

Red de medida PM2.5 en un centro de datos

J. I. Vega Luna^{1*}, J. F. Cosme Aceves¹, G. Salgado Guzmán¹, V. N. Tapia Vargas¹, F. J. Sánchez Rangel¹

¹Área de Sistemas Digitales, Departamento de Electrónica, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Av. San Pablo 180, Col. Reynosa, C.P. 02200, Ciudad de México, México

*vlji@azc.uam.mx

Área de participación: Ingeniería Eléctrica y Electrónica

Resumen

Se presenta un sistema cuyo objetivo fue monitorear remotamente la concentración de partículas PM2.5 en un centro de datos. El sistema se implantó usando una red de cuatro nodos de monitoreo y un nodo central que usan transmisión inalámbrica de tecnología LoRa. El nodo central transmite periódicamente al servidor de la plataforma de IoT Wia dashboard la medida de PM2.5 en cada nodo, la cual se puede visualizar desde una interfaz de usuario. En caso de que la medida sea el valor de umbral, se transmite un mensaje de alerta a un teléfono móvil. Los resultados de las pruebas realizadas mostraron que el alcance de la red es 11.5 kilómetros con línea de vista. A partir de estos resultados se concluye que la red de largo alcance cubre la superficie de casi cualquier instalación donde se necesite monitorear sensores y procesos ubicados remotamente.

Palabras clave: Internet, LoRa, PM2.5, SMS.

Abstract

This paper presents a system whose objective was to remotely monitor the concentration of PM2.5 particles in a data center. The system was implemented using a network of four monitoring nodes and a central node using wireless transmission of LoRa technology. The central node transmits to the IoT Wia dashboard platform server via PM2.5 measurement on each node, which can be viewed from a user interface. In case the measurement is the threshold value, an alert message is transmitted to a mobile phone. The results of the tests carried out showed that the range of the network is 11.5 kilometers with line of sight. From these results, it is concluded that the long-range network covers the surface of almost any facility where it is necessary to monitor remotely located sensors and processes.

Key words: Internet, LoRa, PM2.5, SMS.

Introducción

La concentración de materia particulada o PM (Particulate Matter) se utiliza para indicar la calidad del aire y nivel de contaminación del ambiente. La materia particulada está compuesta de partículas pequeñas en estado sólido y líquido suspendidas en el aire que reciben el nombre por la medida de su diámetro expresado en micrómetros. Se presentan en diferentes tamaños de tal forma que algunas se pueden detectar a simple vista mientras que otras solo pueden verse usando un microscopio electrónico. Están formadas por una diversidad de elementos como ceniza, hollín, polvo, metal, polen, humo y cemento, entre otros. Las PM pueden clasificarse, considerando su tamaño, en tres tipos principales: 1) La gruesa, denominada PM10, cuyo diámetro aerodinámico es igual o menor a 10 μm o 10 micrómetros y mayor a 2.5 μm ; 2) La fina, llamada PM2.5, con diámetro aerodinámico igual o menor a 2.5 μm y mayor a 1 μm ; y 3) La ultra fina, denominada PM1.0, que tiene un diámetro aerodinámico igual o menor a 1 μm . Las dos últimas son 100 veces más delgadas que un cabello humano, son las más dañinas a la salud y tienen su origen principalmente en fuentes antropogénicas como por ejemplo las emisiones de vehículos diésel. Las PM10 se originan principalmente por fuentes naturales [1].

Debido al tamaño pequeño y la composición liviana, las PM 2.5 y PM1.0 pueden viajar en el viento a grandes distancias. Permanecen más tiempo en el aire que las más pesadas y son 100% respirables de tal forma que tanto el ser humano como los animales las inhalan. Esto posibilita que penetren por la nariz, se desplacen por la garganta y viajen profundamente a los pulmones pudiendo llegar hasta los alveolos o al torrente sanguíneo. Pueden causar tos, irritaciones, dolor de cabeza, opresión en el pecho, dificultad para respirar, enfermedades graves respiratorias, problemas cardiacos, derrames cerebrales e incluso muerte prematura [2].

