

RED DE MONITOREO DE CALIDAD DEL AIRE EN INTERIORES USANDO IOT

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 una red para monitoreo en tiempo real la calidad del aire en interiores usando una plataforma de IoT. La red consta de cuatro nodos de monitoreo y un nodo central que se comunican usando tecnología WiFi. La arquitectura de los nodos se basa en un módulo embebido Metro M4 Express AirLift. Cada nodo de monitoreo usa un sensor CCS811 para determinar el valor total de compuestos orgánicos volátiles, o TVOC, y el equivalente de CO₂, o eCO₂, en el lugar de ubicación. El nodo central solicita periódicamente a los nodos de monitoreo el valor de los parámetros anteriores para transmitirlos a la plataforma de servicios de Internet Wia. En caso de que el valor de estos parámetros alcance un umbral predeterminado, se envía un mensaje de alerta a un teléfono móvil. Las pruebas realizadas indicaron que la precisión de la medida de TVOC y eCO₂ son menores a ± 10 ppb y ± 20 ppm, respectivamente.

Palabras Clave: Calidad del aire, CCS811, eCO₂, TVOC, WiFi.

ABSTRACT.

This paper presents a network to monitor indoor air quality in real time using an IoT platform. The network is made up of four monitoring nodes and a central node that communicate all using WiFi technology. The architecture of the nodes is based on a Metro M4 Express AirLift embedded module. The monitoring nodes use the CCS811 sensor to determine the total value of volatile organic compounds, or TVOC, and the CO₂ equivalent, or eCO₂, at the location. The function of the central node is to periodically request from the monitoring nodes the value of the above parameters to transmit them to the Internet service platform Wia. In case the value of these parameters reaches the threshold, an alert message is sent to a mobile phone. The tests carried out indicated that the precision of the TVOC and eCO₂ measurements are less than ± 10 ppb and ± 20 ppm, respectively.

Keywords: Air quality, CCS811, eCO₂, TVOC, WiFi.

1. INTRODUCCIÓN

Es preciso monitorear constantemente la calidad del aire para evitar daños tanto a la salud humana y la naturaleza como al medio ambiente, en una gran cantidad de instalaciones como: laboratorios, hospitales, viviendas, centros de educación y cierto tipo de industrias. En la actualidad, en la mayoría de sitios donde se monitorea la calidad del aire se usan medidores de concentración de dióxido de carbono, o CO₂, y cada vez más se emplean medidores de concentración de compuestos

orgánicos volátiles (COV-Volatile Organic Compounds), los cuales pueden ser nocivos para el ser humano. En algunas instalaciones es más adecuado medir el nivel de COV en el ambiente [1] que en otras.

Los COV son compuestos de carbono, excepto CO, CO₂, ácido carbónico, carbonatos metálicos y carbonato de amonio, que pueden generar reacciones fotoquímicas atmosféricas y participar en la formación de ozono o de aerosoles secundarios. Los COV, ya sea en forma de gases o vapor a temperatura ambiente alrededor de 20°C, son altamente volátiles, se propagan a distancias significativas del origen, por lo que el uso y emisión está regulado en la mayoría de los países del mundo [2].

Tienen efectos contaminantes severos en el medio ambiente, en la naturaleza y en la atmósfera, ya que destruyen la capa de ozono.

Existe un gran número de fuentes generadoras de COV. Algunos COV presentes en el ambiente pueden ser hidrocarburos, alcoholes, aldehídos, butano, propano, etanol, acetona, ácidos orgánicos, disolventes, combustibles líquidos y gases resultantes de combustiones ineficientes [3]. Particularmente, los COV pueden originarse en interiores debido al uso de materiales para construcción, pinturas, alfombras, decoración y limpieza, así como el humo de tabaco, preparación de alimentos, computadoras, impresoras y fotocopiadoras [4].

A corto plazo, los COV pueden causar irritación de ojos, garganta y nariz, vómito de sangre, náuseas, alergias, mareos, dolor estomacal e intestinal, fatiga, ronchas y manchas en la piel [5]. Exposiciones prolongadas a estos gases y vapores pueden afectar severamente la salud de las personas, creando daños en el hígado, los riñones o el sistema nervioso central, siendo algunos hasta carcinógenos. Valores de COV de 0 a 600 partes por billón (ppb) indican un ambiente interior bueno. Para valores de COV de 600 a 2,000 ppb se recomienda ventilar el lugar y para valores mayores a 2,000 ppb es necesario desalojar el sitio [6].

