

Sistema de monitoreo de la calidad del agua con orientación IoT

Mauro A. López M.
 Facultad de Ciencias de la Electrónica
 Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
 Puebla
 Puebla, México
 mauro.lopez@alumno.buap.mx

Richard Torrealba Meléndez
 Facultad de Ciencias de la Electrónica
 Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
 Puebla
 Puebla, México
 richard.torrealba@correo.buap.mx

Cesar A. Arriaga A.
 Facultad de Ciencias de la Electrónica
 Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
 Puebla
 Puebla, México
 cesarau.arriaga@correo.buap.mx

Resumen — El agua es uno de los recursos naturales fundamentales para la vida de las especies que habitan nuestro planeta, cuyo consumo depende de su disponibilidad y calidad en ríos, lagos y reservas. En el presente trabajo se desarrolló el prototipo de una terminal estática equipada con sensores para obtener lecturas del PH, turbidez, temperatura y total de sólidos disueltos, y así determinar la calidad del agua de una laguna dentro de ciudad universitaria en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP). El monitoreo se llevó a cabo en tiempo real durante una hora, se utilizó el IoT para enviar los parámetros medidos a un servidor para su posterior visualización e interpretación en una interfaz gráfica, así como su respectiva gestión en una base de datos. Los resultados obtenidos fueron comparados con lecturas captadas con herramientas dedicadas a la medición de estos parámetros.

Palabras clave — PH, turbidez, TDS, temperatura, calidad, IoT, agua, monitoreo.

I. INTRODUCCIÓN

El agua es un elemento esencial para la supervivencia y prosperidad de la humanidad y la vida en la Tierra, lo que ha llevado a los expertos a iniciar investigaciones para preservar y gestionar su calidad [1]. Siguiendo con esta tendencia, se ha adoptado un enfoque tecnológico en las investigaciones para diseñar y desarrollar sistemas que puedan detectar, medir y supervisar la calidad del agua de forma remota [2, 3].

Actualmente, el Internet de las Cosas (IoT por sus siglas en inglés) es una innovación tecnológica muy avanzada, ya que está presente en todo el mundo y puede utilizarse en diversos campos para recoger, supervisar y analizar datos de forma remota [4]. La calidad del agua es crucial para garantizar la salud y el desarrollo de las especies que la habitan. En particular, parámetros como la temperatura y el pH pueden afectar al metabolismo y a la termorregulación, lo que puede provocar enfermedades o incluso la muerte [5]. Por lo tanto, es importante supervisar los cuerpos de agua y tratarlos de forma adecuada para alcanzar los parámetros óptimos, ya sea para la cría de peces, su uso en el sector agrícola o su consumo por parte de humanos y especies animales [6, 7].

Por lo anterior, en este artículo se presenta el desarrollo e implementación de una terminal estática equipada con sensores de PH, turbidez, temperatura y total de sólidos disueltos (TDS por sus siglas en inglés), para monitorear la calidad del agua. Dicho dispositivo se encarga de tomar muestras de manera periódica para posteriormente mandar los parámetros medidos a un servidor utilizando el IoT logrando así la recepción y procesamiento de estos utilizando una

interfaz gráfica para una mejor visualización e interpretación, así como su gestión en una base de datos.

II. ARQUITECTURA DEL SISTEMA

El Sistema de monitoreo de la calidad del agua desarrollado consta de 3 partes fundamentales, la etapa de sensado, la comunicación y la gestión de datos. A continuación, en la Fig. 1 se explica cada uno de los apartados.

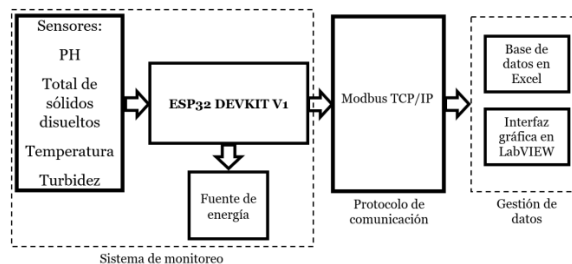


Fig. 1 Bloques que componen el sistema de monitoreo de la calidad del agua. Autoría propia.

