUSIONES.

La lectura de campo, mostro incrementos en los valores de los sensores cada 2 km. Los sensores más delicados se degradan rápidamente al estar expuestos de forma continua a los flujos de agua. A mayor profundidad el sistema presentaba filtraciones y esto inducía errores. El dispositivo comercial no permitió el levantamiento de mediciones continuas, porque no es suficientemente robusto para mantenerse funcionando debajo del agua, no registra las lecturas, se apaga después de dos minutos de haberlo activado.

Si la sonda de prueba se activa cuando está expuesta fuera del agua presenta un incremento en la temperatura y ello induce variaciones en las primeras lecturas, la sonda propuesta no tiene estos problemas y además ofrece flexibilidad, pudiendo operar solo o en grandes redes de monitoreo al agregar nuevos sensores y módulos de comunicación. A comparación de los otros sistemas, el propuesto tiene memoria, haciendo el sistema flexible e independiente, ya que no requiere un sistema de comunicación u otros dispositivos externos para funcionar. El sensor de temperatura DS18B20 mantiene su temperatura muy cercana a la ambiental, mientras que medidores de calidad del agua comerciales, como el que fue comparado, requieren más tiempo para lograr lecturas estables. El sistema consume 20 mA por cuatro segundos, mientras está en reposo, y mientras toma las lecturas y registra los datos sobre la memoria del sistema, proceso que puede durar hasta medio segundo, consume 80 mA. El consumo de corriente sería menor si se quitan los diodos emisores de luz de las tarjetas electrónicas, y se podría reducir aún más agregando un circuito para interrumpir el paso de corriente hacia los circuitos que no son de la tarjeta electrónica Arduino. Finalmente podría reducirse mucho más la corriente retirando el microcontrolador de la tarjeta electrónica y agregándole componentes como reguladores de voltaje más eficientes. Los sensores utilizados poseen circuitos integrados que facilitan la comunicación con tarjetas de desarrollo, implementan correcciones instantáneas en las lecturas y registran errores. 5. Conclusiones Almacenar y fechar los valores de las variables de temperatura, presión y conductividad de cuerpos de agua, representa una herramienta útil a nivel multidisciplinar debido a que esta información es esencial en para obtener

información valiosa que pueda identificar el horario de descargas, el momento en que se presentan las condiciones idóneas para el crecimiento de microorganismos. Esta es la principal virtud de este sistema. Por lo que respecta a la implementación de la sonda en el campo contempla un tratamiento de los circuitos y los módulos, debido a que los materiales son susceptibles a sufrir corrosión, lo que alteraría las lecturas de los parámetros. Primeramente, se registraron lecturas en un lago a un metro de profundidad, posteriormente se contempla registrar los parámetros de calidad del agua a 10 y 20 metros de profundidad para identificar algún mal funcionamiento y corregirlo en el rediseño. La memoria ampliable de alta capacidad puede almacenar la información de mediciones realizadas, permitiendo la implementación de la sonda debajo del agua para monitoreo automático y el análisis de datos posterior al registro de lecturas. En el precio del proyecto, 104.56 de los 147.82 dólares, que equivalen a 70.73% del costo total, se utilizaron para la adquisición de sensores, entonces se requieren 43.26 dólares para las partes principales de cada sonda, y el costo adicional dependerá de los sensores que se utilicen. Gran parte del ahorro en el proyecto está en las adquisiciones, los sensores utilizados se aislaron con adhesivos y la estructura, para no comprar costosos conjuntos de instrumentación. Aunque los últimos dos proyectos con los que se compara esta sonda miden otras variables importantes para determinar la calidad del agua, se estima que los costos para adaptar un sistema similar no superarían los 500 dólares. Y aunque sea bueno medir más parámetros se debe considerar para grandes redes de monitoreo que no se requieren todos ellos, es preferible adquirir solo los sensores esenciales y en caso de que se requieran análisis más especializados sería mejor examinar las muestras en un laboratorio. La sonda realizada en este proyecto tiene mayor exactitud y precisión en las medidas de conductividad y temperatura, además que no tiene problemas al estar fuera del agua, mientras que el instrumento comercial presenta problemas, como apagarse mientras se registran las lecturas si supera el tiempo de uso de dos minutos o el indefinido incremento de temperatura al estar fuera de un medio acuoso. La tarjeta electrónica utilizada facilita la integración de módulos de comunicación y diferentes sensores, haciendo al sistema fácilmente adaptable, portátil y funciona adecuadamente con baterías de 5 a 14 Voltios.