Por otra parte, el dióxido de carbono, o CO₂, es un gas inodoro e incoloro que bajo presión puede encontrarse en estado líquido o sólido. Al respirar el cuerpo humano cantidades grandes de

CO₂ aumenta el nivel de pH de la sangre, afectando la circulación y respiración, apareciendo la sensación de asfixia. Se estima que las principales fuentes de generación de CO₂ en interiores son la actividad humana, como la respiración y sudoración, el metabolismo de plantas, la descomposición y degradación de organismos y los procesos biológicos de la naturaleza.

La concentración de un contaminante, como el CO₂, en el ambiente se expresa en partes por millón (ppm), partes por billón (ppb) o microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). Cuando el CO₂ es un gas, se usa comúnmente ppm y ppb. Así, 1 ppm es la unidad de volumen de contaminante en un millón de unidades de volumen de aire. Cuando la concentración de CO₂ es alta, se utiliza el porcentaje volumétrico, es decir, unidades de volumen de CO₂ en 100 unidades de volumen de aire, lo que indica que 10,000 ppm = 1% [7].

Las concentraciones de CO₂ de 2 a 10% pueden causar náuseas, mareos, confusión y dolor de cabeza. Si la concentración de CO₂ es mayor a 10% o cercana a 30,000 ppm, el ser humano puede perder la conciencia, movilidad, sufrir asfixia e inclusive morir, ya que una persona no puede protegerse y darse cuenta de la asfixia rápida. Esto es debido a que el CO₂ desplaza al oxígeno en la sangre [8].

Adicionalmente, cuando la concentración de CO₂ en el ambiente rebasa el 5% existe peligro tóxico de otros gases como el monóxido de carbono, o CO, y el dióxido de nitrógeno (NO₂), ya que aumenta la producción de carboxihemoglobina o metahemoglobina creada por estos gases.

En algunos países y ciudades, el nivel permisible de COV y CO₂, que determina la calidad del aire en interiores y medio ambiente exterior, está regulado por normas que se actualizan periódicamente. Esto tiene como objetivo reducir y controlar la emisión de contaminantes, impactando en el rendimiento de las personas y bienestar de la sociedad [9]. Se han llevado a cabo investigaciones que han determinado que la presencia de niveles altos de CO₂ y ciertos COV en interiores son un factor importante para la propagación del COVID-19 [10].

Actualmente, existen diferentes dispositivos que incorporan un sensor digital de gas que permite detectar la cantidad total de compuestos orgánicos volátiles (TVOC-Total Volatile Organic Compound) [11]. El sensor no discrimina entre VOC, proporcionando la medida total de los mismos. Estos dispositivos, como el sensor CSS811, miden además el nivel equivalente de CO₂ denominado eCO₂ [12].

El objetivo del trabajo aquí presentado fue realizar una red de monitoreo de la calidad del aire en interiores. La red está compuesta por un nodo central y cuatro nodos de monitoreo. El nodo central solicita periódicamente a los nodos de monitoreo los valores de TVOC y eCO₂ medidos en el lugar de la ubicación. Estos valores son enviados a la plataforma del proveedor de servicios de Internet Wia para ser almacenados. En el nodo central se implantó un servidor web que accede a la plataforma Wia con los valores de TVOC y eCO₂ para poder visualizarse en la interfaz de usuario en línea o históricamente.

Cuando el nivel de estos parámetros alcanza el valor de umbral establecido, se envía un mensaje de alerta SMS y de WhatsApp al teléfono del administrador del sistema.

Haciendo una revisión de las investigaciones llevados a cabo los últimos años relacionados con el tema de este trabajo, se puede encontrar una cantidad importante de aplicaciones de monitoreo de contaminantes. La mayoría de los desarrollos están dirigidos a realizar la estimación y predicción de la calidad del aire en interiores [13-14], ambientes urbanos [15-16] y edificios [17] y ciudades inteligentes [18]. Los trabajos recientes usan métodos y tecnologías diferentes, por ejemplo: redes neuronales [19]; comunicación de largo alcance a través de LPWAN (Low Power Wide Area Network) [20]; vehículos aéreos no tripulados [21], redes de sensores en estaciones de monitoreo fijas y móviles [22], Internet de las Cosas (IoT-Internet Of Things) [23-24] y plataformas en la nube [25].

