



# Diseño de un sistema de medición y monitoreo de variables asociadas a calidad del aire

*Erik Hernández Rodríguez, Alain Martínez, Olivier Schalm, Rosa Amalia González Rivero, Luis Hernández Santana*

## RESUMEN / ABSTRACT

Uno de los desafíos al desarrollo sostenible para los países subdesarrollados es el acceso a datos objetivos sobre el posible impacto de la contaminación del aire en la salud humana, la agricultura y el clima en sentido general. Por esta razón, se ha diseñado un sistema de bajo costo para la medición de parámetros asociados a calidad del aire, denominado HZS-GARP-AQ-03. El mismo se basa en hardware y software abierto, que combinados con sensores de bajo costo conforman un sistema de medición capaz de proveer información de valor para la toma de decisiones. En aras de asegurar la calidad mínima de la información obtenida, se han realizado experimentos de calibración, para la casi totalidad de los sensores integrados al sistema. El HZS-GARP-AQ-03, es un prototipo de concepto, con autonomía energética, que puede operar aislado o conectado a una plataforma de IoT, sus prestaciones han sido evaluadas a lo largo de varios meses en diferentes ubicaciones de la región central de Cuba.

**Palabras claves:** Sistema de monitoreo; sensores de bajo costo; software libre; hardware abierto, fiabilidad

*One of the most common challenges to sustainable development for underdeveloped countries is access to objective data on the possible impact of air pollution on human health and the climate. For this reason, a low-cost system has been designed for the measurement of variables associated with air quality, called HZS-GARP-AQ-03. It is based on open hardware and software, which, combined with low-cost sensors, make up a measurement system capable of providing valuable information for decision-making. To ensure the minimum quality of the information obtained, calibration experiments have been carried out for almost all of the sensors integrated into the system. The HZS-GARP-AQ-03 is a concept prototype, with energy autonomy, that can operate isolated or connected to an IoT platform, its performance has been evaluated over several months in different locations in the central region of Cuba.*

**Keywords:** Monitoring system; low-cost sensors; software free; open hardware; Reliability

**Design of a system for measuring and monitoring variables associated with air quality**

## 1. -INTRODUCCIÓN

Varios de los componentes presentes en el aire, así como los elementos derivados de estos por reacciones químicas, son causantes de numerosas enfermedades y variedad de padecimientos que ponen en riesgo la salud humana [1-4]. De ahí que conocer la calidad del aire que es respirado por la población sea una variable ampliamente investigada por diversas instituciones y organizaciones a nivel mundial y nacional. Entre las mismas, se puede destacar la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Agencia de Protección Ambiental (EPA) por sus siglas en inglés y en Cuba el Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA). Entre los compuestos más dañinos a la salud y el medio ambiente se pueden citar:

Recibido: 04/2023    Aceptado: 06/2023

dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), ozono (O<sub>3</sub>), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y las partículas en suspensión de tamaño 2.5 µm y 10 µm [5-7].

Una alternativa que ha surgido con fuerza en los últimos años gracias al desarrollo de la microelectrónica son los sistemas de monitoreo portátiles basados en sensores electrónicos de nueva generación. Estos pueden ser transportados en vehículos o personas facilitando información en tiempo real de pequeñas áreas o ciudades enteras a través de comunicación inalámbrica [8-14].

En Cuba, el proyecto, denominado “AIR@PORT: Low-cost decision support system to evaluate the impact of ships on the air quality in the port city Cienfuegos”, buscó ahondar en la metodología de desarrollo de nodos sensores a partir de hardware computacional abierto y sensores de bajo costo disponibles en el mercado, los que con una correcta calibración puedan aportar información valiosa para la toma de decisiones. Este proyecto fue desarrollado entre la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas (UCLV) y la Academia Marítima de Amberes (Antwerp Maritime Academy), financiado por el Flemish Interuniversity Council (Vlaamse Interuniversitaire Raad (VLIR).

Una vez puesto en contexto las condiciones en la cual se desarrolla esta investigación surge la siguiente interrogante: ¿Cómo contribuir al monitoreo de contaminantes asociados a la calidad del aire en entornos urbanos o rurales, mediante el uso de sistemas de medición de bajo costo?

El enfoque basado en la posibilidad de uso de plataformas de cómputo de bajo costo, sensores disponibles en el mercado y una adecuada calibración se puede obtener un sistema de medición de variables asociadas a la calidad del aire similar en prestaciones a los disponibles en la actualidad en el mercado hace que se plantee el siguiente objetivo general: Diseñar un prototipo de bajo costo para la medición de los contaminantes asociados a calidad del aire, capaz de operar tanto en entornos urbanos como rurales.