A. Etapa de sensado

La etapa de sensado consta de un sistema basado en microcontrolador que equipa cuatro sensores, tres de ellos con salida analógica correspondientes a PH, TDS y turbidez, y uno con salida basada en el protocolo One Wire [8]. Cada uno de ellos fue caracterizado para conocer su comportamiento, además, se realizó el debido acondicionamiento para limitar la salida de cada sensor al valor máximo del convertidor analógico digital de la tarjeta ESP WROOM-32.

Para caracterizar el sensor de PH (PH-4502C) se utilizaron soluciones especializadas con valores fijos de 4.01, 6.86 y 9.18 unidades de PH a una temperatura ambiente controlada de 25°C, en un laboratorio de la Facultad de Ciencias Químicas de la BUAP, con lo cual se obtuvo la curva característica de la Fig. 3 que demuestra el comportamiento lineal del dispositivo, cuya ecuación se describe en (1). Es importante mencionar que existen variaciones de PH respecto a la temperatura, las cuales se muestran en la Fig. 2, que corresponden al buffer de referencia de 4.01, se puede ver que hay una variación de 0.02 unidades de PH hasta alcanzar los 40°C respecto a la temperatura de calibración de 25°C.

°C	PH
10	4.00
20	4.00
25	4.01
40	4.03

Fig. 2 Tabla de variación de PH con la temperatura extraída de [9].

$$y_{PH} = -12.925x + 34.1252 \quad (1)$$

Por otro lado, el sensor para determinar la turbidez del agua (TSW20M-20230213) fue calibrado utilizando soluciones con diferentes concentraciones de sales y compuestos preparados específicamente para tener niveles de turbidez particulares. De esta manera, se obtuvo la curva característica de la Fig. 4 que muestra el comportamiento del sensor respecto a los niveles de turbidez medidos en NTU [10], y cuya ecuación se presenta en (2).

$$y_{NTU} = -2287.6764x^2 + 5384.9164x \quad (2)$$

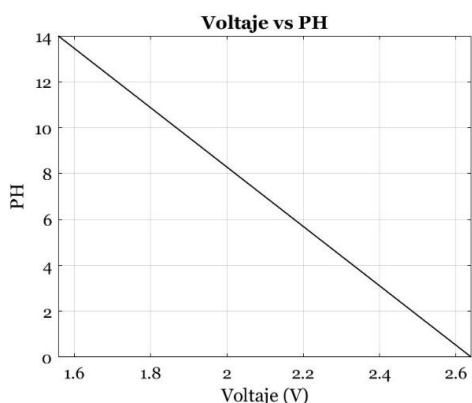


Fig. 3 Curva característica del sensor de PH. Autoría propia.

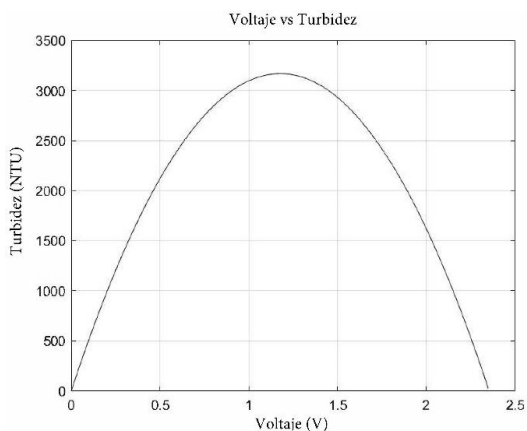


Fig. 4 Curva característica del sensor de turbidez. Autoría propia.

Es importante mencionar que en la Fig. 4 se muestra una función de segundo grado, sin embargo, las variaciones de voltaje que provee el sensor van de 1.5V a 2.35V, por lo que en la etapa de gestión de datos se hace uso de la programación para evitar resultados erróneos en las lecturas.