Comúnmente, la medida de calidad del aire se indica como la concentración media, diaria y anual, de microgramos de partículas PM por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de aire. Las directrices publicadas por la Organización Mundial de la Salud (OMS) acerca de la calidad del aire en las ciudades, indican los niveles de PM máximos permisibles para evitar riesgos en la salud. Estas directrices han fijado estos niveles con los valores siguientes: 1) Para PM10, la media anual es $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y la media en 24 horas es $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$; y 2) Para PM2.5, la media anual es $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y la media en 24 horas es $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Con esta reducción de la contaminación, la OMS señala que se disminuyen en 15 a 20% las defunciones humanas [3, 4, 5].

Es difícil, o a veces imposible, evitar estas partículas en el exterior pero se puede medir su concentración para evitar riegos y tomar medidas precautorias. Para informar acerca de la contaminación y calidad del aire, en muchas ciudades se usa la medida de PM10. Sin embargo, recientemente algunas otras han optado por utilizar la medida de partículas suspendidas PM2.5, ya que es un indicativo más certero porque en su mayoría provienen de las emisiones de vehículos. De hecho, la OMS recomienda usar PM2.5 para señalar la concentración de partículas materiales en el ambiente [6, 7].

En la actualidad, se usan cinco técnicas principales para medir la concentración de partículas suspendidas en el ambiente: 1) La atenuación por radiación beta. Se basa en el uso de un elemento radiactivo, como el carbono 14, que emite electrones de alta energía, o rayos beta, sobre una muestra de aire para medir la atenuación de la señal de la radiación, determinando la masa de partículas PM; 2) La espectrometría de absorción ultravioleta. Mide la concentración de ozono en el aire usando la propiedad del ozono de absorber la radiación ultravioleta de un rango específico de longitud de onda; 3) La quimioluminiscencia, se utiliza para medir la concentración de bióxido de nitrógeno en el aire. Consiste en generar luz a partir de una reacción química reaccionado dos compuestos que al formar un tercero en estado excitado, o de alta energía, y retornar a su estado básico libera energía en forma de fotones de luz. La intensidad de la luz emitida es proporcional a la concentración del contaminante; 4) La espectrometría de absorción en el infrarrojo. Se emplea para determinar la cantidad de CO y se basa en la cantidad de radiación generada por la muestra al ser incidida por una fuente infrarroja; y 5) La dispersión láser. Se basa en la dispersión de un láser para radiar las partículas suspendidas en el aire y recolectar la luz radiada obteniendo la curva de cambios de luz en el tiempo [8].

Conforme la población del planeta crece, la calidad del aire en las grandes ciudades se ha convertido en un problema crítico. La contaminación del medio ambiente, particularmente por PM2.5, ha traído como consecuencia problemas en la salud humana. Esto ha dado origen a que las investigaciones realizadas en torno al estudio, análisis y prevención de este problema se concentren en tres líneas: A) Técnicas de medida y estimación más eficientes; B) Métodos para predicción de concentración de PM2.5; y C) Eliminación de PM2.5 [9]. En cuanto a la primera línea, los trabajos llevados a cabo se han basado en el uso de: radiación de terahertz (THz) y el espectro de absorción de partículas PM2.5 [10]; fotografías e imágenes, en lugar de usar métodos tradicionales basados en instrumentos, y similitud del gradiente y perfiles de distribución de valores de pixeles en el mapa de saturación [11]; redes neuronales para analizar efecto de emisión de contaminantes de industrias químicas y agricultura [12]; clusters de estaciones de monitoreo y plataformas de IoT en ciudades inteligentes [13]; la transformada wavelet y algoritmos de aprendizaje profundo considerando la no linealidad de la serie en el tiempo de la concentración de PM.25 [14]; la inferencia estadísticas no paramétrica de Friedman [15]; la profundidad óptica de

aerosoles (AOD) y espectroradiómetro de imágenes de baja resolución para medir la dispersión y absorción de luz visible por las partículas PM_{2.5} presentes en la atmósfera [16] y la interpolación espacial de medidas en lugares donde las estaciones de monitoreo son pocas, se encuentran distantes una de otra, tienen diferente resolución, escalas y densidades, extendiendo así la cobertura [17].

