

RED DE MONITOREO DE CALIDAD DEL AGUA PARA UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO

Área técnica: Sistemas Digitales y Computación

José Ignacio Vega Luna, Gerardo Salgado Guzmán, Francisco Javier Sánchez Rangel, José Francisco Cosme Aceves.

Área de Sistemas Digitales, Departamento de Electrónica, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco.

Av. San Pablo 180, Col. Reynosa, C.P. 02200, Cd. de México.
vlji@azc.uam.mx

RESUMEN.

Se presenta el desarrollo de una red inalámbrica de bajo consumo de energía para monitorear la calidad del agua del sistema de enfriamiento de un centro de datos. La red está compuesta por tres estaciones de medida y un servidor web. Las estaciones están instaladas en los depósitos de agua del sistema de enfriamiento y están compuestas por un módulo Arduino MKR WAN 1310 y sensores de temperatura, PH, saturación de oxígeno y turbidez. Transmiten periódicamente a un servidor en la Internet los valores leídos desde los sensores. A través del servidor web puede visualizarse la medida de estos valores en la interfaz de usuario. Los resultados indicaron que el alcance de la red fue 6.545 kilómetros y el porcentaje de error de los sensores fue 1.05%, 2.11%, 0.52% y 0.51%, respectivamente.

Palabras Clave: Calidad del agua, pH, saturación de oxígeno, temperatura, turbidez.

ABSTRACT.

This paper presents the development of a low-power wireless network to monitor the water quality of a data center cooling system. The network is made up of three measuring stations and a web server. The stations are installed in the water tanks of the cooling system and are composed of an Arduino MKR WAN 1310 module and sensors for temperature, PH, oxygen saturation and turbidity. They periodically transmit the values read from the sensors to a server on the Internet. Through the web server, the measurement of these values can be viewed in the user interface. The results indicated that the range of the network was 6.545 kilometers and the error percentage of the sensors was 1.05%, 2.11%, 0.52% and 0.51%, respectively.

Keywords: Oxygen saturation, pH, temperature, turbidity, water quality.

1. INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de procesamiento de datos y aplicaciones orientadas a la Internet y comercio electrónico en los últimos años, así como los avances en la computación y electrónica, sobre todo en la pandemia, han causado el aumento en tamaño y cantidad de centros de procesamiento de datos (CPD). Esto ha traído como resultado el incremento en el consumo de energía eléctrica [1].

En los CPD, se genera calor proveniente de equipos de cómputo y telecomunicaciones de clientes y usuarios. Para regular la temperatura en los CPD existen sistemas de ventilación y enfriamiento que evitan contingencias en el

funcionamiento de los equipos para que trabajen de manera segura y confiable. Prácticamente toda la energía eléctrica requerida en un CPD se convierte en calor, el cual debe ser mitigado por un sistema de enfriamiento adecuado [2].

Sin embargo, se puede producir fuego en caso de falla de los sistemas de enfriamiento, corto circuitos o algún otro evento al interior del CPD. Para esto, los CPD cuentan con sistemas contra incendios que en primera instancia usan aspersores de un gas inerte para intentar apagar el fuego sin dañar los equipos y personas. En caso de que el gas inerte no pueda detener el fuego, se activan aspersores de agua como última medida [3-4]. Los sistemas de enfriamiento de los CPD usan millones de litros de agua al año la cual es reciclada en el mismo CPD ya que la temperatura que puede alcanzar podría afectar al medio ambiente, lo cual es parte de una serie de medidas en los llamados CPD Verdes [5].

El agua es uno de los recursos naturales esenciales tanto para la vida del ser humano como para la naturaleza, agricultura e industria. El estado del agua puede alterarse por diversas razones que modifican su condición natural. El monitoreo de la calidad del agua permite preservar el medio ambiente y determinar si es apta para su uso, ya sea potable, doméstico, industrial o para empleo en diferentes ecosistemas, entre otras aplicaciones. La calidad está determinada por la cantidad de concentraciones y límites de cantidades de diferentes parámetros químicos, biológicos y físicos indicados en normas gubernamentales establecidas de acuerdo con el proceso al que será destinada [6].

En cualquier ambiente, el monitoreo de la calidad del agua permite llevar a cabo acciones preventivas antes de su consumo y, en caso de contaminación, evitar enfermedades, fallas en dispositivos y deterioro del medio ambiente. Dependiendo del origen y uso que se dará al agua serán los parámetros que necesitan ser medidos y monitoreados para obtener la calidad deseada [7].

