

Diseño de un Sistema basado en Internet de las Cosas para Monitoreo de Contaminantes de Aire

Design of an IoT- based System for Air Pollutants Monitoring

Olga De León, Bacherlor¹, Betzaida Cedeño, Bacherlor¹, Edwin Collado, PhD^{1,2,*}, Yessica Sáez, PhD^{1,2}, and Francisco Canto, MSc¹

¹Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá, {olga.deleon, betzaida.cedeno; edwin.collado, yessica.saez, francisco.canto}@utp.ac.pa

²Centro de Estudios Multidisciplinarios en Ciencias, Ingeniería y Tecnología-AIP (CEMCIT-AIP), Panamá

*Autor de correspondencia: edwin.collado@utp.ac.pa

Resumen— Panamá ha presentado un importante crecimiento en su población en los últimos años, principalmente debido a su desarrollo económico, turístico e industrial. Este crecimiento demográfico ha impulsado el desarrollo socioeconómico del país. Sin embargo, tanto el crecimiento demográfico y el crecimiento industrial, han producido consecuencias perjudiciales al incrementar los niveles de contaminación de suelo, agua y aire en este país. Siendo la contaminación del aire una de las más peligrosas debido a su rápida propagación y riesgo sanitario, instituciones y grupos ecológicos panameños buscan soluciones para el control de contaminación. En este artículo se propone un sistema de monitoreo remoto de contaminación de aire basado en redes IoT para brindar la información necesaria para determinar en tiempo real el nivel de contaminación en la región central de Panamá. Este sistema se visualiza como una herramienta tecnológica disponible al público que ayude a todos aquellos que se encargan del estudio ambiental y para la elaboración de planes de reducción de contaminación. El sistema propuesto consiste en pequeñas estaciones de monitoreo de contaminantes de aire distribuidas en las regiones más pobladas de Panamá. Cada estación está compuesta por sensores de contaminantes como O₃, CO, SO₂, entre otros; los cuales estarán conectados a un microprocesador que enviará los datos recolectados a una base de datos. Las componentes electrónicas y mecánicas del prototipo de estación fueron desarrolladas en por el equipo de investigación. El nivel de eficiencia de las mediciones fue validado utilizando el equipo comercial de medición de contaminación de aire AEROQUAL: Serie 500. Estas pruebas fueron realizadas en ambos escenarios: controlado en laboratorio y en campo. Los resultados ya procesados se mostrarán en una plataforma online que se encontrará a disposición del público. Entre los resultados esperados se encuentra la generación de datos y gráficas que muestren los niveles de contaminación en una región específica, así como también tablas donde se compara la cantidad de contaminación con respecto al tamaño de la población y/o diferentes regiones que se monitorean.

Palabras claves— Contaminación de aire, IoT, monitoreo ambiental, red de monitoreo, red de sensores

Abstract— Panama has presented an important population growth in recent years, mainly due to its economic, tourist and industrial development. This demographic growth has boosted the socioeconomic development of the country. However, both population growth and industrial growth have produced harmful consequences by increasing the levels of soil, water and air pollution in this country. Since air pollution is one of the most dangerous kind of pollution there are, due to its rapid spread and health risk, Panamanian institutions and ecological groups are looking for solutions to control it. In this article, a remote air pollution monitoring system based on IoT networks is proposed to provide the necessary information to determine in real time the level of pollution in the central region of Panama. This system is seen as a technological tool available to the public that helps to all those who are in charge of the environmental study and for the preparation of pollution reduction plans. The proposed system consists of small air pollutant monitoring stations distributed in the most populated regions of Panama. Each station is made up of pollutant sensors such as O₃, CO, SO₂, among others, which will be connected to a microprocessor that will send the collected data to a database. The electronic and mechanical components of the station prototype were developed by our research group. The level of efficiency of the measurements was validated using the commercial air pollution measurement equipment AEROQUAL: 500 Series. These tests were performed in both scenarios: controlled laboratory setting and the field. The results will be processed and displayed on an online platform that will be available to the public. Among the expected results is the generation of data and graphs that show the levels of contamination in a specific region, as well as tables where the amount of contamination is compared with respect to the size of the population and / or different regions that are monitored.

Keywords—Air pollution, IoT, environmental monitoring, monitoring network, sensor network

I. INTRODUCCIÓN

El rápido crecimiento económico, poblacional y tecnológico ha incrementado los niveles de contaminación en de aire en el mundo [1]. La exposición a los diversos contaminantes de aire puede desencadenar enfermedades graves como: cáncer de pulmón, neumopatía obstructiva crónica, infecciones respiratorias e incluso provocar la muerte. Por ejemplo, según la OMS, mueren aproximadamente siete

Digital Object Identifier (DOI):
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.160>
ISBN: 978-958-52071-8-9 ISSN: 2414-6390

millones de personas por año en todo el mundo debido a la exposición a las partículas finas contenidas en el aire contaminado [2].