En referencia a la segunda línea de investigación, los trabajos realizados recientemente se basan en métodos determinísticos, estadísticos, geo-estadísticos, inteligencia artificial con aprendizaje de máquinas y redes neuronales. Los resultados de estos trabajos han sido modelos de predicción que utilizan: redes neuronales convolucionales [18]; comparación de imágenes capturadas con un teléfonos móviles y características de entropía en el dominio espacial y de la transformada [19]; modelos autorregresivo integrado de promedio móvil (ARIMA) [20]; modelo de regresión del uso de la tierra (LUR) y máxima entropía Bayesiana (BME) [21] y sensores remotos basados en satélites y profundidad óptica de aerosoles [22] y combinaciones de redes de aprendizaje profundo y la técnica de pesos de distancias [23]. En cuanto a las tecnologías creadas los últimos años para la eliminación y absorción de PM_{2.5}, se han desarrollado sistemas que emplean: hojas de grafeno y nano materiales [24]; retores de plasma de descarga de barrera dieléctrica (DBD) [25] y algoritmos para el suministro de energía eléctrica en base al nivel de concentración de PM_{2.5} [26], entre otros.

Un tipo de instalaciones específico donde es importante medir la calidad del aire en el ambiente son los centros de datos y laboratorios. A pesar de que los centros de datos cuentan con equipo de filtrado de aire, ventilación y enfriamiento, los remanentes de partículas PM_{2.5} y mayores, se acumulan en los gabinetes del equipo de cómputo y telecomunicaciones. A mediano plazo, este material puede interferir con la operación del equipo, causar calentamiento, que detenga su operación o inclusive que se dañe.

El desarrollo de este trabajo fue solicitado por una empresa operadora de centros de datos donde el objetivo planteado fue realizar un sistema de monitoreo periódico de PM_{2.5} en cuatro ubicaciones de la sala de equipos. Se requirió que el sistema: 1) Registre la medida de PM_{2.5} de cada ubicación; 2) No necesite cableado adicional ni utilice el existente en la sala de equipos; 3) Cuenten con una interfaz de usuario que pueda invocarse desde la Internet para monitorear en línea e históricamente el nivel de PM_{2.5} e indicar las coordenadas GPS de la ubicación de los nodos; y 4) Sea de tamaño compacto, precio económico y fácil de instalar y operar. En caso de que la medida de PM_{2.5} alcance el valor de umbral configurado, debe transmitirse un mensaje de alerta a un teléfono móvil. Para la conexión a la Internet existe un punto de acceso WiFi.

Considerando los requerimientos planteados, se llevó a cabo un sistema basado en una arquitectura de red de cuatro nodos de monitoreo y un nodo central los cuales usan transmisión inalámbrica de tecnología LoRa. Ambos tipos de nodos se diseñaron usando la tarjeta Pyboard. El nodo central se conecta a la Internet a través del punto de acceso WiFi para transmitir periódicamente y registrar en el servidor de la plataforma de IoT Wia dashboard la medida de PM_{2.5}. La interfaz de usuario reside en un servidor web implantado en el nodo central. El mensaje de alerta se envía a través de la plataforma de IoT Twilio.

Se ha realizado una cantidad importante de trabajos e investigaciones para medir concentración de partículas y calidad del aire con diversos propósitos y aplicaciones. Las aportaciones y beneficios del trabajo aquí presentado son las siguientes: 1) No existe hasta ahora una aplicación similar a la desarrollada, la cual resuelve una necesidad específica, real y actualmente está en operación; 2) La instalación y funcionamiento no interfiere con la operación, infraestructura ni medios de transmisión del centro de datos, ya que el medio de comunicación usado es inalámbrico; 3) Se usó una tarjeta PyBoard de última tecnología y precio accesible la cual no requiere un sistema operativo y ofrece mayor cantidad de recursos que otras de su tipo como Arduino o Raspberry; y 4) Se usaron plataformas de IoT en la nube de bajo costo y reciente creación que proporcionan el servicio para almacenar la información de los sensores y permiten que el responsable del centro de datos sea notificado inmediatamente de cualquier eventualidad.

Metodología

La metodología usada para la implantación del sistema fue dividir la red de monitoreo en cuatro nodos sensores y un nodo central. A continuación, se diseñaron los nodos y posteriormente se eligieron los componentes adecuados para su desarrollo.

Los nodos sensores

La arquitectura de los nodos sensores está compuesta por cuatro elementos: la tarjeta Pyboard, el sensor PM2.5, el módulo GPS y el transceptor LoRa, como se indica en la Figura 1.