No es necesario que el agua usada tanto por los sistemas de enfriamiento como por los aspersores de un CPD sea potable ni de buena calidad. No debe ser residual pero sí de cierta calidad que cumpla con normas y estándares internacionales y del país. En el caso de México se usa comúnmente para este fin la norma PROY-NOM-202-SCFI-2017 [8]. A pesar de que puede medirse una cantidad importante de parámetros biológicos y

químicos para determinar la calidad del agua, casi todas estas normas especifican cuatro parámetros a medir para asegurar el correcto funcionamiento de los sistemas de enfriamiento y contra incendios y lograr la mejor tasa de intercambio de calor. Los parámetros son: la temperatura, el potencial de hidrógeno (pH), la saturación de oxígeno y la turbidez [9].

El valor de la temperatura del agua debe estar en el rango de 10 a 30 °C. El nivel de pH proporciona la acidez o alcalinidad del agua y es generada principalmente por la concentración de dióxido de carbono. Se mide en unidades de pH y en el caso del agua neutra su valor es 7. Un nivel de pH menor a 7 puede dañar tuberías metálicas. Valores de pH menores a 4 y mayores a 11 causan impactos negativos en el ambiente, por lo que en los CPD el nivel de pH del agua debe ser entre 7 y 9.5 unidades de pH.

El porcentaje de saturación de oxígeno del agua es importante para la vida de organismos acuáticos. Niveles mayores o iguales a 101% indican super saturación. Valores entre 90 y 100% se consideran excelentes, de 60 a 89% son adecuados y aceptables y niveles menores a 60% son pobres. La saturación de oxígeno depende del origen del agua, por ejemplo, las aguas superficiales presentan porcentajes cercanos al 100%, mientras que las aguas profundas presentan niveles bajos. En el caso del agua usada en los CPD el nivel de concentración de oxígeno debe estar en el rango de 80 a 100% [10].

La turbidez del agua es una característica importante en el agua. Es un indicador de contaminación causada por materia orgánica, microorganismos y elementos tóxicos. Entre mayor sea la turbidez del agua mayor es la probabilidad de contenido de bacterias y virus suspendidos, disminuyendo la efectividad de los procesos de desinfección. La turbidez del agua se puede medir en función de la cantidad de sólidos totales suspendidos, *TSS (Total Suspended Solids)*. La OMS indica que el nivel de turbidez del agua potable debe ser idealmente menor a 1.0 TSS y nunca pasar de 2 TSS [11]. El agua usada en los CPD debe presentar un nivel de turbidez no mayor a 1.2 TSS [12].

El objetivo del trabajo aquí presentado fue desarrollar una red de monitoreo remoto de la calidad del agua de los sistemas de enfriamiento y contra incendios de un CPD. La red transmite periódicamente los niveles de temperatura, pH, concentración de oxígeno y turbidez (TpHOT) del agua de los depósitos de almacenamiento del CPD a un servidor en la Internet. Mediante la interfaz de usuario se pueden visualizar, en tiempo real e históricamente, los niveles obtenidos. Debido a que la distancia entre el punto de acceso *WiFi* del CPD al depósito de agua más lejano es 175 metros, se utilizó tecnología de comunicación inalámbrica de largo alcance, *LoRa (Long Range)*, realizando con esto una red de área amplia de bajo consumo de energía, *Low Power Wide Area Network (LPWAN)*.

LoRa es una de las tecnologías recientes de comunicación inalámbrica usada en la realización de aplicaciones de Internet de las Cosas, *IoT (Internet Of Things)*. Se basa en la modulación por radiofrecuencia y fue desarrollada y está administrada por la *LoRa Alliance*. Las principales

características de esta tecnología son las siguientes: alta tolerancia a las interferencias, bajo consumo de energía, largo alcance, de 10 a 20 Kilómetros, velocidad de datos de 0.3 a 50 Kbps, conexión punto a punto y frecuencias de trabajo en la banda ISM, de 868 MHz en Europa, 915 MHz en América y 433 MHz en Asia [13]. *LoRa* está diseñada para entornos de largo alcance donde se requieran redes de sensores ubicados en puntos lejanos del acceso a la Internet. Debido a lo anterior, *LoRa* se ha convertido en una de tecnologías emergentes más empleadas en la creación de *LPWAN* [14].

Las *LPWAN* usan el protocolo de red *LoRaWAN*, basado en una arquitectura de estrella, compuesta por nodos y puertas de enlace. Los nodos son los dispositivos terminales que transmiten y reciben información de la puerta de enlace. Las puertas de enlace acceden la Internet a través de una conexión IP estándar. El protocolo estándar *LoRaWAN* realiza conexiones bidireccionales seguras mediante encriptación de extremo a extremo, permitiendo el acceso y soporte a una infinidad de sensores y equipos a través de redes *LoRaWAN* públicas y privadas en todo el mundo [15]. Esto es debido a que usan dos capas de seguridad, una para la red y otra para la aplicación. La primera sirve para autenticar el nodo y la segunda es la seguridad en la aplicación para garantizar que el operador de la *LoRaWAN* no tenga acceso a la información de la aplicación del usuario final [16]. Actualmente, existe una diversidad de módulos embebidos que integran transceptores *LoRa* para la creación de *LoRaWAN* usando *IoT* como el Arduino, Pycom y SX1276 ESP32, los cuales tienen alcance reducido sin antena o circuitería adicional y necesitan usar circuitos especiales para lograr la potencia de *LoRa*.