Las contribuciones científicas fundamentales que se hacen en este trabajo son: una metodología ingenieril para la concepción de un sistema de medición y monitoreo de las concentraciones de gases que afectan la calidad del aire. Descripción de procedimientos de bajo costo para la calibración de varios de los sensores empleados.

## 2.- MATERIALES Y MÉTODOS

Después de analizar varias de las propuestas documentadas y siguiendo la experiencia alcanzada en el desarrollo de este tipo de sistema [9, 12, 13], se procede a diseñar el nuevo prototipo de sistema de análisis de gases, satisfaciendo de manera efectiva un conjunto de requerimientos (Ver Figura 1). Para desarrollar el sistema se establecen como pautas una serie de características que justifican la selección de los elementos de la arquitectura hardware propuesta, estas son mencionadas a continuación:

- Flexibilidad para integrar varios tipos de sensores
- Uso de sensores calibrados
- Capacidad de comunicación con sistemas de supervisión IoT
- Empleo de múltiples técnicas de filtrado de datos
- Intervalos de muestreo configurables
- Alta capacidad de almacenamiento de datos
- Autonomía y portabilidad

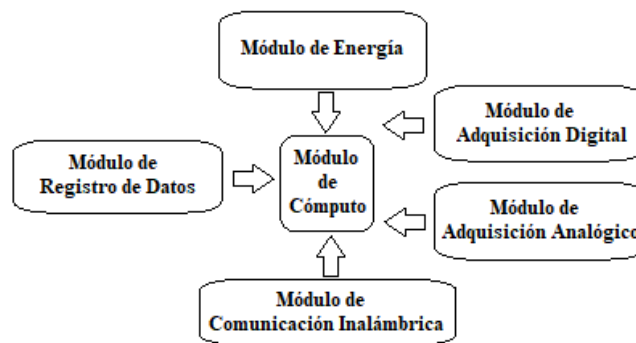


Figura 1

Diagrama de componentes del sistema de análisis de gases.

Esta investigación es considerada una evolución de los sistemas precedentes. Aunque se mantiene como núcleo de la misma la placa Arduino Mega 2560 significativos cambios se han realizado en aras de aumentar la fiabilidad del sistema y exactitud de las variables encuestadas. Primeramente, la introducción de un módulo de comunicaciones que dota al sistema de comunicación inalámbrica. Brindándole la posibilidad al usuario de monitorear el comportamiento de las variables de manera remota. Esta solución de hardware es creada en dos direcciones. Una incluye el empleo de una plataforma IoT (Thingsboard) para su gestión en la cual debe existir comunicación Wi-Fi. La otra es la creación un servidor Web anidado dentro del propio dispositivo de comunicación con un set de posibilidades reducido, pero con herramientas imprescindibles las cuales son explicadas en el acápite dedicado a los resultados.

Desde el punto de vista energético este sistema cuenta con una arquitectura de ciclo completo. Esto significa que posee un mecanismo capaz de garantizar los procesos de carga y descarga de la batería, todo esto sin ser conectada a la red eléctrica y el sol como única fuente de energía.

Desde el punto de vista de software números algoritmos son implementados para su mejor gestión por parte del usuario. Este solo debe seleccionar los parámetros que desea medir y a partir de ahí puede seleccionar diversos análisis estadísticos como son máximo, mínimo, raíz media cuadrática de los datos solicitados. El software también es capaz de generar un registro de errores con la marca de tiempo en la cual ocurrieron estos eventos inesperados. Por último, es válido resaltar la mayoría de los sensores fueron sometidos a rigurosos procesos de calibración atendiendo a Norma Cubana [15] de la calidad del aire a escala local debido a las emisiones de contaminantes atmosféricos desde fuentes fijas.

Para validar la efectividad de una determinada tecnología, se deben presentar tanto argumentos racionales (credibilidad) como emocionales (confianza) para demostrar su correcto funcionamiento. Para los sistemas de bajo costo, esto significa que deben funcionar como se espera (en este caso también en un clima tropical), deben proteger sus datos, ser utilizados ampliamente por otros y demostrar experiencias positivas. Una serie de indicadores en los tres niveles fundamentales dígame dispositivo, sensores y datos fueron concebidos para la implementación de este sistema.