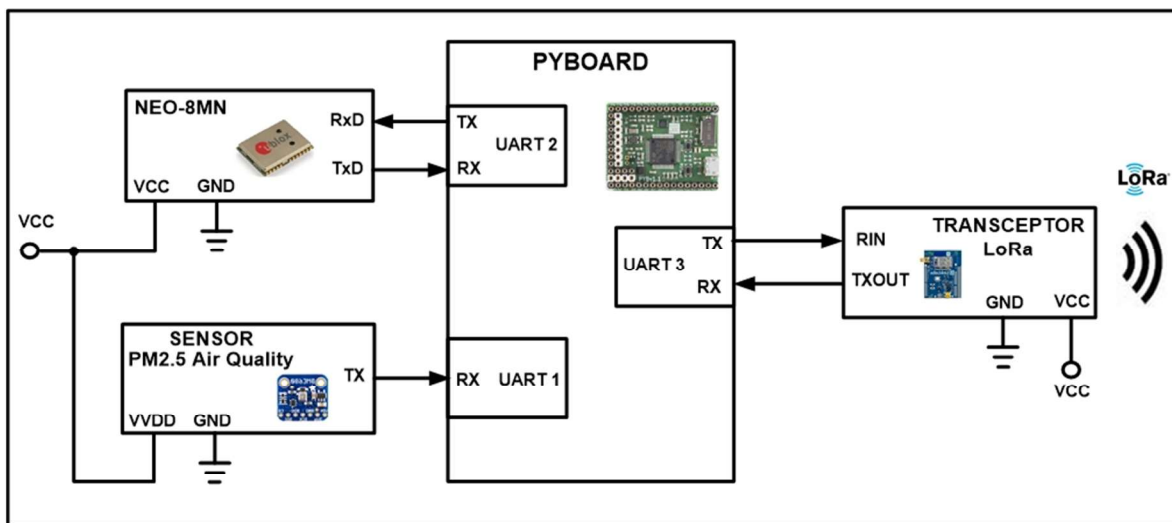


Figura 1. Arquitectura de los nodos sensores.

La tarjeta PyBoard PYBV1.0 es una de las más usadas en su tipo para ejecutar programas realizados en Micropython. Cuenta con los siguientes recursos hardware: microcontrolador STM32F405RG con CPU Cortex M4 de 168 MHz y punto flotante, puerto USB, memoria flash ROM de 1024 KB, memoria RAM de 192 KB, ranura para tarjeta Micro SD, acelerómetro de 3 ejes (MMA7660), reloj de tiempo real, 29 terminales de entrada/salida de propósito general, 3 convertidores analógico/digital de 12 bits, 2 convertidores digital/analógico de 12 bits, 2 puertos UART, 2 puertos I²C, 4 puertos USART, programa de bootloader para actualización del firmware y se alimenta con 3.3 V.

El sensor de PM2.5 usado es el dispositivo Adafruit PM2.5 Air Quality. El funcionamiento de este dispositivo se basa en la técnica de dispersión láser. Integra un microprocesador que usa los cambios de luz para determinar el diámetro equivalente y cantidad de partículas con diámetro diferente por unidad de volumen. El sensor PM2.5 Air Quality cuenta con tres terminales principales. La primera es para la alimentación de 5 V, las segunda para tierra y la tercera, TX, es la salida serie mediante la cual entrega el resultado, cada segundo, de la medida de concentración de partículas a una velocidad de 9,600 bps. La terminal TX se conectó a la entrada RX del puerto UART1 de la tarjeta Pyboard. Este sensor proporciona la concentración de partículas PM1.0, PM2.5 y PM10 en unidades estándares, o (μ/m^3), y ambientales así como la cantidad de partículas de tamaño 0.3 μm , 0.5 μm , 1.0 μm , 2.5 μm , 5.0 μm y 10 μm por cada 0.1 L de aire. La rutina de lectura de la información anterior no requirió bibliotecas adicionales a las que integra Micropython.