Haciendo una revisión en las investigaciones realizadas los últimos años referentes al tema del agua, se puede ver que los trabajos llevados a cabo se han enfocado a determinar la calidad del agua usada en diferentes aplicaciones y ambientes. Gran parte de ellos se han desarrollado en entornos urbanos para analizar la calidad del agua potable [17] y otros tantos han examinado el agua de ríos [18], lagos y ambientes marinos [19]. Las aplicaciones son variadas, entre las que se encuentran la conservación de la biodiversidad [20], la agricultura, la maricultura, la acuaponía [21], las plantas de tratamiento de agua [22] y el diseño de tanques de almacenamiento [23], entre otras [24].

La mayoría de las técnicas usadas miden los cuatro parámetros biológicos indicados anteriormente para determinar la cantidad de contaminantes orgánicos, metálicos y pesticidas [25]. Sin embargo, algunos estudios utilizan métodos y tecnologías distintas a las anteriores, entre las que se distinguen: la inteligencia artificial [26], redes neuronales [27], visión por computadora, imágenes satelitales [28], comunicación celular 3G [29], *IoT* [30], arreglos de sensores de microondas para determinar los contaminantes en el agua de acuerdo a las propiedades dieléctricas del agua [31], redes de sensores inalámbricos [32-33], vehículos aéreos, robots submarinos [34], vehículos recolectores autónomos [35], sensores de papel

basados en los colores que producen las reacciones químicas de los contaminantes [36], así como microcontroladores, comunicación *ZigBee* [37] y radio frecuencia [38].

No se ha elaborado una aplicación similar a la aquí presentada para obtener la calidad del agua usada en los sistemas de enfriamiento y antiincendios de un CPD usando *IoT* y comunicación inalámbrica de largo alcance.

2. DESARROLLO

El desarrollo de la *LoRaWAN* consistió en dividirla en dos componentes: las estaciones de medida y el servidor web. Se ubicaron tres estaciones de medida en los depósitos de almacenamiento de agua del CPD como se muestra en la arquitectura de la Figura 1.

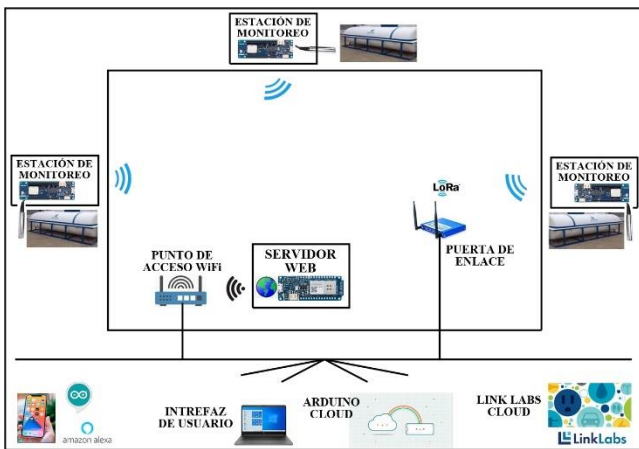


Fig. 1. Arquitectura de la red de monitoreo

2.1. Las estaciones de medida

Las estaciones de medida que integran la *LoRaWAN* están compuestas por tres elementos: el módulo embebido, los sensores y el acondicionador de señal, como se muestra en la Figura 2. El módulo embebido usado fue el Arduino MKR WAN 1310. Se eligió este módulo de código abierto porque es un dispositivo compacto, económico y de bajo consumo de energía. La característica principal de este módulo es que integra un transceptor inalámbrico *LoRa*, por medio del cual el Arduino MKR WAN 1310 puede comunicarse con una puerta de enlace ubicada a kilómetros de distancia. A través de la puerta de enlace se puede acceder a la Internet y plataformas en la nube, lo que permite desarrollar de manera sencilla, rápida y confiable aplicaciones de *IoT*.

Además del transceptor *LoRa*, el Arduino MKR WAN 1310 integra un controlador SAMD21 de 32 bits, un módulo de cripto-autenticación, memoria flash SPI de 2 MB, memoria RAM de 32 KB, terminales de entrada/salida, puertos UART, SPI e I2C, convertidor ADC de 7 canales, convertidor DAC de 10 bits, antena con ganancia de 2 dB y batería recargable de Li-Ion. La memoria flash permite almacenar localmente

información, en caso de existir problemas en la comunicación *LoRa*, y enviarla posteriormente a la Internet.