A pesar de que Panamá presenta una calidad de aire aceptable, según AccuWeather Inc. [3], este país no escapa de sufrir afectaciones por la contaminación de aire, lo que resulta un riesgo para la salud de la población. Por esta razón, Panamá y otros países alrededor del mundo se han enfocado en el estudio y análisis de los agentes contaminantes de aire debido a que estos se esparcen rápidamente en áreas grandes, afectando directa e indirectamente a la salud humana, a los animales, a las plantas y/o a los materiales. Según los informes presentados por la Contraloría General de la República de Panamá, las emisiones de contaminantes atmosféricos (tm) en el país aumentaron rápidamente desde 2006 hasta 2015. Específicamente, el total de emisiones de contaminantes atmosféricos aumentó un 51.39% desde 2006 a 2015, en donde hubo un aumento del 52.19% en las emisiones a causa de fuentes móviles, un aumento del 13.09% en las emisiones a causa de fuente industrial y una disminución del 2.6% en las emisiones provenientes de fuentes de energía. De acuerdo con informes de la Contraloría General de la República de Panamá [4], estas emisiones de contaminantes atmosféricos están comprendidas por niveles de partículas sólidas en suspensión (PST; plomo, polvo, polen, etc.), óxidos de nitrógeno (NO_x), sulfatos (SO_x), monóxido de Carbono (CO) e hidrocarburos (HC), los cuales han sido considerados como los principales agentes contaminantes de aire por el Índice de Calidad del Aire de la Agencia de Protección Ambiental (Environmental Protection Agency's Air Quality Index) de los Estados Unidos de América [5]. En estos informes se presenta el inventario de emisiones atmosféricas en la República de Panamá por tipos de contaminantes, como se muestra en Fig. 1.

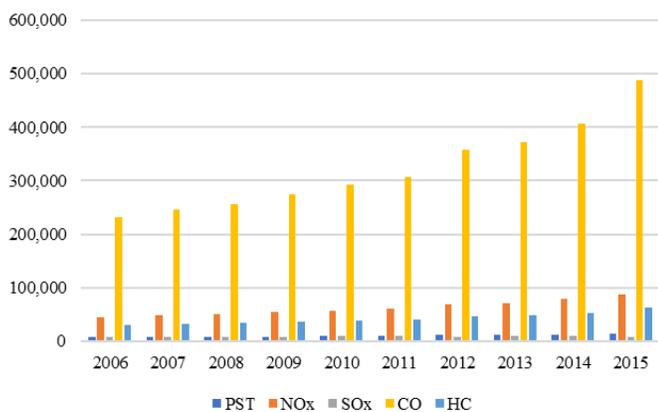


Fig. 1. Inventario de emisiones atmosféricas en la república por tipos de contaminantes [4].

En la Fig. 1, se puede observar que desde el 2006 al 2015 hubo un incremento en las emisiones para cada tipo de contaminante. Este aumento fue de 48.22% de emisiones para PST, 48.60% para NO_x, 6.15% para SO_x, 52.61% para CO y de 52.28% de emisiones de HC.

La Contraloría General de la República de Panamá, en colaboración con la Sección de Estadísticas de Vigilancia, Departamento de Epidemiología, Ministerio de Salud (MINSA) presentaron un informe donde durante los últimos 10 años en la República se observó un incremento significativo de casos reportados de enfermedades respiratorias (influenza, neumonía, infecciones agudas de las vías respiratorias, las enfermedades crónicas de las vías respiratorias inferiores y demás enfermedades del sistema respiratorio relacionadas a contaminación de aire) y muertes debido a enfermedades del sistema respiratorio, los cuales podrían estar fuertemente relacionados a agentes contaminantes en el aire [6].

El gobierno de Panamá, a través del Ministerio de Ambiente (MiAmbiente), ha intentado reducir los niveles de contaminación de aire mediante la creación de leyes y regulaciones que permitan controlar la emisión de estos contaminantes y proteger la salud de la población. Por ejemplo, las Normas Ambientales de Emisiones para Vehículos Automotores del Decreto Ejecutivo No. 38 del 3 de junio de 2009, buscan establecer los límites permisibles de emisiones vehiculares, los procedimientos para el control y seguimiento, así como las prohibiciones, infracciones y sanciones. Por otro lado, las Normas Ambientales de Emisiones de Fuentes Fijas, Decreto Ejecutivo No. 5 del 4 de febrero de 2009, buscan establecer los límites máximos permisibles de emisiones al aire producidas por fuentes fijas, las cuales incluyen edificaciones o instalaciones donde se realizan operaciones que dan origen a la emisión de contaminante al aire. Ambas normas ambientales tienen como fin proteger la salud de la población, los recursos naturales y la calidad del ambiente.

A pesar de los esfuerzos, la creación de leyes sin mecanismos que las supervisen muchas veces resulta en soluciones ineficientes para el control de contaminación. Por esto, muchos países desarrollados han optado por implementar sistemas inteligentes de monitoreo de contaminación remotos que permitan obtener indicadores en tiempo real sobre la contaminación de aire, para así fortalecer las leyes y apoyar a las instituciones públicas y/o privadas en la toma de decisiones que benefician a la población [7].