Para obtener las coordenadas de ubicación geográfica de los nodos sensores se utilizó el módulo NEO-8MN. Este módulo cuenta con antena de cerámica integrada, proporcionando el valor de los parámetros medidos en forma serie por medio de uno de los siguientes tipos de puertos: UART, USB, I²C y SPI. Se alimentó con 3.6 V, consume menos de 21 mA y tiene una precisión de 2.5 metros. Se usó el puerto UART2 de la tarjeta Pyboard para acceder al NEO-8MN. La información

leída desde este módulo es a través de mensajes que siguen el protocolo NMEA, el cual es una especificación eléctrica y de intercambio de información, definida por la National Marine Electronics Association que se utiliza en la comunicación de dispositivos electrónicos de navegación marina como: anemómetros, sonares, giroscopios y receptores GPS. Cuenta con varios tipos de mensajes. El mensaje NMEA usado por el módulo NEO-8MN para indicar la ubicación y la hora, se denomina GPGGA y significa Global Positioning System Fix Data. Este mensaje se compone de 18 campos, entre los cuales se encuentran la ubicación y la hora. El intercambio de mensajes entre la tarjeta Pyboard y el NEO-8MN se realizó usando la biblioteca de funciones de código abierto MicropyGPS.

El transceptor inalámbrico utilizado en los nodos sensores es el dispositivo de tecnología LoRa LL-RXR-27. Este dispositivo es compatible con redes públicas LoRaWAN 1.0 y con redes privadas de área amplia. Usa las bandas de frecuencia de 915 MHz ISM u 868 MHz. Está compuesto por un DSP Semtech SX1276 y un microcontrolador de 32 bits Renesas R5F51116ADNE. El DSP SX1276 implanta la capa física usando modulación LoRa y el firmware del microcontrolador R5F51116ADNE implanta la pila de protocolos de red y la interfaz de comandos para la comunicación con el microcontrolador. Se alimenta con 3.3 V, consume menos de 1 μ A en reposo, 480 mA en transmisión y 40 mA en recepción. Cuenta con memoria flash de 256 KB, memoria RAM de 32 KB y utiliza una potencia máxima de transmisión de 23 dBm. La velocidad de transmisión RF del transceptor LL-RXR-27 es de 183 bps a 37.5 Kbps y la velocidad de transmisión del puerto serie UART es 115,200 bps. La comunicación entre el microcontrolador de la tarjeta PyBoard y este transceptor usa el protocolo maestro/esclavo. El microcontrolador realiza las funciones de maestro y el transceptor LL-RXR-27 es el esclavo, intercambiando paquetes de comando y paquetes de respuesta. El maestro envía paquetes de comando, mientras que el esclavo transmite paquetes de respuesta. El LL-RXR-27 de cada nodo de la LPWAN transmite la medida de flujo aire, las coordenadas GPS y la hora a la puerta de enlace de la LPWAN. El UART del LL-RXR-27 se conectó al puerto UART3 de la tarjeta PyBoard para llevar a cabo la comunicación serie.

Las funciones de los nodos sensores son las siguientes: leer cada 60 segundos el valor de PM2.5, obtener las coordenadas GPS del nodo y transmitir la información anterior, conjuntamente con la hora, al nodo central. Para llevar a cabo las funciones anteriores, la programación del microcontrolador se realizó en Python y realiza las tareas siguientes: 1) Configura los puertos UART e inicializa el sensor PM2.5, el módulo GPS y el transceptor LoRa; 2) Transmite el mensaje al nodo central para unirse a la red LoRa; 3) Arranca el temporizador de 60 segundos; y 4) Activa el modo de reposo o bajo consumo de energía. Cuando el microcontrolador recibe la interrupción del temporizador realiza la lectura del sensor Adafruit PM2.5 Air Quality y del módulo NEO-8MN; transmite al nodo central, por medio del transceptor LoRa, el valor de los parámetros leídos y retorna al modo de reposo. En la Figura 2 se indica el diagrama de flujo usado para realizar esta programación.