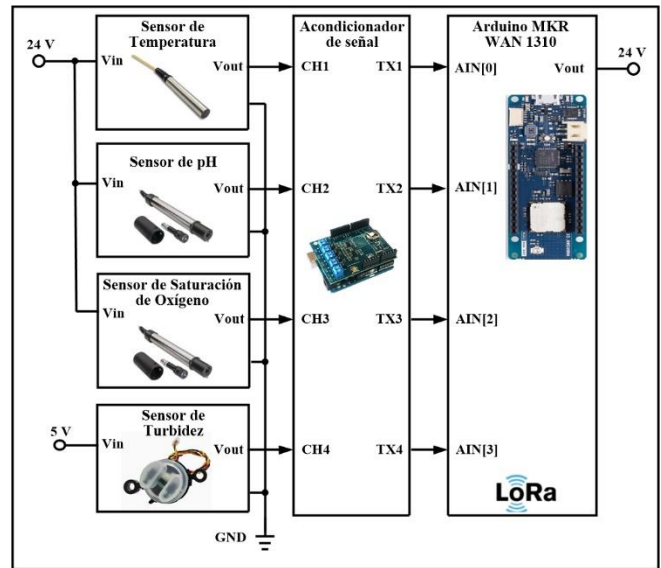


Fig. 2. Arquitectura de las estaciones de medida

Los sensores de temperatura, pH y saturación de oxígeno usados en las estaciones de medida son del proveedor Global Water. Están diseñados para aplicaciones de medida sumergibles, se alimentan con una fuente de 10 a 35 VDC y cada uno de ellos está contenido en un encapsulado de acero inoxidable con cable, ambos de grado submarino. Proporcionan la medida por medio de una salida analógica de 4-20 mA.

El sensor de temperatura fue el dispositivo modelo WQ101. Cuenta con un rango de medida de -50° a $+50^{\circ}$ C y presenta un porcentaje de error de $\pm 1\%$. Para medir el nivel de pH se usó el dispositivo WQ201, cuyo rango de trabajo es de 0 a 14 unidades de pH y su porcentaje de error es 2%. El sensor de saturación de oxígeno empleado fue el dispositivo WQ401, el cual opera en el rango de 0 a 100% de saturación, 0 a 8 ppm, y cuenta con un porcentaje de error de $\pm 0.5\%$. Para medir la turbidez del agua se usó el sensor SEN0189. Este sensor obtiene el nivel de turbidez detectando la cantidad total de partículas suspendidas. Su funcionamiento se basa en la medida de la transmitancia de la luz y la tasa de dispersión que cambian con la cantidad de TSS en el agua. De manera tal que, al aumentar el nivel de turbidez, se incrementa el TSS. Se alimenta con un voltaje de 5 VDC y entrega una señal analógica de 4-20 mA proporcional a la cantidad de TSS.

Las salidas de los sensores de las estaciones de medida se conectaron a los canales de entrada 1, 2, 3, y 4, CH [1], CH [2] y CH [4], del acondicionador de señal. El acondicionador de señal utilizado fue el módulo Arduino 4-20mA+RTC. Este módulo convierte las señales eléctricas de los sensores, del estándar industrial de 4-20 mA a niveles de voltaje los cuales

son enviados a las entradas del convertidor ADC del Arduino MKR WAN 1310. El acondicionador incluye una línea de salida que proporciona 24 V para alimentar los sensores. Las salidas de este módulo se conectaron a las entradas analógicas AIN [0] a la AIN [3] del convertidor ADC del Arduino MKR.

La función de las estaciones de medida es leer periódicamente los sensores y transmitir los valores de TpHOT a la puerta de enlace de la LoRaWAN. La puerta de enlace usada fue el dispositivo LL-BST-8 de Link Labs. La información recibida desde las estaciones de medida es enviada, por medio la puerta de enlace, al servidor de la plataforma en la nube de Link Labs. La programación de las estaciones de medida se llevó a cabo usando el IDE de Arduino y se basó en el diagrama de flujo de la Figura 3.

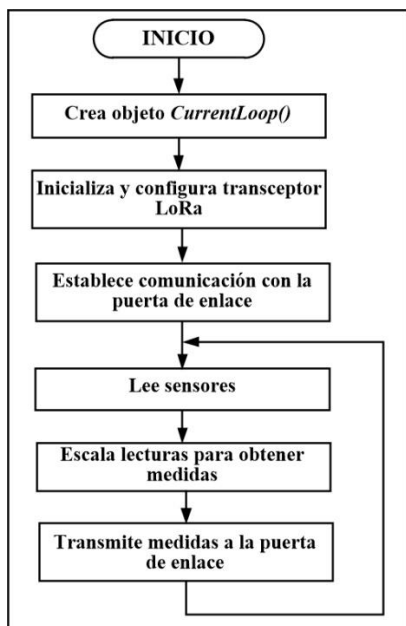


Fig. 3. Diagrama de flujo de la programación de las estaciones de medida

Las tareas que realiza la programación son las siguientes: crea el objeto *currentLoop()* para acceder al acondicionador de señal de 4-20 mA, inicializa y configura el transceptor LoRa como un modem, establece la comunicación con la puerta de enlace y entra a un ciclo en el que lleva a cabo las siguientes tareas periódicamente: lee los sensores, realiza la escalación de la lectura y transmite el valor de las medidas a la puerta de enlace. Para llevar a cabo la comunicación con la puerta de enlace LoRa se usó la biblioteca de funciones *MKRWAN.h* y para leer los sensores conectados a las entradas del convertidor ADC y realizar la escalación se utilizó la biblioteca de funciones *currentLoop.h*.