Posteriormente se muestra en la Fig. 5 la curva característica del comportamiento del sensor de total de sólidos disueltos (CQRADS1115), en donde se muestra cómo aumenta la concentración de sólidos medidos en partes por millón (ppm) [11], en función con el voltaje. En la ecuación (3) se muestra la función que describe la curva de este sensor.

$$y_{TDS} = 266.84x^3 - 511.72x^2 + 1750.78x \quad (3)$$

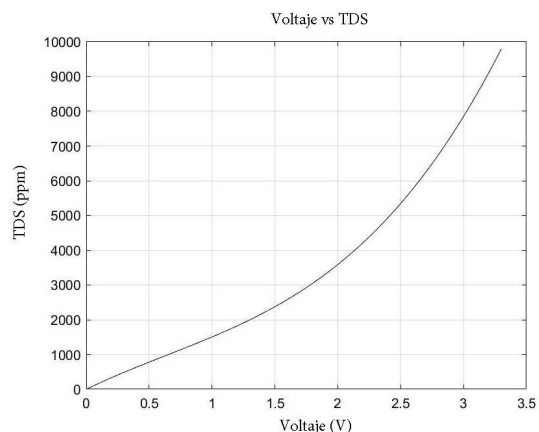


Fig. 5 Curva característica del sensor de TDS. Autoría propia.

Respecto al sensor de temperatura (DS18B20), se utilizó el protocolo One Wire, con el que se obtuvo la temperatura en grados centígrados. Para este sensor se utilizó una resistencia pull up para lograr un correcto funcionamiento según sus especificaciones.

Para los sensores de PH y turbidez se obtiene salidas analógicas de entre 0V y 5V, por lo que se incorporó una ganancia basada en un arreglo resistivo para obtener valores máximos de 3.3V.

Una vez calibrados todos los sensores, se desarrolló un programa utilizando el microcontrolador para tomar las lecturas de los parámetros correspondientes en el entorno de medición, en este caso en la laguna ubicada dentro de ciudad universitaria en la BUAP.

B. Comunicación

Una vez listo el sistema que toma lecturas de los parámetros que determinan la calidad del agua, se integra el uso del protocolo de comunicación inalámbrica Modbus TCP/IP [12, 13]. De esta manera, las lecturas de cada uno de los parámetros medidos son recibidos por los pines seleccionados del microcontrolador, pasan por el convertidor analógico digital, son almacenados en variables temporales, y posteriormente se envían a un servidor local.

Para la creación del servidor se utiliza OPC Server [14], con el que se define el canal de comunicación vinculado a la red de internet al que se encuentra conectada la PC. También se define la dirección IP asignada al sistema basado en microcontrolador para recibir los datos deseados.

El siguiente paso es generar etiquetas relacionadas a cada parámetro con el fin de tener variables independientes para cada lectura recibida desde el microcontrolador, esto con el fin de facilitar la gestión de datos, lo cual será explicado en la siguiente sección. Además, se define el tipo de dato, la dirección de registro, así como los permisos de lectura o escritura para cada etiqueta, en este caso, el tipo seleccionado para cada una es WORD con permiso de sólo lectura y con números de registro del 300001 al 300005. En Fig. 6 se muestra el canal de conexión totalmente configurado y listo para enlazarse con el sistema y recibir los datos monitoreados.

Una vez creado el canal de comunicación, definida la IP correspondiente al sistema de monitoreo, y generadas las etiquetas para cada parámetro, se pone en marcha el servidor para comprobar la conexión y verificar los datos recibidos. En la Fig. 6 Canal de conexión del servidor local en OPC Server. se muestra el servidor corriendo y las lecturas enviadas desde el microcontrolador.

Tag Name	Address	Data Type	Scan Rate	Scaling	Description
PH	300001	Word	100	None	MEDICIÓN DE PH
TEM	300004	Word	100	None	TEMPERATURA PARTE ENTERA.
TEM_N	300005	Word	100	None	TEMPERATURA PARTE DECIMAL.
TSD	300003	Word	100	None	MEDICIÓN DE TDS
TUR	300002	Word	100	None	MEDICIÓN DE TURBIDEAD

Fig. 6 Canal de conexión del servidor local en OPC Server. Autoría propia.