El nodo central

El nodo central está compuesto por la tarjeta PyBoard, el transceptor LoRa y la interfaz inalámbrica WiFi. La comunicación con los nodos de monitoreo la lleva a cabo por medio del transceptor LoRa LL-RXR-27 y para la conexión a la Internet usa el circuito TinySine WiFi Skin for PyBoard. Las tareas que realiza la programación de este nodo son las siguientes: 1) Configura el transceptor LoRa y la interfaz WiFi; 2) Entra a un ciclo en el que invoca la función que implanta la interfaz de usuario y espera la interrupción del UART al que se conectó el transceptor LoRa. La función que atiende la interrupción del UART se encarga de recibir la información de los nodos sensores y transmitirla al servidor de la plataforma de IoT Dashborad wia por medio de un mensaje. El mensaje contiene el identificador del módulo sensor, la medida de PM2.5, la fecha y la hora. En caso de que la medida de PM2.5 de uno o más nodos sensores alcance el umbral configurable, transmite al mensaje de alerta de WhatsApp usando la REST API de Twilio.

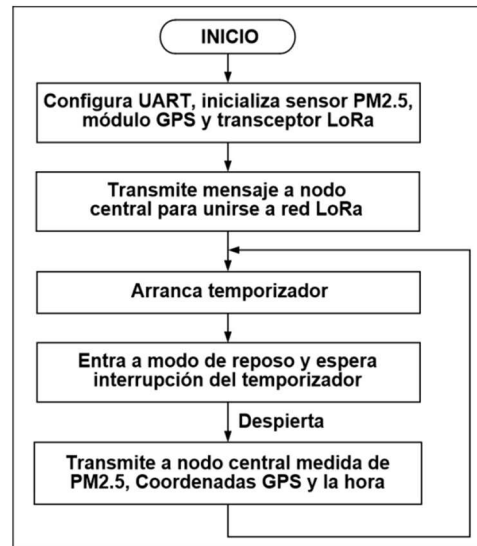


Figura 2. Diagrama de flujo usado en la programación de los nodos sensores.

La interfaz de usuario es una página creada con HTML mostrada por el servidor web. Éste accede la información registrada en el servidor de Wia dashboard. En la interfaz de usuario se visualiza en línea la medida PM2.5 de los nodos sensores, las coordenadas GPS de la ubicación, la fecha y la hora. La interfaz de usuario permite descargar a un archivo de texto la información histórica colectada por los nodos de la red y configurar el periodo de muestreo de medida de PM2.5 y el número de teléfono móvil. La implantación del servidor web se realizó usando la biblioteca de código abierto *uasyncio.start_server*. Esta biblioteca fue diseñada para realizar servidores web con microcontroladores, llamados *picowebs*, usando la cantidad mínima de memoria RAM.

Resultados y discusión

Se ejecutaron dos grupos de pruebas. El primer grupo tuvo como objetivo comprobar la exactitud de la medida reportada por el sistema. Para realizar estas pruebas, se utilizó un medidor del mismo tipo que el utilizado en la certificación de la operación de centros de datos para obtener el valor de PM2.5. Este valor se usó como referencia en las pruebas. La primera prueba fue comparar la medida reportada en la interfaz de usuario por un nodo sensor al interior del centro de datos, $10.19 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con la medida de referencia, $10.25 \mu\text{g}/\text{m}^3$. A partir de la segunda pruebas se ubicó el nodo sensor fuera del centro de datos para medir el nivel de PM2.5 en el ambiente y generando humo al quemar 20 distintos materiales. En cada una de las 20 pruebas existió una diferencia pequeña entre la medida de la interfaz de usuario y la de referencia, de manera tal que la exactitud fue en promedio de $\pm 0.59\%$.

El objetivo del segundo grupo de pruebas fue determinar el alcance de la red. El nodo sensor más lejano se ubica a 120 metros del nodo central y no se presentaron problemas de comunicación entre los nodos. Sin embargo, para obtener el alcance de la transmisión LoRa se ubicó un nodo sensor fuera del centro de datos a diferentes distancias del nodo central con línea de vista. Los resultados de las pruebas mostraron que el alcance logrado de la red es 11.5 kilómetros. A distancias mayores el enlace entre ambos nodos se perdió.

La cantidad de mensajes enviados a las plataformas Wia dashboard y Twilio permiten usar sin costo los servicios proporcionados por ambos proveedores. En caso de transmitir mayor cantidad de información deberá considerarse el uso de una licencia de mayor capacidad. Se pudo haber realizado la comunicación de los nodos sensores al central usando tecnología WiFi, no obstante, el alcance de la red hubiera sido mucho menor al logrado con tecnología LoRa.