2.2. El servidor web

El servid web de la red se implantó usando un módulo embebido Arduino MKR1000. Este módulo es similar al usado en las estaciones de medida, a diferencia que el MKR1000 integra un transceptor WiFi para conectarse a la Internet por medio del punto de acceso del CPD.

La información enviada al servidor de Link Labs por la puerta de enlace LoRa puede obtenerse a través de un portal, sin embargo, Link Labs tiene disponible un conjunto de API empleado en la programación del servidor web de la LoRaWAN para obtener las medidas obtenidas. Estas medidas son mostradas en la página web, realizada en HTTP, de la interfaz de usuario. Cuando un cliente accede al servidor web, por medio de un navegador, transmite una solicitud HTTP, la cual es respondida por el servidor mostrando la página web y la interfaz de usuario. El servidor web se programó usando el IDE de Arduino y la biblioteca de funciones *Ethernet.h*.

En la interfaz, el usuario puede visualizar en tiempo real o históricamente los valores de TpHOT de los cuatro depósitos de almacenamiento de agua del CPD. En la interfaz se puede establecer el periodo de muestro de los sensores en las estaciones de medida. En la Figura 4 se muestra la ventana principal de la interfaz de usuario.

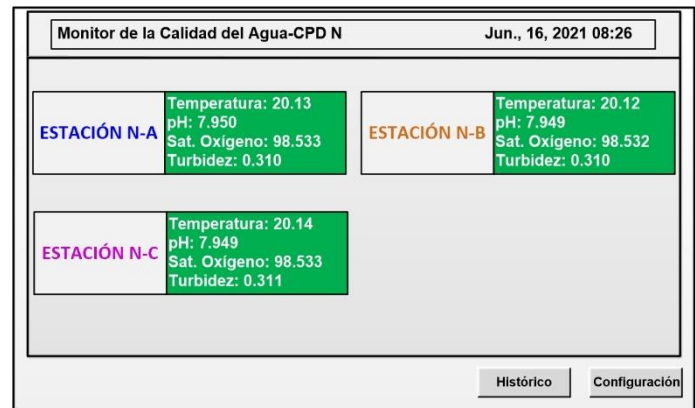


Fig. 4. Interfaz de usuario

3. RESULTADOS

Se realizaron dos grupos de pruebas, el primero tuvo como objetivo determinar el porcentaje de error de los valores de TpHOT medidos en la LoRaWAN. Para llevar a cabo estas pruebas se usaron como valores de referencia los obtenidos por medio de medidores calibrados según la Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-202-SCFI-2017 y se compararon con el promedio de las medidas de las estaciones de medida mostradas en la interfaz de usuario. Se efectuaron once pruebas en diferentes horas del mismo día durante el mes de Junio, de las 7:00 AM a las 6:00 PM. Los resultados de las pruebas indicaron que el porcentaje de error de las medidas de temperatura, pH y concentración de oxígeno fueron 1.05%, 2.11% y 0.52% en promedio. Ligeramente mayores al

porcentaje de error nominal de 1%, 2% y 0.5% que indica el fabricante de los sensores. El fabricante del sensor de turbidez no indica en las especificaciones el porcentaje de error, sin embargo, las pruebas mostraron un porcentaje de error de 0.51%. Las Figuras 5, 6, 7 y 8 muestran los resultados de estas pruebas.