2. DESARROLLO

La red de monitoreo aquí presentada se desarrolló usando la arquitectura indicada en la Figura 1. La arquitectura está compuesta por el nodo central, los cuatro nodos de monitoreo y la interfaz de usuario.

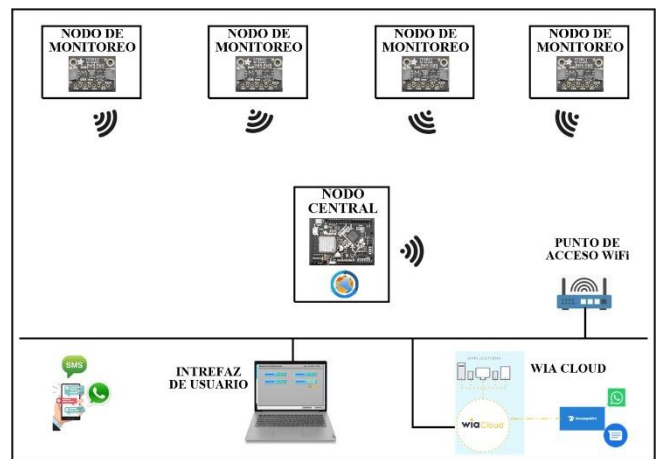


Fig. 1. Arquitectura de la red de monitoreo

2.1. El nodo central.

El nodo central se realizó en base al módulo embebido Metro M4 Express AirLift como el mostrado en la Figura 2. El módulo embebido integra un co-procesador ESP32 como transceptor WiFi y un controlador Microchip ATSAMD51. El controlador ATSAMD51 proporciona al módulo embebido los siguientes recursos: un núcleo Cortex M4 de 32 bits a 120 MHz, memoria flash de 512 KB, memoria RAM de 192 KB RAM, dos convertidores DAC, dos convertidores ADC de 8 canales, interfaz I2C, SPI y UART y 25 terminales en entrada/salida de propósito general GPIO (General Purpose Input/Output).

La programación del módulo embebido se llevó a cabo usando CircuitPython 6.1.0. Este lenguaje de programación es de código abierto basado en MicroPython y está dirigido al diseño de aplicaciones con tarjetas de bajo costo que incorporan microcontroladores. CircuitPython es un lenguaje de rápido crecimiento y actualización en los últimos años ya que es de fácil uso y mantenimiento, soportando la utilización de bibliotecas y paquetes disponibles en la comunidad de código abierto que pueden ser modificados y mejorados por el usuario. Al estar fundamentado en Python, contiene un intérprete que elimina la necesidad de un compilador, lo cual facilita la realización de proyectos de IoT de forma rápida y eficiente.



Fig. 2. El módulo embebido Metro M4 Express AirLift

Las tareas que realiza la programación del módulo embebido son las siguientes: inicializa y configura la interfaz WiFi y las terminales GPIO; establece el valor de umbral de TVOC y eCO₂, así como el número de teléfono del administrador del sistema; arranca en segundo plano el servidor web que invoca la interfaz de usuario al recibir la solicitud de conexión desde la Internet y finalmente, entra a un ciclo en el cual solicita periódicamente los valores medidos de TVOC y eCO₂ a los nodos de monitoreo para transmitirlos a la plataforma de Wia. En la Figura 3 se muestra el diagrama de flujo seguido para llevar a cabo la programación anterior.

Para implantar la comunicación entre los nodos de la red a través de la red WiFi y la conexión del nodo maestro a la Internet, el módulo embebido de los nodos hace uso del co-procesador ESP32. El ESP32 puede configurarse desde CircuitPython como interfaz BLE (Bluetooth LE) o WiFi. En este trabajo, se configuró como interfaz WiFi y las terminales RXI y TXO del ESP32 están conectadas a las terminales TX y RX de la interfaz SPI del controlador ATSAM51. En la programación del sistema, la configuración del ESP32 como

interfaz WiFi se realizó usando la biblioteca de funciones *adafruit-circuitpython-esp32spi* y el acceso a la interfaz WiFi se realizó usando la biblioteca de funciones *WiFi Manager*.