Trabajo a futuro

El trabajo a realizar a corto plazo es incorporar a los nodos sensores medidores de humedad, temperatura y presión de gas del sistema de enfriamiento. La conexión de éstos a la tarjeta Pyboard será usando terminales de entrada GPIO, lo cual requerirá realizar adiciones sencillas en la programación de los nodos y en la interfaz de usuario. De manera similar, se ubicarán algunos nodos sensores fuera del centro de datos a una distancia de 15 kilómetros, para lo cual será necesario configurar nodos de la red que funcionen como repetidores LoRa.

Conclusiones

A partir de los resultados logrados se obtuvieron las conclusiones siguientes: 1) El alcance logrado permite usar el sistema desarrollado en ambientes o aplicaciones donde sea necesario monitorear sensores y procesos ubicados remotamente; 2) El alcance de 11.5 kilómetros, es mayor al que se puede alcanzar usando otras tecnologías inalámbricas tradicionales; 3) La instalación no es intrusiva, no necesita el uso de cableado adicional y 4) Los nodos de la red se alimentan con baterías que pueden durar varios años. Se usaron bibliotecas de funciones de código abierto y plataformas de IoT cuyo beneficio se reflejó en la reducción del tiempo de implantación y complejidad del sistema. Estas plataformas están respaldadas por servidores en la nube permanentemente disponibles, lo que trae como beneficio que el usuario del sistema no tenga que ocuparse de la instalación, mantenimiento y costos asociados a los servicios proporcionados.

Referencias

- [1] T. Mehmood, Z. Tianle, I. Ahmad and X. Li, "Integration of AirQ+ and particulate matter mass concentration to calculate health and ecological constraints in Islamabad, Pakistan", *16th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST)*, Islamabad, Pakistan, pp. 248-254, 2019.
- [2] N. Alattar and J. Yousif, "Evaluating Particulate Matter (PM2.5 and PM10) Impact on Human Health in Oman Based on a Hybrid Artificial Neural Network and Mathematical Models", *International Conference on Control, Artificial Intelligence, Robotics & Optimization (ICCAIRO)*, Athens, Greece, pp. 129-135, 2019.
- [3] F. H. Hung et al., "An Adaptive Indoor Air Quality Control Scheme for Minimizing Volatile Organic Compounds Density", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 22357-22365, 2020.
- [4] Organización Mundial de la Salud, "Directrices de la OMS sobre la calidad del aire de interiores: quema de combustibles en los hogares", Número de referencia OMS: WHO/FWC/IHE/14.01, 2014, disponible en: <https://www.who.int/phe/publications/indoor-air-quality/es/>.
- [5] Organización Mundial de la Salud, "Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre", Número de referencia OMS: WHO/SDE/PHE/OEH/06.02, 2006, disponible en: https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69478/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf?sequence=1.
- [6] U. S. Environmental Protection Agency, "Draft Integrated Review Plan for the National Ambient Air Quality Standards for Particulate Matter", 2016, disponible en: [https://yosemite.epa.gov/sab/sabproduct.nsf/264cb1227d55e02c85257402007446a4/EB862B233FBD0CDE85257DDA004FCB8C/\\$File/Draft+Integrated+Review+Plan+for+the+PM+NAAQS_CASAC+Review+Draft.pdf](https://yosemite.epa.gov/sab/sabproduct.nsf/264cb1227d55e02c85257402007446a4/EB862B233FBD0CDE85257DDA004FCB8C/$File/Draft+Integrated+Review+Plan+for+the+PM+NAAQS_CASAC+Review+Draft.pdf).
- [7] Diario Oficial de la Federación, "NORMA Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014, Salud ambiental. Valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM10 y PM2.5 en el aire ambiente y criterios para su evaluación", 2014, disponible en: <http://www.spabc.gob.mx/wp-content/uploads/2017/12/NOM-025-SSA1-2014.pdf>.
- [8] P. W. Oluwasanya, A. Alzahrani, V. Kumar, Y. A. Samad and L. G. Occhipinti, "Portable multi-sensor air quality monitoring platform for personal exposure studies", *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, vol. 22, no. 5, pp. 36-44, 2019.