El rápido crecimiento de la tecnología ha permitido el desarrollo de soluciones tecnológicas basadas en tecnologías de comunicación inalámbrica e IoT [8]. Por ejemplo, el trabajo presentado en [9], propone un sistema de monitoreo de la calidad del aire ambiental en tiempo real. El sistema consta de varias estaciones de monitoreo distribuidas que se comunican de forma inalámbrica con un servidor, el cual recopila datos en tiempo real de las estaciones y los convierte en información entregada a los usuarios. Los autores en [10] presentan El objetivo principal de este proyecto es desarrollar un nodo multisensor de bajo costo para la medición de la contaminación del aire y desarrollar protocolos WSN para la recopilación de datos y el protocolo de agregación de datos. En [11], se presenta un sistema basado en IoT para monitorear

y pronosticar la tendencia de la contaminación del aire en tiempo real.

Hay evidencias de estudios relacionados a la contaminación del aire que brindan una herramienta eficiente y de bajo costo para monitorear diferentes contaminantes utilizando sensores electroquímicos. La gran ventaja de este tipo de sensores es que, aunque son dispositivos de bajo costo, son muy precisos y requieren de un mantenimiento y calibración poco frecuentes. En [12], los autores proponen una herramienta para supervisar la calidad del aire en interiores como oficinas, universidades, edificios públicos, colegios y otros, utilizando materiales de bajo costo y eficientes para que pueda ser usada en países en vía de desarrollo. En el desarrollo del proyecto utilizaron sensores de la familia MQ para medir dióxido de nitrógeno u óxido de nitrógeno (NO_2), dióxido de azufre u óxido de azufre (SO_2), formaldehído o metanal ($\text{H}_2\text{C}=\text{O}$), partículas sedimentables y monóxido de carbono (CO). También se estudiaron los niveles de partículas PM_{10} , partículas $\text{PM}_{2.5}$ y variables ambientales utilizando otros sensores. Los autores en [13], presentan el diseño, equipamiento y puesta en marcha de una estación de monitoreo de contaminación portátil y de bajo costo en el distrito de San Isidro, Lima, Perú. Los investigadores utilizaron el concepto de red neuronal artificial (RNA), empleando el algoritmo de Levenberg-Marquardt para obtener una velocidad de convergencia es rápida y minimizar velozmente la función de error. Los contaminantes estudiados fueron CO_2 , VOC (alcoholes, aldehídos, hidrocarburos alifáticos, aminas, hidrocarburos aromáticos, CH_4 , LPG, ketones y ácidos orgánicos), CO , SO_2 , Ozono y Dióxido de Nitrógeno ($\text{O}_3 + \text{NO}_2$) y algunas variables meteorológicas. También podemos citar el estudio realizado en el Instituto Universitario Aeronáutico de Córdoba, Argentina, el cual constaba de la integración de un sistema de monitoreo de calidad del aire con la red de Internet de las Cosas (IoT) con el fin de monitorear condiciones atmosféricas y cuantificar el grado de polución en el aire de una región o ciudad con la finalidad de recolectar y registrar datos para su procesamiento y así facilitar el acceso a la información [14].

En este artículo se propone un sistema de monitoreo remoto de contaminación de aire basada en IoT, el cual tiene como objetivo reforzar las leyes creadas sirviendo como herramienta dedicada a brindar información sobre los niveles de contaminantes atmosféricos en las regiones más pobladas de Panamá. Este proyecto consiste en desarrollar una red de estaciones que tomen muestras del estado del aire en un lugar y momento específico, mostrando los resultados en una plataforma online accesible para cualquier persona para ser posteriormente analizadas. Este sistema de monitoreo contará fundamentalmente con un servidor central encargado de recolectar y procesar información proveniente de todos los demás componentes conectados a él, un conjunto de estaciones con sensores para detectar las variaciones de los distintos parámetros ambientales y climáticos y un sistema de comunicación basado en IoT que permitirá el intercambio de

datos entre las estaciones y el servidor central, que a su vez puede compartir dicha información con otros sistemas y/o instituciones utilizando Internet. El uso de la tecnología IoT permitirá que los objetos sean sensados y/o controlados remotamente a través de la infraestructura existente de la red, creando oportunidades para una integración más directa del mundo físico en sistemas computarizados, y resultando en una mayor eficiencia, precisión y beneficio económico además de una reducción de la intervención humana.