1. Nivel de dispositivo: Los componentes individuales, subsistemas y software desarrollado son integrados en un solo sistema sin tener conflictos internos. El sistema contiene suficiente memoria para almacenar y ejecutar el software desarrollado, además de no producir resultados incorrectos o inesperados. El software de código abierto está escrito de manera clara y concisa con suficientes comentarios para ser comprendido por otros ofreciendo la posibilidad de añadir mejoras cuando sea necesario. El sistema debe tener robustez suficiente para operar en ambientes hostiles donde la temperatura, humedad relativa y radiación solar durante prolongados periodos de tiempo. La carcasa protectora debe permitir la interacción con el ambiente monitoreado, mientras que asegure la protección del dispositivo contra las condiciones climáticas desfavorables y lluvias.
2. Nivel de sensores: Los sensores responden suficientemente rápido a los cambios medioambientales de interés para el usuario con suficientemente baja histéresis. Los sensores brindan la misma respuesta bajo idénticas condiciones con diferentes intervalos de tiempo. Cuando la medición se realiza varias veces los resultados obtenidos son esperados y los errores debido a ruido se consideran suficientemente pequeños. El proceso de calibración de los sensores es realizado en ambientes controlados y bajo procedimientos descritos en estándares de calidad. El método de calibración es efectivo cuando la respuesta del sensor muestra alta similaridad con la calibración realizada por el fabricante. Los sensores al encontrarse en contacto directo con el medioambiente deber ser suficientemente robustos para soportar estrés químico, vibraciones y condiciones climatológicas desfavorables.
3. Nivel de datos: La variación en los parámetros medidos son mayores que el límite de detección de los sensores y menores que el punto de saturación. Además, la resolución del sensor debe ser suficientemente alta para detectar sutiles cambios en el ambiente, aunque no sean de interés para el usuario. El nivel de la señal deseada es suficientemente alto que el ruido de fondo por lo que pequeños cambios en la tendencia no resulten de interés para el usuario. El sensor no generará respuestas que no poseen significado físico (drifts, cambios repentinos de monotonía). Estos comportamientos deben ser identificados y corregidos. Los datos obtenidos deben contener suficiente información relevante para responder problemas científicos de interés para el usuario. La estructura de los datos debe presentar un formato para ser leído por otros softwares (ejemplo Microsoft Excel).

## 2.1.- ARQUITECTURA DE HARDWARE PROPUESTA

El acelerado desarrollo de la microelectrónica y su producción masiva ha posibilitado la creación de sensores y dispositivos dedicados a la medición de elementos que afectan la calidad del aire. Estos sensores y hardware adicional como se ha mencionado inicialmente poseen diferentes principios de funcionamiento, tecnología y modo de ofrecer sus mediciones (analógica o digital). El nuevo sistema de medición de calidad del aire: HZS-GARP-AQ-03, se basa en una placa de desarrollo Arduino MEGA 2560 como sus predecesores. El sistema HZS-GARP-AQ-03 está integrado por los elementos mostrados en la Figura 2. El módulo de registro de datos (Adafruit Data Logger Shield R3) se sitúa directamente encima de la placa Arduino

MEGA 2560, haciendo coincidir sus pines. Su propósito es almacenar los datos provenientes de los sensores tras su procesamiento y con una marca con la hora y fecha al momento de ser adquiridos. El set de sensores cubre el espectro de variables requerido para una aplicación de calidad del aire. Todos los sensores son interconectados a la placa principal utilizando diferentes protocolos de comunicación serie (I2C, UART o SPI). El diseño presentado en la Figura 2, no se considera estático y han quedado disponibles varios grupos de entradas digitales y analógicas. Estos recursos permitirán incluir en el futuro nuevos sensores, por ejemplo: los que aportan variables meteorológicas.

El HZS-GARP-AQ-03 tiene como meta una mayor autonomía energética que sus predecesores, por lo que se incluyó un módulo compuesto por controlador con salida USB (5V 3Ah), batería (plomo/ácido 12V 7Ah) y panel solar (40W) para alcanzarla. De igual forma se decide ampliar la potencia de transmisión y capacidad de gestión del sistema inalámbrico se incluye un módulo NodeMCU V2. Este módulo permitirá la interconexión con la plataforma abierta de gestión de IoT Thingsboard, a través de los protocolos: MQTT y HTTP y permitirá un sistema de gestión local tipo web server.