Item ID	Data Type	Value	Timestamp	Quality	Update Count
Conexion ESP32_Monitoreo_Agua.TUR	Word	428	14:01:21.477	Good	46
Conexion ESP32_Monitoreo_Agua.TSD	Word	358	14:01:21.477	Good	20
Conexion ESP32_Monitoreo_Agua.TEM_N	Word	93	14:01:21.477	Good	27
Conexion ESP32_Monitoreo_Agua.TEM	Word	24	14:01:19.021	Good	10
Conexion ESP32_Monitoreo_Agua.PH	Word	1936	14:01:21.477	Good	46

Fig. 7 Servidor corriendo con la conexión establecida con el sistema de monitoreo. Autoría propia.

Como se puede observar en la Fig. 7 los valores recibidos para las variables de PH, turbidez y total de sólidos disueltos corresponde a las lecturas digitalizadas de los sensores que pueden tomar valores entre 0 y 4096, donde 0 corresponde a 0V y 4096 a 3.3V por ser el máximo valor aceptado por el ADC de 12 bits incorporado en el microcontrolador. Por otro lado, se tiene a la temperatura cuyos datos recibidos corresponden a su parte entera y decimal.

C. Gestión de datos

La gestión de datos se lleva a cabo utilizando LabVIEW® [15], en donde se definen variables para cada etiqueta generada en el servidor para después vincularlas entre sí. Es importante mencionar que gracias a la creación de etiquetas independientes, los datos recibidos pueden almacenarse y manipularse más fácilmente pues no es necesario agregar algoritmos adicionales para identificar a qué parámetro

pertenece cada dato recibido. En la Fig. 10 se muestra el panel frontal de la interfaz gráfica que consiste en una ventana con 4 pestañas para navegar entre cada uno de los parámetros medidos y poder visualizar la evolución en tiempo real de la curva generada tras la obtención y manipulación de los datos que envía el sistema basado en microcontrolador.

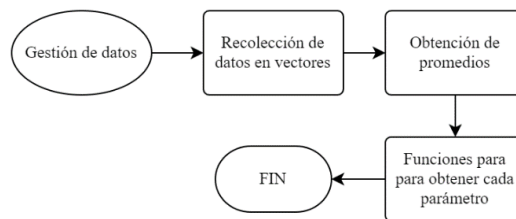


Fig. 8 Diagrama de flujo para el tratamiento de los datos dentro de la interfaz gráfica. Autoría propia.

Para entender mejor qué pasa con la gestión de datos detrás de la interfaz gráfica se muestra el diagrama de flujo de la Fig. 8, en donde se aprecian las etapas de recolección y ajuste de los datos recibidos. Adicionalmente, se muestra el diagrama de la Fig. 9 en donde se puede apreciar el funcionamiento completo de la interfaz.

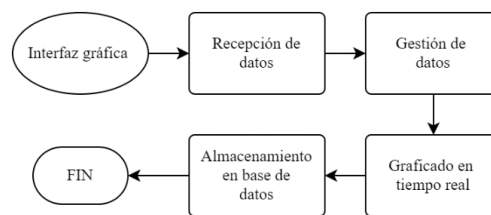


Fig. 9 Diagrama con todas las etapas que componen la interfaz gráfica desarrollada. Autoría propia.

Como se puede apreciar en el diagrama de la Fig. 9, la interfaz gráfica tiene la capacidad de generar una base de datos ubicada en la nube al mismo tiempo que se monitorean los parámetros del cuerpo de agua. De esta manera, se puede realizar la consulta de los datos recabados en cualquier momento, además de que es posible generar gráficas con intervalos definidos en función del día y/u hora de captura de datos.