El presente artículo va dirigido a presentar los avances más sobresalientes del proyecto y un enfoque en la parte de electrónica y programación de la estación de prueba, la cual es el primer prototipo desarrollado con la intención de realizar comparaciones entre los resultados obtenidos de los sensores utilizados y el equipo profesional certificado adquirido. El resto de este artículo está organizado de la siguiente manera. La sección II presenta la metodología, donde se describen las fases iniciales del proyecto y el modelo conceptual del sistema de monitoreo remoto de contaminación de aire. La sección III presenta un resumen de los resultados e impactos obtenidos en estas fases. Finalmente, la sección IV presenta las conclusiones.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

El proyecto consiste en desarrollar un sistema de monitoreo remoto de contaminación de aire basado en IoT para medir los niveles de contaminación y generar indicadores en el sector de conservación ambiental, que permitirán a instituciones públicas o privadas, centros educativos y centros de investigación acceder a la información a través de Internet desde sus oficinas de forma fácil, rápida y eficaz.

En la Fig. 2 se muestra el sistema propuesto para el monitoreo de la contaminación del aire en diferentes puntos de la República de Panamá.

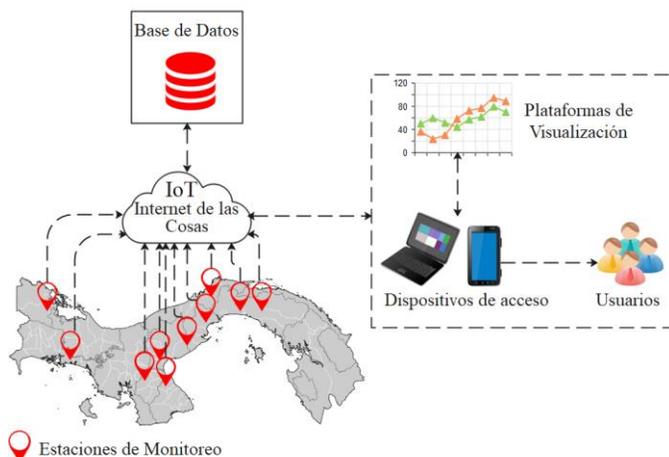


Fig. 2. Modelo conceptual de la red de monitoreo de contaminación del aire.

Tal como se observa, el sistema cuenta con estaciones de monitoreo de contaminación de aire distribuidas en diferentes regiones del país, donde la densidad demográfica es más alta. Cada estación está compuesta por múltiples sensores, que son dispositivos capaces de detectar magnitudes físicas o químicas, llamadas variables de instrumentación, y transformarlas en variables eléctricas [15]. Para este proyecto se utilizan sensores que miden los diferentes contaminantes seleccionados para el estudio de los niveles de ozono (O₃), partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5} (polvo, suciedad, hollín o humo), dióxido de sulfuro (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂), monóxido de carbono (CO), así como también temperatura y humedad relativa en el ambiente. En la Tabla 1 se presentan los contaminantes que se quieren monitorear y sus niveles promedio requeridos [16], además de los sensores seleccionados para cada uno.

Tabla 1. Lista de contaminantes del aire y su respectivo sensor tomados en cuenta en este proyecto [16].

Contaminante	Símbolo	Valores promedios		Tiempo promedio de muestreo	Sensor de detección usado
		µg/m ³	ppm		
Monóxido de Carbono	CO	10 000	9	8 horas	MQ-7
		30 000	26	1 hora	
Dióxido de Nitrógeno	NO ₂	100	0.53	Anual	CJMCU-4541
		150	0.08	24 horas	
Dióxido de Azufre	SO ₂	80	0.04	Anual	MQ-136
		365	0.19	24 horas	
Ozono	O ₃	150	0.08	8 horas	MQ-131
		235	0.12	1 hora	
Material Particulado Respirable	PM ₁₀	50		Anual	SDS011
		150		24 horas	
	PM _{2.5}	15		Anual	
65			24 horas		

Una vez culminada la medición, la información es temporalmente almacenada en el microcontrolador, el cual también forma parte de la estación de monitoreo. Además, los microcontroladores de cada estación se encargarán de enviar la información del punto de monitoreo a la nube IoT, donde se almacenará en una base de datos en el servidor y estará a disposición de la plataforma de visualización que se implementará para mostrar al público la información generada por el sistema en tiempo real a través de cualquier dispositivo con conexión a Internet.

La Fig. 3 muestra el diagrama de bloques de una estación de medición/monitoreo, donde se especifican los contaminantes y variables climáticas seleccionados para el estudio.

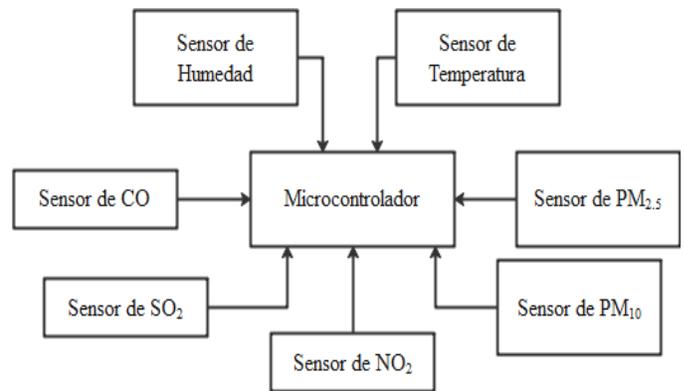


Fig. 3. Diagrama de bloques de una estación de medición.