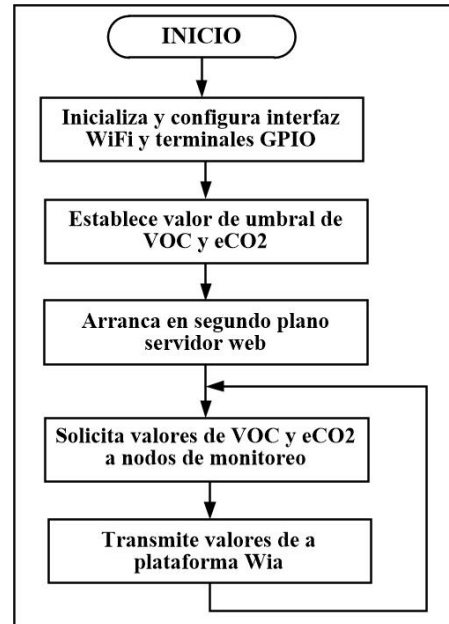


Fig. 3. Diagrama de flujo de la programación del nodo central

Wia es una plataforma de IoT en la nube la cual permite desarrollar de manera rápida y sencilla aplicaciones y soluciones de IoT. El uso de una plataforma de este tipo permite a los diseñadores olvidarse de la administración del servidor, del almacenamiento y de la replicación de información. Wia facilita el manejo de dispositivos remotos, recolección de eventos y análisis de información. Soporta la comunicación con una variedad de módulos embebidos, o cosas, entre los que se encuentran los que trabajan con el SoC ESP32. Adicionalmente, Wia ofrece integración con plataformas de IoT para el envío de SMS y notificaciones.

Para transmitir a la plataforma Wia los valores de TVOC y eCO₂ se utilizó el conjunto de API (Application Programming Interfaz) y el kit de desarrollo de software (SDK-Software Development Kit) para Python de uso libre que Wia pone a disposición de los programadores para publicar eventos a la plataforma y visualizarlos en tiempo real. En caso de que los valores de TVOC y eCO₂ recibidos desde los nodos de monitoreo alcancen el valor de umbral configurado en la interfaz de usuario, la programación del nodo central solicita a Wia el envío del SMS y mensaje de alerta de WhatsApp por medio de la plataforma de IoT MessageBird. Con el objetivo de implantar el servidor web HTTP, se utilizó la biblioteca de funciones *picoweb* por ser una de las que menos memoria RAM usa durante su ejecución.

2.2. Los nodos de monitoreo.

Los nodos de monitoreo se realizaron usando el módulo embebido Metro M4 Express AirLift y el sensor CCS811. La arquitectura de los nodos de monitoreo se indica en el diagrama de bloques de la Figura 4.

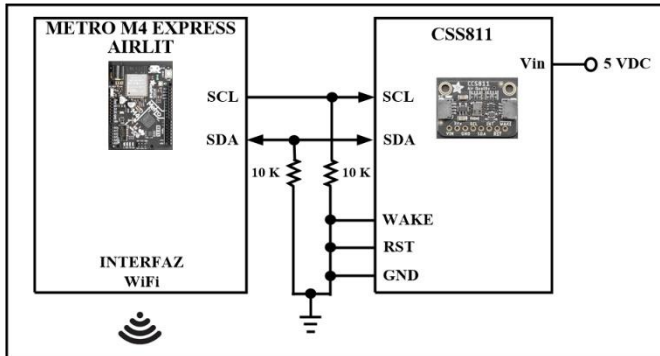


Fig. 4. Arquitectura de los nodos de monitoreo

La función del dispositivo CCS811, como el mostrado en la Figura 5, es determinar y monitorear la calidad del aire en el lugar de ubicación del nodo. Este dispositivo detecta una gama alta de VOC en interiores. Puede conectarse a la interfaz I2C de un controlador y obtener tanto la cantidad de TVOC como el nivel de eCO₂.