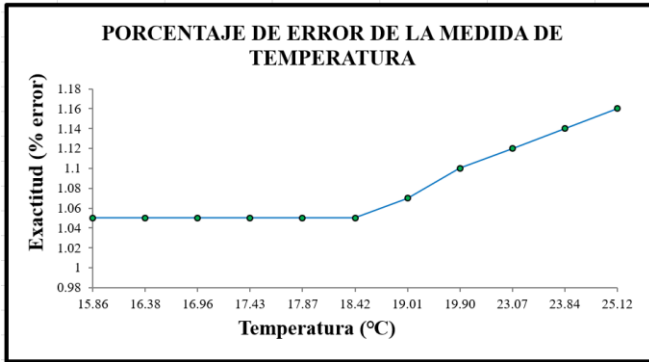


Fig. 5. Porcentaje de error de la medida de temperatura

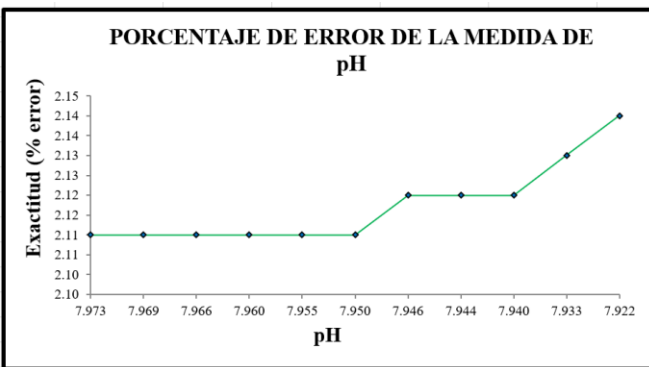


Fig. 6. Porcentaje de error de la medida de pH

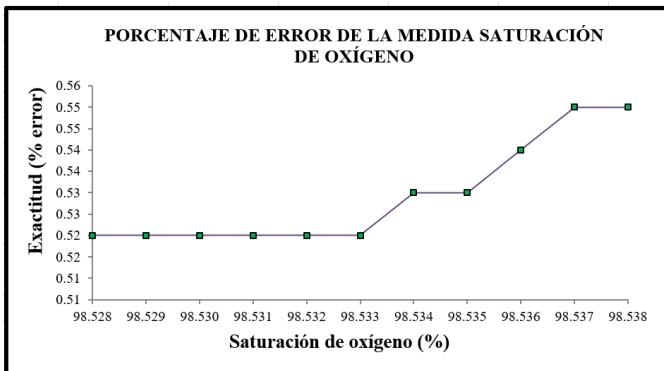


Fig. 7. Porcentaje de error de la medida de concentración de oxígeno

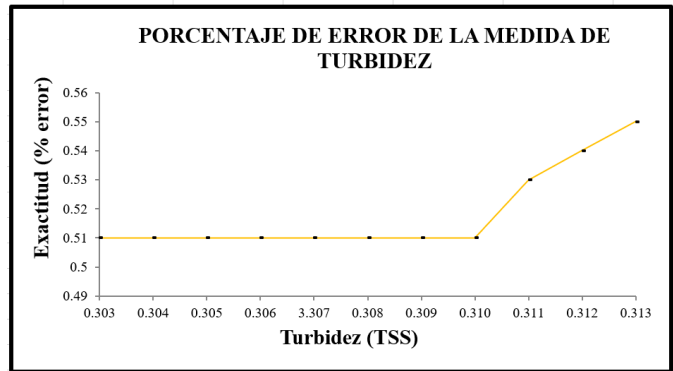


Fig. 8. Porcentaje de error de la medida de turbidez

El segundo grupo de pruebas tuvo como fin determinar el alcance de la *LoRaWAN*. Para realizar estas pruebas se tomó una de las estaciones de medida y se ubicó a distancias diferentes respecto a la puerta de enlace sin tomar en cuenta los valores de $TpHOT$ mostrados en la interfaz de usuario. Las pruebas indicaron que la distancia máxima a la cual se mantuvo la comunicación entre la estación y la puerta de enlace fue 6.545 kilómetros con línea de vista, lo cual se consideró como el alcance de la red.

4. CONCLUSIONES

Se obtuvo una red de monitoreo de la calidad del agua que alimenta a los sistemas de enfriamiento y contra incendios de un CPD. La red monitorea periódicamente los niveles de temperatura, pH, concentración de oxígeno y turbidez de cuatro depósitos de almacenamiento. Estos valores se transmiten a un servidor en la nube desde el cual son accedidos por la interfaz de usuario para mostrarlos en tiempo real e históricamente en un navegador.

La red diseñada, una *LoRaWAN* cuyo alcance fue 6.545 kilómetros con línea de vista, puede usarse en entornos donde sea necesario una solución de *IoT* de largo alcance para monitorear remotamente diferentes parámetros. En caso de requerir incrementar el alcance de la red, lo cual puede ser útil en ambientes urbanos, puede usarse un repetidor de señal *LoRa*. Si la cantidad de estaciones de medida necesita crecer, no se necesita modificar el diseño de la *LoRaWAN* puesto que la puerta de enlace soporta más de 62,000 nodos en la topología de estrella.

Si es necesario adicionar sensores en las estaciones de medida de la red, los módulos embebidos cuentan con canales del convertidor ADC y terminales de entrada suficientes, solo es necesario integrar la programación requerida para la lectura de la señal. Finalmente, el diseño de la *LoRaWAN* puede simplificarse si se emplea en las estaciones de medida un módulo embebido que contenga un transceptor *WiFi* para conectarse a la Internet e implantar en una de ellas el servidor web. Puede usarse por ejemplo el módulo TTGO *LoRa32*

SX1276-ESP32, el cual integra transceptores *WiFi*, *Bluetooth* LE y *LoRa*. Esto evitaría usar el módulo Arduino MKR1000.