El trabajo inicial se dividió en 3 fases, las cuales se ilustran en la Fig. 4.

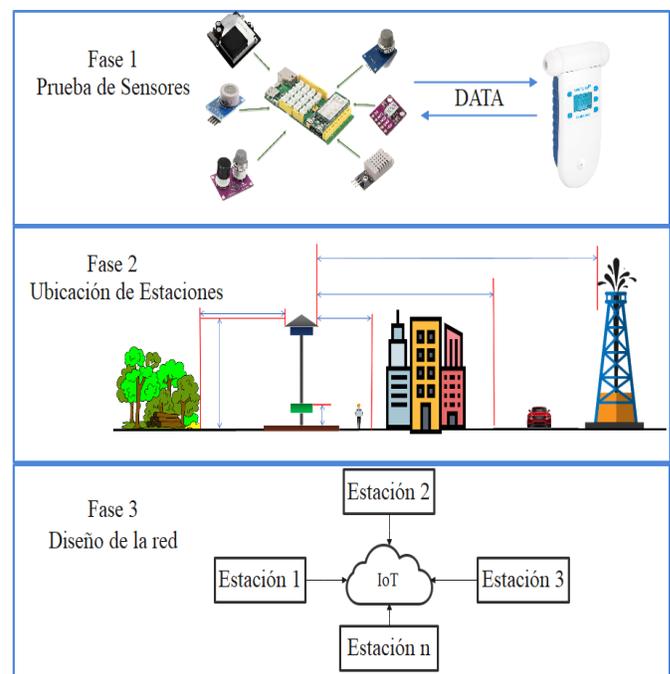


Fig. 4. Distribución de las fases del proyecto.

En la primera fase se diseñó e implementó el prototipo de la estación de monitoreo remoto de contaminación de aire con sensores presentados en Tabla 1. La segunda fase consistió en diseñar la carcasa que recubre el circuito con los sensores y su microcontrolador. Además, se evaluaron los lugares óptimos dónde colocar las estaciones en el área de estudio, tomando en cuenta las normas existentes que regulan la colocación de estaciones de medición. Por último, en la tercera fase se diseñó la red de comunicaciones IoT, en donde se conectan las estaciones a la red a Internet y así recolectar los datos generados por cada una de las estaciones en una base de datos, con la idea de posteriormente ordenarlas y presentarlas al público general.

En la fase inicial del proyecto, se hicieron comparaciones de los resultados obtenidos de las estaciones con sensores y los obtenidos con un equipo comercial de alta precisión para medir contaminación de aire llamado AEROQUAL: Serie 500 [17]. Este equipo comercial de medición fue de gran importancia dentro de la etapa de pruebas, ya que fue utilizada tanto para la comparación de los resultados de las mediciones como para la calibración de los sensores. Las lecturas obtenidas del AEROQUAL: Serie 500 fueron comparadas con las lecturas obtenidas en las estaciones en tiempo real, y dependiendo de los resultados se tomaron las medidas necesarias para mejorar el funcionamiento de la estación. Es importante mencionar que durante esta etapa las pruebas fueron realizadas en un laboratorio, en un entorno controlado a puerta cerrada y tomando en cuenta todos los niveles aceptables y el rango de sensibilidad de los sensores.

En la Fig. 5 se muestra el prototipo inicial de la estación de medición con los sensores captando los datos de CO, SO₂ y O₃, donde se está comparando los resultados con los datos obtenidos del AEROQUAL: Serie 500 para efectos de calibración y verificación del funcionamiento.



Fig. 5. Calibración de los sensores de monóxido de carbono, dióxido de azufre y ozono.

En la segunda fase, una vez validados los sensores en laboratorio, se procedió a realizar el diseño y construcción de la parte física del sistema, específicamente los circuitos electrónicos con sus respectivas carcassas. Las placas PCB de las estaciones de medición fueron diseñadas mediante el Software EasyEDA, el cual es un software gratuito para el diseño de circuitos impresos [18]. Dichos diseños fueron fabricados utilizando una máquina fresadora CNC. El diseño 3D de las carcassas para resguardar las placas fueron realizados mediante el Software Autocad e impresas con material PLA (ácido poliláctico) en una impresora PRUSA Mini [19]-[20]. La Fig. 6 muestra el diseño del PCB que contendrá el microcontrolador, sensores y algunos indicadores del correcto funcionamiento del sistema.

El prototipo del diseño 3D de la caja que contendrá el circuito impreso con los sensores consta del espacio suficiente para la distribución y buena colocación de estos y el microcontrolador, como se observar en Fig. 7.