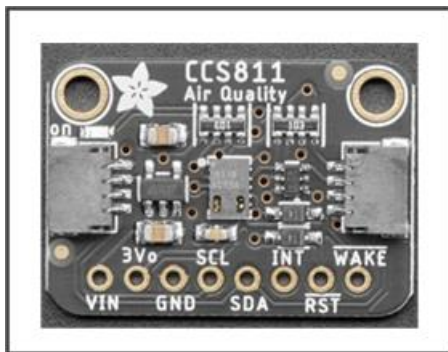


Fig. 5. El sensor CCS811 usado en los nodos de monitoreo

El sensor CSS811 integra un sensor de gas digital del tipo MOX (Metal-oxide) de película caliente y un controlador que supervisa la temperatura de la película, realiza la lectura del voltaje analógico y proporciona el valor de la lectura a través de la salida I2C. El rango de medida de concentración de TVOC es de 0 a 1,187 ppb y el de eCO₂ es de 400 a 8192 ppm. Puede detectar alcoholes, aldehídos, cetonas ácidos orgánicos, alifáticos e hidrocarburos aromáticos.

El CSS811 cuenta con ocho terminales de conexión. Dos de ellas, Vin y GND, son para alimentación y tierra. El sensor se alimenta internamente con 3.3 V e incluye un regulador de voltaje que permite suministrarle 5 VDC desde la fuente de

alimentación de los nodos de monitoreo. Las terminales SCL y SDA son la señal de reloj y datos, respectivamente, del bus I2C que se conectaron a las terminales del mismo nombre del módulo embebido usando una resistencia de pull-up de 10 K. El sensor usa la dirección 0x5A del bus I2C. La terminal WAKE del CSS811 se conectó a tierra para poder habilitar la comunicación con el controlador del módulo embebido. RST es la terminal de reset del CSS811 y se conectó a tierra. Este dispositivo proporciona una señal de 3.3 V por medio de la terminal 3Vo, que proviene del regulador de voltaje, la cual puede usarse para alimentar otro dispositivo. En el caso de los nodos de monitoreo, no se usó la terminal 3Vo. Por último, El CSS811 tiene una terminal de salida de interrupción, INT, mediante la cual indica que la lectura de la medida está lista o que se ha alcanzado el nivel bajo o alto establecido. Se puede configurar el sensor para que el muestreo de la medida sea cada 10, 60 o 250 milisegundos.

La programación de los nodos de monitoreo se llevó a cabo usando CircuitPython 6.1.0, se encarga de llevar a cabo las siguientes acciones: inicializa y configura la interfaz WiFi y las terminales GPIO, configura el bus I2C como maestro, el esclavo es el sensor CSS811, configura el CSS811 y finalmente, entra a un ciclo en el cual espera la solicitud del nodo central para realizar la lectura de los valores de TVOC y eCO₂.

Para configurar y acceder el CSS81 se usó la biblioteca de funciones `adafruit-circuitpython-ccs811` y las bibliotecas de uso libre `busio.I2C(SCL,SDA)` y `adafruit_ccs811.CCS811(i2c_bus)`, respectivamente, para crear e inicializar el objeto interfaz denominado `bus I2C`. La lectura de los valores de TVOC y eCO₂ se llevó a cabo empleando la función `ccs811.data_ready`.

2.3. La interfaz de usuario.

La función del servidor web que se ejecuta en el nodo central es responder a las solicitudes hechas por los clientes, usando principalmente el protocolo HTTP, desde un navegador. La interfaz de usuario es la página web donde se visualiza los valores de TVOC y eCO₂ en tiempo real, la cual es almacenada y mostrada a los clientes por el servidor web del nodo central. La página se realizó en lenguaje HTML y permite adicionalmente consultar los valores históricos de TVOC y eCO₂, así como establecer los niveles de umbral. En la Figura 6 se muestra la ventana principal de la interfaz de usuario.

3. RESULTADOS

Se realizaron dos grupos de pruebas, el primero de ellos tuvo como objetivo determinar la precisión de los niveles de TVOC y eCO₂ medidos por la red de monitoreo. El fabricante del sensor CSS811 indica que el dispositivo debe estar alimentado y configurado al menos 48 horas antes de usarlo para asegurar que su operación sea estable y puedan obtenerse medidas confiables. Por lo anterior, el primer conjunto de pruebas se llevó a cabo 60 horas después de encender los nodos de la red.