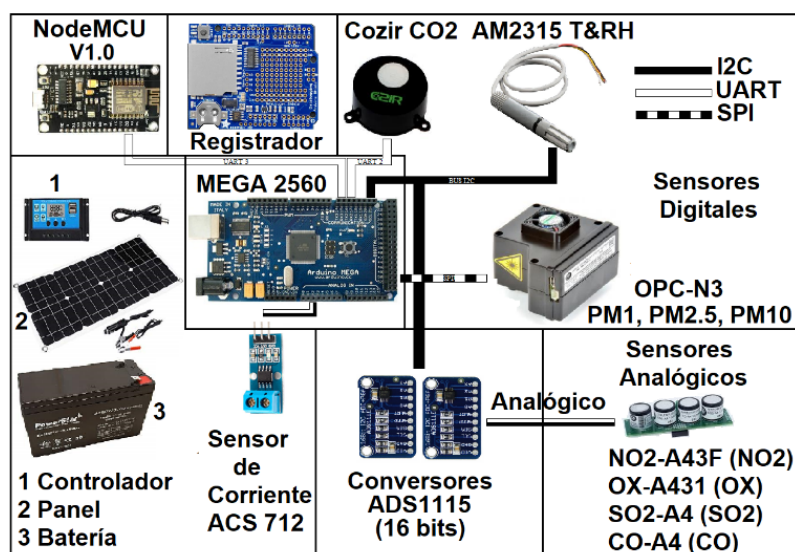


Figura 2

Diagrama de conexión del sistema.

En la Tabla 1 se muestra el consumo energético y precio de los elementos de hardware involucrados en el sistema. Con esta estructura el mismo puede ser desplegado en áreas donde no se dispone de fuentes alternativas de energía en periodos de varias semanas.

Tabla 1  
Requerimientos energéticos, precio y comunicación de los elementos conectados al sistema

Elemento a conectar	Comunicación	Consumo	Precio (€)
Sensor T/RH AM2315	I2C	3mA	18.00 €
Sensor CO <sub>2</sub> COZIR	UART	1mA	102.00 €
Sensor PM OPC-N3	SPI	180mA	280.00 €
Placa de acondicionamiento + 4 sensores	Analógica	21 mA	302.00 €
ADC ADS1115 x2	I2C	5mA	10.00 €
ACS712	Analógica	10mA	7.00 €
NodeMCU	UART	120mA	8.00 €
Arduino MEGA		50mA	17.00 €
Total		390mA	744.00 €

## 2.2.- SENSORES INTEGRADOS EN EL SISTEMA DE GASES

La Organización Mundial de la Salud (OMS) brinda un rango de valores donde se consideran normales las concentraciones de los contaminantes, mientras que la Norma Cubana NC 111:2014 [15] dictamina los tiempos de exposición para estos. Los sensores de gas normalmente operan midiendo la interacción electroquímica entre el material sensor y el contaminante (es decir, tecnologías electroquímicas u óxido de metal) o la absorción de luz en el rango visible. El material particulado se mide

por dispersión o absorción de luz, utilizando algoritmos para relacionar la señal atenuada con el tamaño y/o composición de las partículas [16]. En general la salida que ofrecen los diferentes tipos de sensores puede ser tanto digital como analógica. En el caso del prototipo de concepto desarrollado se seleccionaron sensores de la firma Alphasense [17], que proveen salidas analógicas en una razón aproximada de 1mV x ppb de concentración del contaminante de interés. Por esta razón se desestimó el uso de los conversores A/D presentes en el Arduino MEGA (de 10 bits) por no satisfacer los criterios de cuantificación requeridos por la aplicación, en su lugar se emplearon los ADS1115 de 4 canales de 16 bits. Los sensores electroquímicos tienen como desventajas una alta sensibilidad a la humedad y la temperatura, factores que deben ser compensados durante el proceso de medición. Es válido destacar que los sensores electroquímicos asociados a la medición de SO<sub>2</sub>, CO, O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, tienen una expectativa de vida útil de 2 años.

## 2.3.- PROCESO DE CALIBRACIÓN DE SENSORES

En el proceso de calibración de sensores se utilizó una configuración reducida de la arquitectura de hardware, garantizando un fácil y sencillo manejo, esto se puede apreciar en la Figura 3. La cámara de calibración posee 6,16L de capacidad y dentro de esta se colocaron los sensores a calibrar. Contiene además un ventilador de chasis de PC, para homogenizar el gas que se inyecta por la parte superior del recipiente, a través de una llave de paso de tres vías. La configuración incluye adicionalmente una bomba que permite la circulación del aire a través de todo el sistema, un frasco lavador de gases con una disolución de Ca(OH)<sub>2</sub>, perlas de NaOH, un frasco de vidrio con sílica gel, un ordenador y mangueras y conexiones auxiliares como muestra la Figura 3.

La reacción del CO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub> con el absorbedor inorgánico conduce a la formación de CaCO<sub>3</sub> y Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> y Ca(NO<sub>2</sub>)<sub>2</sub> respectivamente. En consecuencia, se remueven los gases del aire ambiente y se obtiene el punto cero de la curva de calibración.