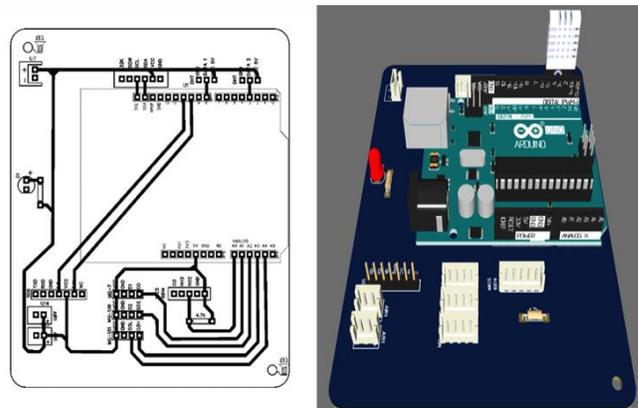


Fig. 6. Diseño del circuito impreso.

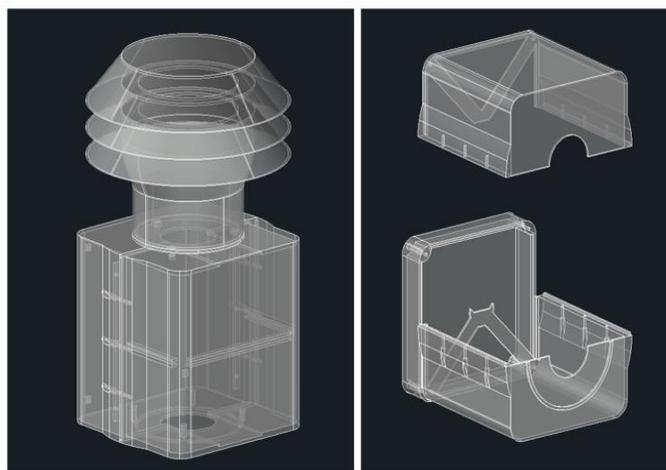


Fig. 7. Diseño 3D de la carcassa que cubre los sensores.

La carcassa fue diseñada de manera tal que la entrada y salida de aire estuviera correctamente cubierta para evitar la entrada de agua, insectos o cualquier material externo a la estación de monitoreo. La ubicación de la carcassa, así también como la altura a la que se encontrará la misma, es otro punto importante tomado en cuenta en este proyecto. Como se mencionó anteriormente, se tomaron en cuenta normas para la evaluación de diferentes puntos geográficos que cumplieran con los requisitos basados mayormente en el reglamento de los manuales de monitoreo atmosférico en México del Instituto Nacional de Ecología de México [21].

La construcción del prototipo de una estación de medición de contaminación tiene un costo aproximado de B/. 1,000.00, el cual incluye microcontroladores, sensores para los distintos agentes contaminantes, módulos de comunicación inalámbrica, módulos Real-Time Clock (RTC), insumos electrónicos, insumos para maquina CNC e impresora 3D, estructura, entre otros.