Para ejecutar estas pruebas, se generaron, en el lugar de ubicación de uno de los nodos de monitoreo, contaminantes resultado del humo de tabaco y quema de madera, plástico, papel y gasolina, así como del cocinado de alimentos con aceite vegetal. A continuación, se obtuvieron los valores de TVOC y eCO₂ con un medidor comercial para interiores calibrado según la Norma Oficial Mexicana NOM-123-ECOL-1998-2009 [26], los cuales se usaron como referencia, y se compararon con los mostrados en la interfaz de usuario.

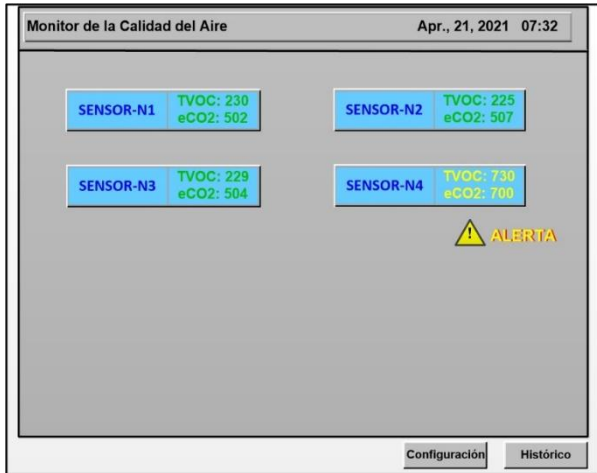


Fig. 6. Interfaz de usuario

A pesar de que el fabricante del sensor CSS81 no marca en las hojas de especificaciones técnicas la precisión del dispositivo, los resultados de estas pruebas indicaron que la precisión de la medida de TVOC y eCO₂ es menor a ± 10 ppb y ± 20 ppm, respectivamente, la cual se mantuvo hasta los 1,100 ppb y 7,950 ppm. Después de esto, la diferencia entre los valores indicados en la interfaz de usuario y los valores de referencia aumentó significativamente como se muestra en las gráficas de la Figuras 7 y 8.

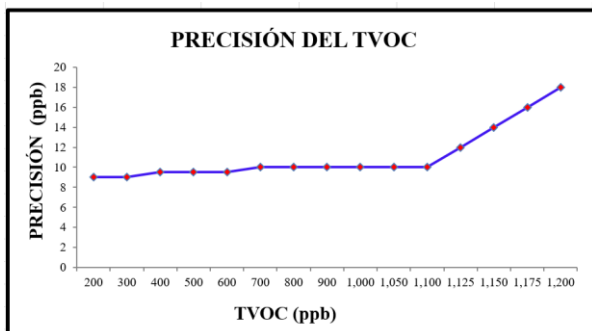


Fig. 7. Precisión del nivel de TVOC medido

El segundo grupo de pruebas tuvo como fin determinar el alcance de la comunicación entre los nodos de la red. Para

llevar a cabo estas pruebas se ubicó un nodo de monitoreo a distancias diferentes del nodo central con línea de vista. La comunicación entre los nodos se realizó correctamente, mostrando en la interfaz de usuario los valores de TVOC y eCO₂ medidos, inclusive se generó un mensaje de alerta, el cual se envió al teléfono del administrador. Cuando la distancia entre los nodos fue 36 metros la comunicación se perdió, lo que indicó que esa distancia es el alcance de la red.

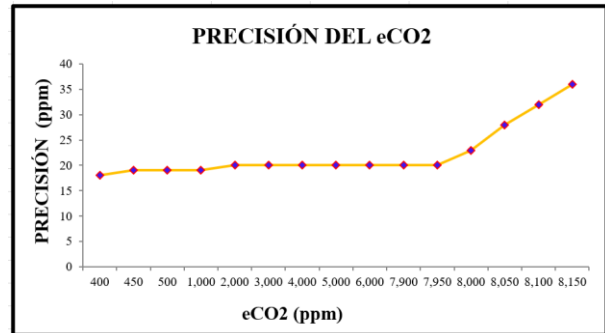


Fig. 8. Precisión del nivel de eCO₂ medido

Un aspecto importante en el diseño de este trabajo fue el uso de la biblioteca de funciones *WiFi Manager*. Esta biblioteca hace más robusta la comunicación entre los nodos, ya que se evitó emplear una rutina, ejecutándose un ciclo en segundo plano, para manejar las conexiones y desconexiones WiFi. Esta biblioteca contiene funciones para determinar el estado de las conexiones y realizar las acciones correctivas necesarias automáticamente.