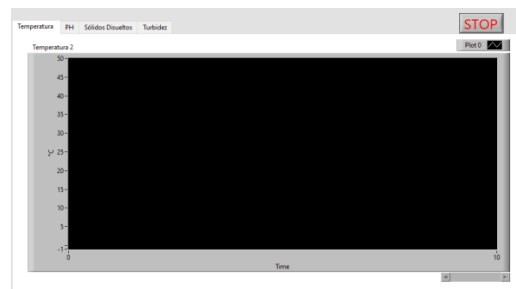


Fig. 10 Panel frontal desarrollado para el monitoreo en tiempo real. Autoría propia.

III. EXPERIMENTACIÓN

Con la arquitectura lista y funcionando correctamente, se procedió a realizar pruebas en un cuerpo de agua, en este caso en la laguna pública de ciudad universitaria de la BUAP, en donde habitan algunas especies animales tales como patos, garzas, tortugas y peces, además de contar con árboles y arbustos a los alrededores, así como algunos islotes.

Antes de colocar la terminal estática y ponerla en funcionamiento se verificó la cobertura de internet de la zona, en donde se encontró que la orilla Este cuenta con la mejor intensidad de internet. Por lo tanto, en dicho lugar se instaló el sistema de monitoreo de la calidad del agua, utilizando hilo de cáñamo para su sujeción con un árbol. En la Fig. 11 se muestra el sistema instalado y funcionando.



Fig. 11 Sistema de monitoreo de la calidad del agua instalado en la orilla de la laguna dentro de ciudad universitaria en la BUAP. Autoría propia.

De esta manera, se realizó el monitoreo en tiempo real desde la interfaz gráfica desarrollada. Además, es importante mencionar que dicha visualización se llevó a cabo desde un dispositivo móvil gracias al uso de un escritorio remoto. En la Fig. 12 se muestra la visualización desde la aplicación móvil.

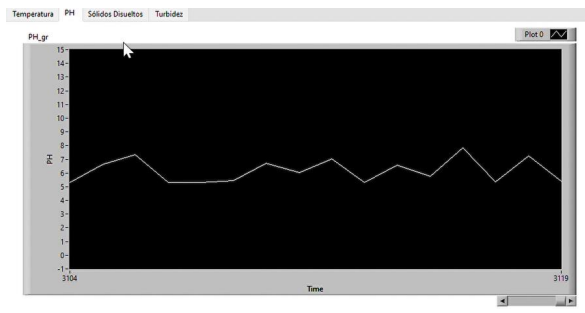


Fig. 12 Monitoreo en tiempo real del PH desde la interfaz gráfica desarrollada en LabVIEW. Autoría propia.

Durante el monitoreo también se tomaron medidas con herramientas dedicadas a la lectura de los parámetros que contiene el sistema desarrollado, esto con el fin de comparar y

verificar el correcto funcionamiento del prototipo construido. En la Fig. 13 se muestran los instrumentos utilizados para corroborar las lecturas obtenidas por el sistema desarrollado.



Fig. 13 Medición de parámetros con instrumentos dedicados. Autoría propia.

IV. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en el lapso de una hora, de 11:42am a 12:42pm, con el sistema de monitoreo de la calidad del agua basado en los parámetros de PH, turbidez y total de sólidos disueltos, respecto a la laguna en donde se instaló.

Como se mencionó anteriormente, el monitoreo en tiempo real se llevó a cabo utilizando la interfaz gráfica desarrollada en LabVIEW® la cual genera una hoja de cálculo para almacenar los datos recibidos, de esta manera se pueden realizar consultas posteriores al momento de monitoreo. Además, la base de datos cuenta con macros que generan gráficas para cada parámetro monitoreado.

En la Fig. 14 se muestra la gráfica de la temperatura contra el tiempo, en donde se pueden observar variaciones que no sobrepasan los 2 °C, teniendo mínimos de 23.31 °C y máximos de 24.87 °C. Además, se presenta la curva de ajuste linealizada que muestra una tendencia de incremento en la temperatura en el rango de tiempo correspondiente a 1 hora de monitoreo.