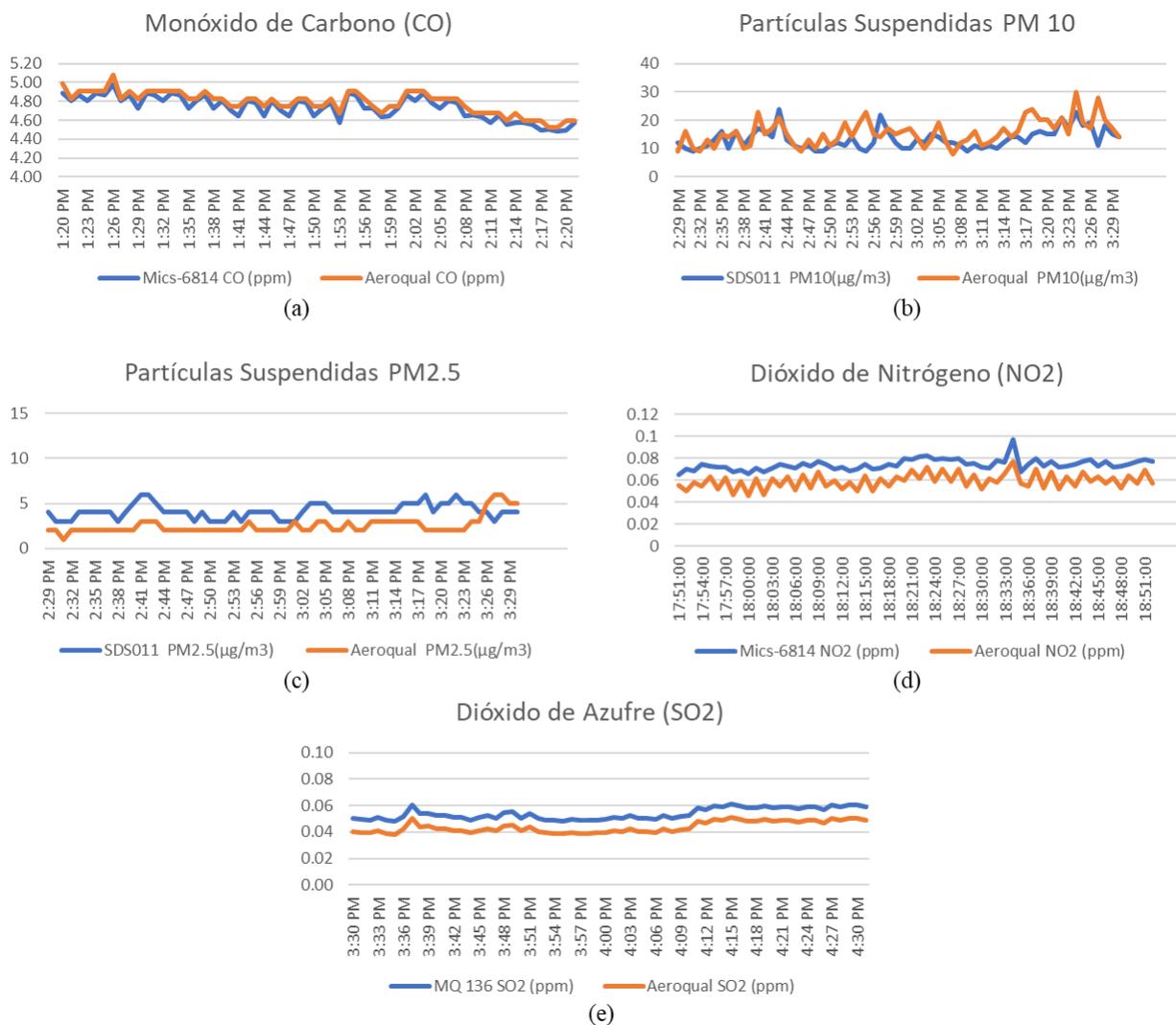


Fig. 8. Valores de (a) CO, (b) PM₁₀, (c) PM_{2.5}, (d) NO₂ y (e) SO₂ obtenidos por el sistema de monitoreo de contaminación propuesto.

III. RESULTADOS

En las pruebas realizadas en un entorno controlado, se obtuvieron resultados alentadores que demuestran el buen funcionamiento de prototipo desarrollado. Inicialmente, se utilizó una caja que contuviera los sensores de contaminantes deseados. Para una mejor comprensión de los resultados, los datos fueron exportados a EXCEL, donde se tomaron lecturas de CO, PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂ y SO₂ por un periodo de 12 horas.

La Fig. 8 muestra los valores obtenidos por las estaciones de medición y el equipo AEROQUAL: Serie 500 durante el tiempo de medición. Este periodo de muestreo y recolección de datos es de aproximadamente una hora para cada agente contaminante. Comparando con el AEROQUAL: Serie 500, se pudo observar que el sistema fue capaz de medir satisfactoriamente las variables de contaminación en esta etapa inicial del proyecto.

A continuación, la Tabla 2 muestra los valores promedios, el error absoluto (ϵ) y el error relativo (ϵ_r) de los datos obtenidos con la estación propuesta y el equipo de medición.

Tabla 2 Análisis de los datos obtenidos con la estación de medición propuesta y el equipo AEROQUAL: Serie 500.

Contaminante	Estación propuesta	AEROQUAL Serie 500	ϵ	ϵ_r
SO ₂ (ppm)	0.05	0.04	± 0.18	± 0.01
CO (ppm)	4.74	4.79	± 0.05	± 0.01
NO ₂ (ppm)	0.074	0.060	± 0.20	± 0.01
PM ₁₀ (µg/m ³)	13.29	15.5	± 2.20	± 0.14
PM _{2.5} (µg/m ³)	4.11	2.53	± 1.58	± 0.38

IV. CONCLUSIONES

La contaminación del aire es actualmente uno de los problemas ambientales más severos a nivel mundial, afectando la salud del ser humano en todas las sociedades sin importar el nivel de desarrollo socioeconómico. Por esa razón, es importante desarrollar un sistema de monitoreo de contaminación del aire que permita detectar los niveles de cada contaminante, y así poder ajustar las leyes y normativas relacionadas con el objetivo de buscar soluciones apropiadas para resolver el problema. En Panamá, no se cuenta con una herramienta tecnológica que permita medir y analizar en tiempo real datos de contaminación de aire. Por ello, nuestro proyecto presenta un impacto importante en los campos de telecomunicaciones y conservación de calidad de aire, ya que no solo permite a las instituciones a nivel nacional recolectar datos, sino también a la población en general que desea saber la calidad de aire en su región. El sistema de monitoreo de contaminación que se propone en este artículo promueve la utilización de sensores que tienen un correcto funcionamiento, reaccionan a cambios de concentración de forma rápida y tienen una vida útil suficiente para no ser cambiados hasta largo plazo. Además, el sistema se basa en una red IoT, lo cual es importante para obtener valores de mediciones en tiempo real, permitiendo a los usuarios conocer los niveles de contaminantes que se salen de control y así las empresas o instituciones que se encargan de regularlos puedan reaccionar de forma inmediata para disminuir las concentraciones. El trabajo presentado se encuentra en una etapa inicial, por lo que se considera como trabajo futuro la incorporación de sensores que permitan medir parámetros ambientales y el resto de los contaminantes requeridos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido desarrollado dentro del marco del proyecto macro ITE18-R2-011 titulado "Red de monitoreo basada en Internet de las Cosas (IoT) para la generación de indicadores de contaminación de aire en Panamá" financiado por la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación - SENACYT. Y. Sáez y E. Collado, agradecen al Sistema Nacional de Investigación (SNI) de Panamá por proporcionar financiamiento parcial para su participación en las actividades de investigación de este proyecto y en la elaboración de este artículo.