4. CONCLUSIONES

Se desarrolló una red de monitoreo de la calidad del aire en interiores usando las plataformas de Internet Wia y MessageBird. El sistema cuenta con una interfaz de usuario donde se muestran los valores de TVOC y eCO₂ monitoreados. Estos valores se almacenan en la nube del proveedor de servicios de IoT Wia, de tal forma que se transmite un mensaje de alerta cuando el valor de los parámetros anteriores llega al umbral configurado. La red tiene un alcance en la comunicación WiFi de 36 metros. Si es necesario aumentar esta distancia pueden usarse repetidores o ruteadores sin necesidad de modificar el diseño y operación de la red de monitoreo.

El sistema puede ser instalado en una variedad de interiores donde se requiera contar con un ambiente libre de contaminantes. La arquitectura de los nodos permite usar sensores para medir la cantidad de contaminantes en el exterior sin realizar cambios significativos. Sin embargo, para monitorear la calidad del aire en exteriores es recomendable usar una tecnología de comunicación inalámbrica de mayor alcance como LoRa (Long Range) o ZigBee, lo cual implica incorporar el transceptor correspondiente a los nodos de la red.

5. REFERENCIAS

- [1] M. A. Zaidan et al., "Intelligent Calibration and Virtual Sensing for Integrated Low-Cost Air Quality Sensors", *IEEE Sensors Journal*, Vol. 20, No. 22, pp. 13638-13652, Nov. 2020.
- [2] Hoja informativa sobre sustancias peligrosas, New Jersey Department of Health [en línea], disponible en: <https://www.nj.gov/health/eoh/rtkweb/documents/fs/0343sp.pdf>, sitio visitado en Enero de 2021.
- [3] Fichas Internacionales de Seguridad Química (ICSCs), Organización Mundial de la Salud-Comisión Europea [en línea], disponible en: http://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_card_id=21&p_edit=&p_version=2&p_lang=es, sitio visitado en Enero de 2021.
- [4] K. Permentier, S. Vercammen and S. Soetaert, "Carbon dioxide poisoning: a literature review of an often forgotten cause of intoxication in the emergency department", *International Journal of Emergency Medicine*, Vol. 10 [en línea], 2017, disponible en: <https://intjem.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12245-017-0142-y>
- [5] Dióxido de Carbono-Efectos en la Salud, Canadian Centre for Occupational Health and Safety [en línea], disponible en: https://ccsso.ca/oshanswers/chemicals/chem_profiles/carbon_dioxide/health_cd.html, sitio visitado en Febrero de 2021.
- [6] H. Zheng, Y. Cheng and H. Li, "Investigation of model ensemble for fine-grained air quality prediction", *China Communications*, Vol. 17, No. 7, pp. 207-223, July 2020.
- [7] E. Álvarez, J. Menéndez and J. Bravo, "Calidad del aire", Instituto Vasco de Competitividad, 2018, ISSN 2340-7638.
- [8] U. Jaimini, T. Banerjee, W. Romine, K. Thirunarayan, A. Sheth and M. Kalra, "Investigation of an Indoor Air Quality Sensor for Asthma Management in Children", *IEEE Sensors Letters*, Vol. 1, No. 2, pp. 1-4, April 2017.
- [9] Medidas para mejorar la calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de México, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Gobierno de México [en línea], disponible en: <https://www.gob.mx/comisionambiental/documentos/medidas-para-mejorar-la-calidad-del-aire-en-la-zona-metropolitana-del-valle-de-mexic>, sitio visitado en Febrero de 2021.
- [10] N. R. Jones, Z. U. Qureshi and Robert J., "Two metres or one: what is the evidence for physical distancing in covid-19?", *BMJ* [en línea], disponible en: <https://www.bmj.com/content/bmj/370/bmj.m3223.full.pdf>, sitio visitado en Marzo de 2021.