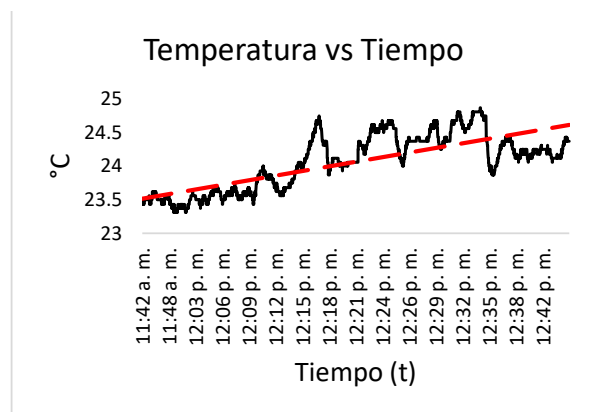


Fig. 14 Gráfica temperatura contra tiempo obtenida con la base de datos. Autoría propia.

Mientras tanto, en la Fig. 15 se presenta la gráfica que describe las lecturas obtenidas de PH respecto al tiempo. Se muestra un intervalo de tiempo de 3 minutos para lograr una mejor apreciación de la evolución de la curva, en donde se puede ver que existe una variación que no sobrepasa las 1.5 unidades de PH, con lo cual se tiene que dichas mediciones hacen sentido al ser comparadas con las lecturas realizadas con el potenciómetro digital, además de considerar el movimiento que hace que la concentración varíe en el cuerpo de agua. Otro punto importante es que se muestra la curva de ajuste lineal roja respecto al polígono obtenido en negro, denotando el incremento gradual manteniendo un promedio de 5.7 PH por lo que según la norma NOM-127-SSA1-2021 [16] se encuentra fuera de los límites permisibles los cuales corresponden al rango de 6.5 PH a 8.5 PH.

Por otro lado, en la Fig. 16 y en la Fig. 17 se muestra la gráfica del total de sólidos disueltos medidos en ppm contra el tiempo, y la turbidez medida en NTU contra el tiempo. En ellas se puede ver una relación directa ya que el total de sólidos disueltos implica que la turbidez aumente, es por eso por lo que se tienen gráficas parecidas en su evolución, pero con escalas diferentes pues 1 NTU es aproximadamente 3 ppm. Adicionalmente, se trazó una curva de ajuste lineal para ver la comparación respecto a los polígonos bosquejados por la interfaz, dando como resultado tendencias de incremento sin sobrepasar las 10 ppm para el TDS, así como una tendencia de la misma naturaleza que no sobrepasa las 25 NTU. Dicho lo anterior, y según [16] el agua posee propiedades que supera los límites permisibles para el consumo humano respecto a la turbidez, dejando al total de sólidos disueltos dentro del límite al no superar las 1000 ppm.

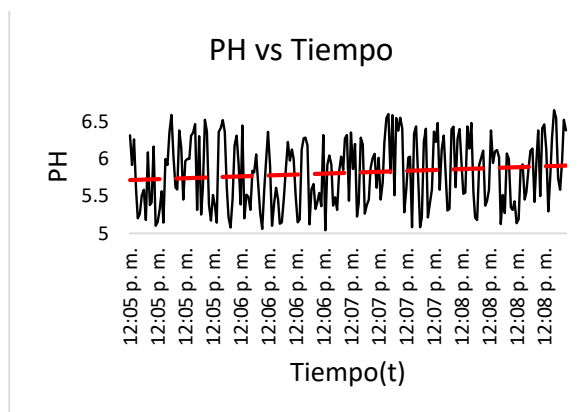


Fig. 15 Gráfica PH contra tiempo obtenida con la base de datos. Autoría propia.