5. REFERENCIAS

- [1] Y. Li, Y. Wen, D. Tao and K. Guan, "Transforming Cooling Optimization for Green Data Center via Deep Reinforcement Learning", *IEEE Transactions on Cybernetics*, vol. 50, no. 5, 2020, pp. 2002-2013.
- [2] Y. Berezovskaya, C. Yang, A. Mousavi, V. Vyatkin and T. B. Minde, "Modular Model of a Data Centre as a Tool for Improving Its Energy Efficiency", *IEEE Access*, vol. 8, 2020, pp. 46559-46573.
- [3] G. Zhabelova, M. Vesterlund, S. Eschmann, Y. Berezovskaya, V. Vyatkin and D. Flieller, "A Comprehensive Model of Data Center: From CPU to Cooling Tower", *IEEE Access*, vol. 6, 2018, pp. 61254-61266.
- [4] J. Wan, J. Zhou and X. Gui, "Intelligent Rack-Level Cooling Management in Data Centers with Active Ventilation Tiles: A Deep Reinforcement Learning Approach", *IEEE Intelligent Systems (Early Access)*, 2021, pp. 1-1.
- [5] J. Wan, X. Gui, S. Kasahara, Y. Zhang and R. Zhang, "Air Flow Measurement and Management for Improving Cooling and Energy Efficiency in Raised-Floor Data Centers: A Survey", *IEEE Access*, vol. 6, 2018, pp. 48867-48901.
- [6] S. Imen, N. -B. Chang, Y. J. Yang and A. Golchubian, "Developing a Model-Based Drinking Water Decision Support System Featuring Remote Sensing and Fast Learning Techniques", *IEEE Systems Journal*, vol. 12, no. 2, 2018, pp. 1358-1368.
- [7] X. Zhao, S. Yan and Q. Gao, "An Algorithm for Tracking Multiple Fish Based on Biological Water Quality Monitoring", *IEEE Access*, vol. 7, 2019, pp. 15018-15026.
- [8] Secretaría de Economía, México, Proyecto de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-202-SCFI-2017 [en línea], disponible: https://www.snice.gob.mx/~oracle/SNICE_DOCS/PROYECTO-de-PROY-NOM-202-SCFI-PROY-NOM-JUNIO-DOF_20180723-20180614.pdf, sitio visitado en Enero 2021.
- [9] J. Liu et al., "Accurate Prediction Scheme of Water Quality in Smart Mariculture With Deep Bi-S-SRU Learning Network", *IEEE Access*, vol. 8, 2020, pp. 24784-24798.
- [10] L. Manjakkal et al., "Connected Sensors, Innovative Sensor Deployment and Intelligent Data Analysis for Online Water Quality Monitoring", *IEEE Internet of Things Journal (Early Access)*, 2021, pp. 1-1.
- [11] Organización Mundial de la Salud, Guías para la calidad del agua de consumo humano. ISBN: 978-92-4-354995-8, 2017.
- [12] Y. Wang, S. M. S. M. Rajib, C. Collins and B. Grieve, "Low-Cost Turbidity Sensor for Low-Power Wireless Monitoring of Fresh-Water Courses", *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, no. 11, 2018, pp. 4689-4696.
- [13] P. Edward, M. El-Aasser, M. Ashour and T. Elshabrawy, "Interleaved Chirp Spreading LoRa as a Parallel Network to Enhance LoRa Capacity", *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 8, no. 5, 2021, pp. 3864-3874.
- [14] Q. Zhou, K. Zheng, L. Hou, J. Xing and R. Xu, "Design and Implementation of Open LoRa for IoTu", *IEEE Access*, vol. 7, 2019, pp. 100649-100657.
- [15] E. Sisinni et al., "LoRaWAN Range Extender for Industrial IoT", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 16, no. 8, pp. 5607-5616, 2020.
- [16] K. Adachi, K. Tsurumi, A. Kaburaki, O. Takyu, M. Ohta and T. Fujii, "Packet-Level Index Modulation for LoRaWAN", *IEEE Access*, vol. 9, 2021, pp. 12601-12610.
- [17] S. O. Olatinwo and T. -H. Joubert, "Enabling Communication Networks for Water Quality Monitoring Applications: A Survey", *IEEE Access*, vol. 7, 2019, pp. 100332-100362.
- [18] S. Chopade, H. P. Gupta, R. Mishra, A. Oswal, P. Kumari and T. Dutta, "A Sensors based River Water Quality Assessment System using Deep Neural Network", *IEEE Internet of Things Journal (Early Access)*, 2021, pp. 1-1.
- [19] E. Batur and D. Maktav, "Assessment of Surface Water Quality by Using Satellite Images Fusion Based on PCA Method in the Lake Gala, Turkey", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 57, no. 5, 2019, pp. 2983-2989.