- [11] K. S. E. Phala, A. Kumar and G. P. Hancke, "Air Quality Monitoring System Based on ISO/IEC/IEEE 21451 Standards", *IEEE Sensors Journal*, Vol. 16, No. 12, pp. 5037-5045, June 2016.
- [12] D. B. Ramsay, J. A. Paradiso and S. Hamburg, "Making Air (Quality) Visible: Exploiting New Technology to Dramatically Improve Atmospheric Monitoring", *IEEE Pervasive Computing*, Vol. 17, No. 3, pp. 90-94, Jul.-Sep. 2018.
- [13] B. Liu et al., "A Sequence-to-Sequence Air Quality Predictor Based on the n-Step Recurrent Prediction", *IEEE Access*, Vol. 7, pp. 43331-43345, March 2019.
- [14] K. Gu, J. Qiao and W. Lin, "Recurrent Air Quality Predictor Based on Meteorology and Pollution-Related Factors", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 14, No. 9, pp. 3946-3955, Sept. 2018.
- [15] J. Huang et al., "A Crowdsourcing-Based Sensing System for Monitoring Fine-Grained Air Quality in Urban Environments", *IEEE Internet of Things Journal*, Vol. 6, No. 2, pp. 3240-3247, April 2019.
- [16] Y. Zhou, S. De, G. Ewa, C. Perera and K. Moessner, "Data-Driven Air Quality Characterization for Urban Environments: A Case Study", *IEEE Access*, Vol. 6, pp. 77996-78006, Dec. 2018.
- [17] Q. P. Ha, S. Metia and M. D. Phung, "Sensing Data Fusion for Enhanced Indoor Air Quality Monitoring", *IEEE Sensors Journal*, Vol. 20, No. 8, pp. 4430-4441, April 2020.
- [18] Z. Hu, Z. Bai, K. Bian, T. Wang and L. Song, "Real-Time Fine-Grained Air Quality Sensing Networks in Smart City: Design, Implementation, and Optimization", *IEEE Internet of Things Journal*, Vol. 6, No. 5, pp. 7526-7542, Oct. 2019.
- [19] E. Sharma, R. C. Deo, R. Prasad, A. V. Parisi and N. Raj, "Deep Air Quality Forecasts: Suspended Particulate Matter Modeling With Convolutional Neural and Long Short-Term Memory Networks", *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 209503-209516, Nov. 2020.
- [20] K. Zheng, S. Zhao, Z. Yang, X. Xiong and W. Xiang, "Design and Implementation of LPWA-Based Air Quality Monitoring System", *IEEE Access*, Vol. 4, pp. 3238-3245, June 2016.
- [21] J. Gao, Z. Hu, K. Bian, X. Mao and L. Song, "AQ360: UAV-Aided Air Quality Monitoring by 360-Degree Aerial Panoramic Images in Urban Areas", *IEEE Internet of Things Journal*, Vol. 8, No. 1, pp. 428-442, Jan. 2021.
- [22] Y. Wang and G. Chen, "Efficient Data Gathering and Estimation for Metropolitan Air Quality Monitoring by Using Vehicular Sensor Networks", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 66, No. 8, pp. 7234-7248, Aug. 2017.
- [23] D. Zhang and S. S. Woo, "Real Time Localized Air Quality Monitoring and Prediction Through Mobile and Fixed IoT Sensing Network", *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 89584-89594, May 2020.
- [24] L. Romo-Melo, B. Aristizabal and M. Orozco-Alzate, "Air-Quality Monitoring in an Urban Area in the Tropical Andes", *IEEE Potentials*, Vol. 37, No. 1, pp. 34-39, Jan. 2018.
- [25] M. A. Fekih et al., "Participatory Air Quality and Urban Heat Islands Monitoring System", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 70, pp. 1-14, Oct. 2021.
- [26] Norma Oficial Mexicana NOM-123-ECOL-1998-2009, Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, Gobierno de México [en línea], disponible en: <https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/1282/1/nom-123-semarnat-1998.pdf>, sitio visitado en Mayo 2021.