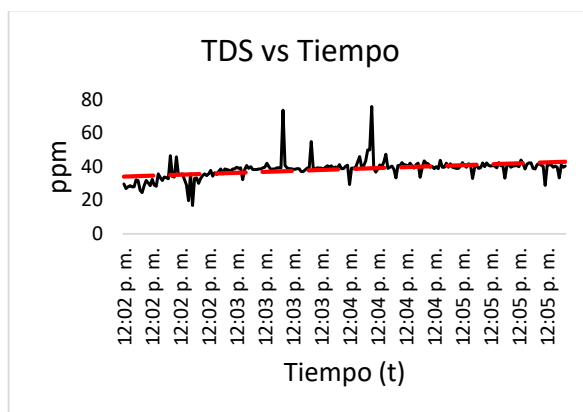


Fig. 16 Gráfica total de sólidos disueltos (ppm) contra tiempo obtenida con la base de datos. Autoría propia.

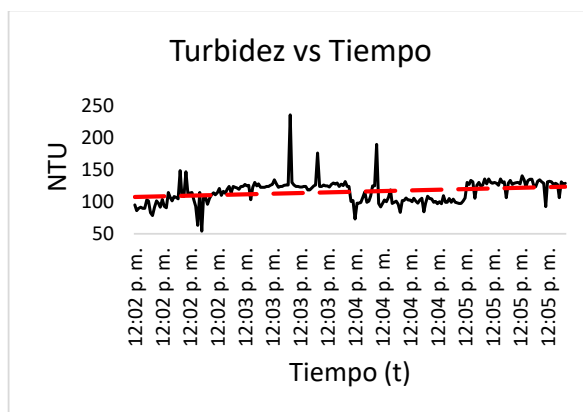


Fig. 17 Gráfica turbidez (NTU) contra tiempo obtenida con la base de datos. Autoría propia.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó el diseño e implementación de un sistema para monitorear la calidad del agua en la laguna de ciudad universitaria de la BUAP, el cual es capaz de medir 4 parámetros en tiempo real para lograr un monitoreo eficaz y así poder tomar acciones oportunas en caso de detectar mediciones fuera de los límites esperados o establecidos en [16].

El sistema desarrollado logró monitorear 4 parámetros en tiempo real, los cuales son el PH, temperatura, turbidez y total de sólidos, que corresponden a los más priorizados en el IoT en los últimos años. Las lecturas de dichos parámetros tienen fluctuaciones razonables debido al oleaje presente en la zona de prueba, los cuales no están presentes en instrumentos especializados ya que cuentan con la función de "HOLD" que retiene un valor medido, sin embargo, si se monitorea de manera continua, los resultados respecto a las gráficas obtenidas serían semejantes.

Las lecturas obtenidas con el sistema corresponden a las recabadas con los instrumentos dedicados a su medición por lo que se verificó su correcto funcionamiento y fiabilidad al momento de monitorear un cuerpo de agua, dejándolo como

una opción asequible que cuenta con el monitoreo de 5 parámetros y su integración con el IoT.

Gracias a la base de datos generada es posible realizar consultas posteriores a la etapa de monitoreo, así como generación de gráficas para cada parámetro, además resulta muy útil la utilización de macros para automatizar ciertas tareas, tanto de graficado, como de datos estadísticos tales como obtención de máximos, mínimos, promedios y ajustes lineales para los polígonos obtenidos.

El sistema resulta conveniente debido a su capacidad de operar de manera remota y gracias a su comunicación con el servidor, los datos pueden gestionarse de manera precisa sin comprometer el desempeño del sistema, ya que se tiene mayor demanda de recursos respecto a la programación dentro de la interfaz gráfica y no en el sistema basado en microcontrolador.

Como trabajo futuro se plantea el uso de más nodos estáticos para abarcar una mayor área del cuerpo de agua en donde se realicen las pruebas, además algunas mejoras en la interfaz gráfica pueden ser agregadas, tales como información adicional en cajas de texto respecto a los parámetros registrados o uso de códigos de colores para medir sus niveles normales o críticos. Adicionalmente, el uso de una terminal móvil podría ser un diferenciador importante para abarcar una mayor extensión en los cuerpos de agua a monitorear.