- [9] L. Chen, Y. Ho, H. Hsieh, S. Huang, H. Lee and S. Mahajan, "ADF: An Anomaly Detection Framework for Large-Scale PM2.5 Sensing Systems", *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 5, no. 2, pp. 559-570, 2018.
- [10] H. Zhan et al., "Evaluating PM2.5 at a Construction Site Using Terahertz Radiation", *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 5, no. 6, pp. 1028-1034, 2015.
- [11] G. Yue, K. Gu and J. Qiao, "Effective and Efficient Photo-Based PM2.5 Concentration Estimation", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 68, no. 10, pp. 3962-3971, 2019.
- [12] J. Chang and C. Tseng, "Analysis of Correlation Between Secondary PM2.5 and Factory Pollution Sources by Using ANN and the Correlation Coefficient", *IEEE Access*, vol. 5, pp. 22812-22822, 2017.
- [13] S. Mahajan, H. Liu, T. Tsai and L. Chen, "Improving the Accuracy and Efficiency of PM2.5 Forecast Service Using Cluster-Based Hybrid Neural Network Model", *IEEE Access*, vol. 6, pp. 19193-19204, 2018.
- [14] W. Qiao, W. Tian, Y. Tian, Q. Yang, Y. Wang and J. Zhang, "The Forecasting of PM2.5 Using a Hybrid Model Based on Wavelet Transform and an Improved Deep Learning Algorithm", *IEEE Access*, vol. 7, pp. 142814-142825, 2019.
- [15] W. Hernandez, A. Mendez, R. Zalakeviciute and A. M. Diaz-Marquez, "Analysis of the information obtained from PM2.5 concentration measurements in an urban park", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Early Access Article, pp. 1-1, 2020.
- [16] X. Chen, H. Li, S. Zhang, Y. Chen and Q. Fan, "High Spatial Resolution PM2.5 Retrieval Using MODIS and Ground Observation Station Data Based on Ensemble Random Forest", *IEEE Access*, vol. 7, pp. 44416-44430, 2019.
- [17] M. Tang, X. Wu, P. Agrawal, S. Pongpaichet and R. Jain, "Integration of Diverse Data Sources for Spatial PM2.5 Data Interpolation", *IEEE Transactions on Multimedia*, vol. 19, no. 2, pp. 408-417, 2017.
- [18] T. Li, M. Hua and X. Wu, "A Hybrid CNN-LSTM Model for Forecasting Particulate Matter (PM2.5)", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 26933-26940, 2020.
- [19] K. Gu, J. Qiao and X. Li, "Highly Efficient Picture-Based Prediction of PM2.5 Concentration", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 4, pp. 3176-3184, 2019.
- [20] S. Chang, C. Chang, L. Li and S. Liao, "Reinforcement Learning for Improving the Accuracy of PM2.5 Pollution Forecast Under the Neural Network Framework", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 9864-9874, 2020.
- [21] J. He, G. Christakos and P. Jankowski, "Comparative Performance of the LUR, ANN, and BME Techniques in the Multiscale Spatiotemporal Mapping of PM2.5 Concentrations in North China", *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 12, no. 6, pp. 1734-1747, 2019.
- [22] Y. Sun, Q. Zeng, B. Geng, X. Lin, B. Sude and L. Chen, "Deep Learning Architecture for Estimating Hourly Ground-Level PM2.5 Using Satellite Remote Sensing", *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 16, no. 9, pp. 1343-1347, 2019.
- [23] J. Ma, Y. Ding, V. J. L. Gan, C. Lin and Z. Wan, "Spatiotemporal Prediction of PM2.5 Concentrations at Different Time Granularities Using IDW-BLSTM", *IEEE Access*, vol. 7, pp. 107897-107907, 2019.
- [24] Y. Chan, L. Xia, Y. Ren and Y. Chen, "Multi-scale modelling on PM2.5 encapsulation inside doubly-layered graphene", *Micro & Nano Letters*, vol. 10, no. 12, pp. 696-699, 2015.
- [25] X. Huang et al., "Investigation of the Arrayed Dielectric Barrier Discharge Reactor for PM2.5 Removal in Air", *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 44, no. 8, pp. 1341-1348, 2016.
- [26] S. Peng, H. Wang, Y. Zhang, D. Liu, J. Li and H. Ma, "Dispatch for Urban Integrated Heat and Power System Considering Secondary PM2.5 Under Smart Environmental Sensing", *IEEE Access*, vol. 7, pp. 179163-179184, 2019.