4. REFERENCIAS

- [1] Organización de las Naciones Unidas (2018). Water and Climate Change. Obtenido de Naciones Unidas: <https://www.un.org/es/sections/issues-depth/water/index.html>.
- [2] International Conference on Water and the Environment (1992). THE DUBLIN STATEMENT ON WATER AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT. Obtenido de <http://www.wmo.int/pages/prog/hwrp/documents/english/icwedece.html>.
- [3] Fondo para la contaminación y la educación ambiental, A. C. Contaminación en México (2016). Obtenido de Agua.org.mx: <https://agua.org.mx/agua->

- contaminacion-en-mexico/#aguas-residuales-y-contaminacion.
- [4] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2011). Estadísticas del agua en México, edición 2011. D. F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- [5] Fondo para la comunicación y la educación ambiental, A. C. (s.f.) QUIÉNES SOMOS. Obtenido de Agua.org.mx.
- [6] Marek Sowinski & Anna Neugebauer (2007) Calibration of water-quality model “Woda” – case study of the Warta River, Journal of Environmental Engineering and Landscape Management, 15:2, 93-98
- [7] United Nations Environment Programme and the World Health Organization (1996). Water Quality Monitoring - A Practical Guide to the Design and Implementation of Freshwater Quality Studies and Monitoring Programmes. UNEP/WHO.
- [8] Reeve, R. Introduction to Environmental Analysis (2002). Chichester: John Wiley & Sons, Ltd.
- [9] Schöning, M., Glück, O., & Thust, M (1999). Composition Measurement. The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook, pág. 70.1.
- [10] Beddows, P., & Mallon, E. (2018). Cave Pearl Data Logger: A Flexible Arduino-Based Logging Platform for Long-Term Monitoring in Harsh Environments. Sensors 2018, 18, 530.
- [11] Office of Water (1997). Volunteer Stream Monitoring: A Methods Manual. United States Environmental Protection Agency.
- [12] Shreiner, R., & Pratt, K. (2004). Primary Standards and Standard Reference Materials for Electrolytic Conductivity. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology.
- [13] Naylamp Mechatronics. Naylamp Mechatronics (s.f.). Obtenido de Tutorial sensor digital de temperatura DS18B20: https://naylampmechatronics.com/blog/46_Tutorial-sensor-de-temperatura-DS18B20.html.
- [14] Maxim Integrated Products (2018), Inc. DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer. Maxim Integrated Products, Inc.
- [15] Alarcón, A. (1998). Fundamentos teóricos de la conductividad eléctrica. Horticultura Revista de Industria Distribución y Socioeconomía Hortícola, 97-98.
- [16] Donegal County Council Laboratory (2004). Wastewater Sampling Procedures. Donegal: Donegal County Council Laboratory.
- [17] Measurement SPECIALTIES (2012). MS5803-14BA Miniature 14 bar Module. measurement SPECIALTIES.
- [18] Rao, A., Marshall, S., Gubbi, J., Palaniswami, M., Sinnott, R., Pettigrovet, V. (2013). Design of low-cost autonomous water quality monitoring system. Proceedings of the 2013 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics, ICACCI 2013. 14-19. doi:10.1109/ICACCI.2013.6637139.
- [19] TE Connectivity Ltd (2015). MS5803-14BA Miniature 14 bar Module. TE Connectivity Ltd.
- [20] Zennaro, M., Floros, A., Dogan, G., Sun, T., Cao, Z., Huang, C., Bahader, M., Ntareme, H., Bagula, A. (2009). On the Design of a Water Quality Wireless Sensor Network (WQWSN): An Application to Water Quality Monitoring in Malawi. Proceedings of the International Conference on Parallel Processing Workshops. 330-336. 10.1109/ICPPW.2009.57.