REFERENCIAS

- [1] G. M. Uddin, S. Nash and A. I. Olbert, "A review of water quality index models and their use for assessing surface water quality," *Ecological Indicators*, vol. 122, no. 107218, 2021.
- [2] R. Drasovean and G. Murariu, "Water Quality Parameters and Monitoring Soft Surface Water Quality Using Statistical Approaches," in *Promising Techniques for Wastewater Treatment and Water Quality Assessment*, United Kingdom, Intech Open, 2021, pp. 217-230.
- [3] M. A. Islam, R. H. Khan and M. Syeed, "A Smart and Integrated Surface Water Monitor System Architecture: Bangladesh Perspective," in *International Conference on Computing Advancements*, 2020.
- [4] M. S. U. Chowdury, T. B. Emran, S. Ghosh, A. Pathak, M. Alam, N. Absar, K. Andersson and M. S. Hossain, "IoT Based Real-time River Water Quality Monitoring System," *Procedia Computer Science*, vol. 155, pp. 161-168, 2019.
- [5] M. Syeed, M. S. Hossain, M. R. Karim, M. F. Uddin, M. Hasan and R. H. Khan, "Surface water quality profiling using the water quality index, pollution index and statistical methods: A critical review," *Environmental and Sustainability Indicators*, vol. 18, no. 100247, 2023.
- [6] P. J. Bresnahan, T. Wirth, T. Martz, K. Shipley, V. Rowley, C. Anderson and T. Grimm, "Equipping smart coasts with marine water quality IoT sensors," *Results in Engineering*, vol. 5, no. 100087, 2020.
- [7] B. Mu, Y. Dong, J. Qian, M. Wang, Y. Yang, M. A. Nikitina, L. Zhang and X. Xiao, "Hydrogel coating flexible pH sensor system for fish spoilage monitoring," *Materials Today Chemistry*, vol. 26, no. 101183, 2022.
- [8] "1-Wire Protocol," ARDUINO.CC, 19 Septiembre 2023. [Online]. Available: <https://docs.arduino.cc/learn/communication/one-wire>. [Accessed 2023 Septiembre 21].
- [9] "Golden Bell Reactivos," Productos químicos del sur S.A. de C.V., 2019. [Online]. Available: <https://www.maesacv.com.mx/Productos.php>. [Accessed 13 Septiembre 2023].
- [10] "¿Qué es la NTU?," Tecno Converting Engineering, 2018. [Online]. Available: <https://www.tecnoconverting.es/articulos-tecnicos/que-es-la-ntu/>. [Accessed 18 Septiembre 2023].
- [11] G. D. Christian, "OBJETIVOS ANALÍTICOS, O: LO QUE HACEN LOS QUÍMICOS ANALÍTICOS," in *Química Analítica*, México, McGraw Hill, 2009, pp. 1-11.
- [12] F. Shu, H. Lu and Y. Ding, "Novel Modbus Adaptation Method for IoT Gateway," in *IEEE 3rd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC 2019)*, 2019.
- [13] J. Wang, Z. Chen, G. Hou, H. Gao, P. Li, A. Gao and X. Wu, "A Modeling and Verification Method of Modbus TCP/IP Protocol," *Springer Nature Switzerland*, pp. 527-539, 2022.
- [14] "OPC Servers," National Instruments, 14 Mayo 2019. [Online]. Available: <https://www.ni.com/es/support/downloads/software-products/download.opc-servers.html#305861>. [Accessed 15 Septiembre 2023].
- [15] N. Instruments, 20 Abril 2023. [En línea]. Available: <https://www.ni.com/es-mx/support/downloads/software-products/download.labview.html#477380>.
- [16] "Detalle de la norma NOM-127-SSA1-2021," SINEC, 27 Abril 2023. [Online]. Available: <https://www.sinec.gob.mx/SINEC/Vista/Normalizacion/DetalleNorma.xhtml?pidn=VUM1Z0YzeXNjcWtxWkxBemVSZlZlVWp0QT09#:~:text=Detalle%20de%20la%20norma%20NOM-127-SSA1-2021%20Informaci%C3%B3n%20principal%20Comparar,DOF%3A%2002%2FMay%2F2022%20Fecha%20de%20entrada%20>. [Accessed 13 Septiembre 2023].