REFERENCIAS

[1] B. Chen and K. Haidong, "Air pollution and population health: a global challenge," *Environmental health and preventive medicine*, vol.13, no. 2, pp. 94-101, 2008.

[2] E. Martínez-López and P.A. Díaz-Valencia, "Respirar aire contaminado es tan nocivo como fumar cigarrillo", *Revista de Salud Pública*, vol. 17, pp. 365-378, 2015.

[3] AccuWeather Inc. Accessed on: December 2020. [Online]. Available: <https://www.accuweather.com/es/pa/panama-city/259549/air-quality-index/259549>.

[4] J. Branca, Asentamientos Humanos, Estadísticas Ambientales, Instituto Nacional de Estadística y Censo, Contraloría de la República de Panamá, April 02, 2018. Accessed on December 2020. [Online]. Available: https://www.inec.gob.pa/publicaciones/Default3.aspx?ID_PUBLICACION=861&ID_CATEGORIA=16&ID_SUBCATEGORIA=49

[5] M.C. Mirabelli, S. Ebelt, and S.A. Damon, "Air quality index and air quality awareness among adults in the United States," *Environmental Research*, vol. 183, p. 109185, 2020.

[6] F. Gutiérrez and V. De Vega, Estadísticas Vitales – Volumen III – Defunciones, Instituto Nacional de Estadística y Censo, Contraloría de la República de Panamá, October 06, 2017. Accessed on January 2020. [Online]. Available: https://www.inec.gob.pa/publicaciones/Default3.aspx?ID_PUBLICACION=833&ID_CATEGORIA=3&ID_SUBCATEGORIA=7.

[7] D. Mage et al., "Urban air pollution in megacities of the world," *Atmospheric Environment*, vol. 30, no. 5, pp. 681-686, 1996.

[8] W.Y. Yi, et al, "A survey of wireless sensor network-based air pollution monitoring systems," *Sensors*, vol. 15, no. 12 pp. 31392-31427, 2015.

[9] A. Kadri, et al., "Wireless sensor network for real-time air pollution monitoring," *1st International Conference on Communications, Signal Processing, and their Applications (ICCSPA)*, IEEE, pp. 1-5, 2013.

[10] B. Bathiya, S. Sanjay, and M. Biswajit, "Air pollution monitoring using wireless sensor network," *IEEE International WIE conference on Electrical and Computer Engineering (WIECON-ECE)*, IEEE, pp. 112-117, 2016.

[11] C. Xiaojun, X. Liu, and P. Xu, "IoT-based air pollution monitoring and forecasting system," *International Conference on Computer and Computational Sciences (ICCCS)*, IEEE, pp. 257-260, 2015.

[12] C.C. Avendaño, Prototipo de bajo costo para monitoreo de calidad del aire en ambientes interiores, Repositorio Institucional Universidad Piloto de Colombia, February 07 2019. Accessed on January 2021. [Online]. Available: <http://repository.unipiloto.edu.co/bitstream/handle/20.500.12277/4880/00/005094.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

[13] A. Luna, A. Talavera, and L. Cano, Uso de sensores electroquímicos de bajo costo para el monitoreo de la calidad del aire en el distrito de San Isidro - Lima – Perú, Repositorio Institucional de la Universidad del Pacífico REDUP, 2017. Accessed on December 2020. [Online]. Available: <http://repositorio.up.edu.pe/bitstream/handle/11354/1845/DD1705.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

[14] E. Campoli Marciszack, Sistema de monitoreo de la calidad del aire integrado a IoT, Repositorio CRUC IUA, December 16 2016. Accessed on November 2020 [Online]. Available: <https://rdu.ia.edu.ar/>

[15] C. Guerrero and M. Nevárez, "Sistema automatizado para el control automático de las condiciones físicoquímicas de un acuario de peces tropicales", Doctoral dissertation, 2014.

[16] "Tabla NAAQS | EPA EE.UU.", EPA EE.UU., 2016. [Online]. Disponible: <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table>.

[17] Aeroqual. [Online]. Available: <https://www.aeroqual.com>.

[18] EasyEDA. [Online]. Available: <https://easyeda.com>.

[19] AutoDESK. [Online]. Available: <https://www.autodesk.com/products/autocad/overview>.

[20] PRUSA3D. [Online]. Available: <https://www.prusa3d.com/prusaslicer/>.

[21] "Manuales de monitoreo atmosférico en México," Instituto Nacional de Ecología de México. [Online]. Available: <https://sinaica.inecc.gob.mx/index.php>.