- [20] L. Kuang, P. Shi, C. Hua, B. Chen and H. Zhu, "An Enhanced Extreme Learning Machine for Dissolved Oxygen Prediction in Wireless Sensor Networks", *IEEE Access*, vol. 8, 2020, pp. 198730-198739.
- [21] Y. Wei, W. Li, D. An, D. Li, Y. Jiao and Q. Wei, "Equipment and Intelligent Control System in Aquaponics: A Review", *IEEE Access*, vol. 7, 2019, pp. 169306-169326.
- [22] J. Gámiz, R. Vilanova, H. Martínez-García, Y. Bolea and A. Grau, "Fuzzy Gain Scheduling and Feed-Forward Control for Drinking Water Treatment Plants (DWTP) Chlorination Process", *IEEE Access*, vol. 8, 2020, pp. 110018-110032.
- [23] Y. Yao, C. Li, K. Xie, H. -M. Tai, B. Hu and T. Niu, "Optimal Design of Water Tank Size for Power System Flexibility and Water Quality", *IEEE Transactions on Power Systems (Early Access)*, 2021, pp. 1-1.
- [24] A. Saad, A. E. H. Benyamina and A. Gamatié, "Water Management in Agriculture: A Survey on Current Challenges and Technological Solutions", *IEEE Access*, vol. 8, 2020, pp. 38082-38097.
- [25] F. Yuan, Y. Huang, X. Chen and E. Cheng, "A Biological Sensor System Using Computer Vision for Water Quality Monitoring", *IEEE Access*, vol. 6, 2018, pp. 61535-61546.
- [26] Y. Wang, I. W. -H. Ho, Y. Chen, Y. Wang and Y. Lin, "Real-time Water Quality Monitoring and Estimation in AIoT for Freshwater Biodiversity Conservation", *IEEE Internet of Things Journal*, doi: 10.1109/JIOT.2021.3078166.
- [27] D. Wu, H. Wang, H. Mohammed and R. Seidu, "Quality Risk Analysis for Sustainable Smart Water Supply Using Data Perception", *IEEE Transactions on Sustainable Computing*, vol. 5, no. 3, 2020, pp. 377-388.
- [28] C. Qi, S. Huang and X. Wang, "Monitoring Water Quality Parameters of Taihu Lake Based on Remote Sensing Images and LSTM-RNN", *IEEE Access*, vol. 8, 2020, pp. 188068-188081.
- [29] A. C. D. S. Júnior, R. Munoz, M. D. L. Á. Quezada, A. V. L. Neto, M. M. Hassan and V. H. C. D. Albuquerque, "Internet of Water Things: A Remote Raw Water Monitoring and Control System", *IEEE Access*, vol. 9, 2021, pp. 35790-35800.
- [30] D. D. Luccio et al., "Coastal Marine Data Crowdsourcing Using the Internet of Floating Things: Improving the Results of a Water Quality Model", *IEEE Access*, vol. 8, 2020, pp. 101209-101223.
- [31] K. Zhang, R. K. Amineh, Z. Dong and D. Nadler, "Microwave Sensing of Water Quality", *IEEE Access*, vol. 7, 2019, pp. 69481-69493.
- [32] T. H. Assumpção et al., "Citizens' Campaigns for Environmental Water Monitoring: Lessons From Field Experiments", *IEEE Access*, vol. 7, 2019, pp. 134601-134620.
- [33] S. O. Olatinwo and T. Joubert, "Energy Efficient Solutions in Wireless Sensor Systems for Water Quality Monitoring: A Review", *IEEE Sensors Journal*, vol. 19, no. 5, 2019, pp. 1596-1625.
- [34] F. D. Von Borstel Luna, E. de la Rosa Aguilar, J. Suárez Naranjo and J. Gutiérrez Jagüey, "Robotic System for Automation of Water Quality Monitoring and Feeding in Aquaculture Shadehouse", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 47, no. 7, 2017, pp. 1575-1589.
- [35] D. Madeo, A. Pozzebon, C. Mocenni and D. Bertoni, "A Low-Cost Unmanned Surface Vehicle for Pervasive Water Quality Monitoring", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 69, no. 4, 2020, pp. 1433-1444.
- [36] N. Mandal, S. Mitra and D. Bandyopadhyay, "Paper-Sensors for Point-of-Care Monitoring of Drinking Water Quality", *IEEE Sensors Journal*, vol. 19, no. 18, 2019, pp. 7936-7941.
- [37] N. A. Cloete, R. Malekian and L. Nair, "Design of Smart Sensors for Real-Time Water Quality Monitoring", *IEEE Access*, vol. 4, 2016, pp. 3975-3990.
- [38] Y. Song et al., "Internet of Maritime Things Platform for Remote Marine Water Quality Monitoring", *IEEE Internet of Things Journal (Early Access)*, 2021, pp. 1-1.