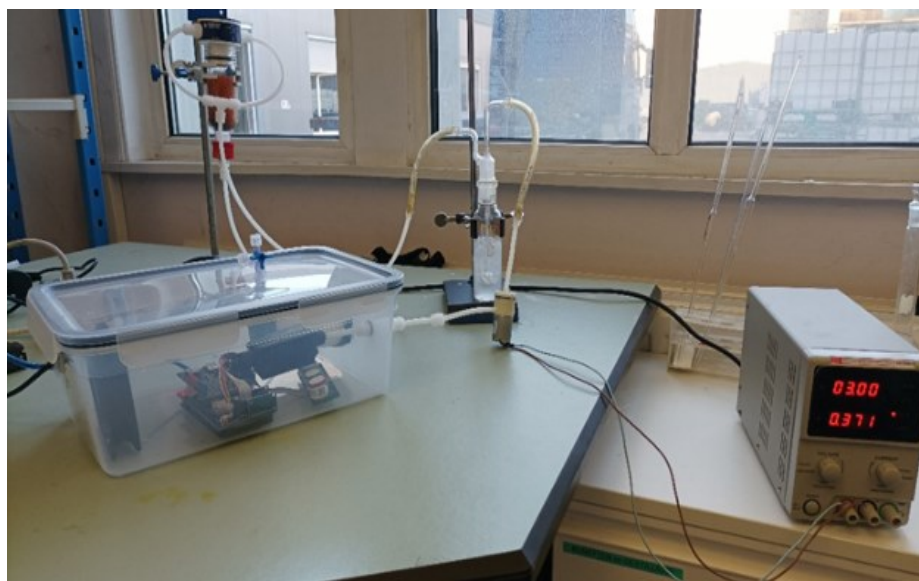
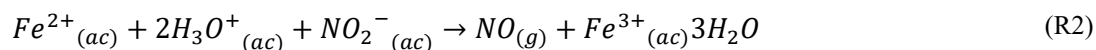
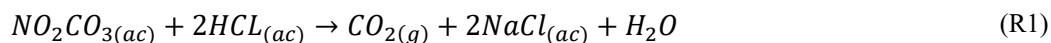


Figura 3

### Experimento de calibración de sensores con elementos de bajo costo.

Para obtener los gases CO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub> se utilizaron las reacciones químicas siguientes R1 y R2-R3. Los materiales necesarios fueron soportes universales, pinzas, jeringuillas, llaves de paso de tres vías y mangueras de 0,5 cm (diámetro exterior) x 0,4 cm (diámetro interior), tal como está descrito en [18, 19].



Una vez lograda la remoción de los gases del aire ambiente dentro de la cámara de calibración, volúmenes conocidos de los gases generados a microescala fueron inyectados. Finalmente, se graficó las concentraciones de referencia calculadas vs concentraciones registradas por los sensores, después de la inyección de los volúmenes con cantidades conocidas de cada gas y se obtuvieron los modelos matemáticos que mejor se ajustaban a los datos, estos modelos fueron los utilizados para corregir las lecturas de los sensores.

### 3.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Después de finalizar el ensamble del prototipo de concepto HZS-GARP-AQ-03 (Figura 4), cumpliendo con las exigencias impuestas, se pasa a realizar un conjunto de pruebas tanto de hardware como software que validen la propuesta de sistema para la medición de concentraciones de gases y otras variables que afectan la calidad del aire.



Figura 4

Vista interior del prototipo HZS-GARP-AQ-03.

### 3.1.- MONITOREO AMBIENTAL EN ZONA RURAL DE LA CIUDAD DE CIENFUEGOS, CUBA

Una vez que los sensores de bajo costo fueron calibrados a escala de laboratorio, se realizó el monitoreo ambiental de los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas en un sitio rural ubicado a 9 km al sur de la ciudad de Cienfuegos (22° 03' 55" N, 80° 28' 58" O), el cual se encuentra entre el Mar Caribe y la bahía de Cienfuegos.

El período de muestreo se realizó en la temporada seca, y estuvo comprendido entre los días 14 de marzo y 24 de abril del 2022 (Figura 5). La dirección del viento predominante en la zona es del este (E) [20]. El equipo de muestreo fue colocado en una de las instalaciones principales del Centro de Estudios Ambientales (CEAC), a una altura de 2 m sobre el nivel del terreno, según lo establece la NC 111:2014 [15] y se empleó una frecuencia de muestreo de dos minutos, acopiándose 27 866 datos de cada contaminante.

### 3.2.- MONITOREO AMBIENTAL EN ZONA URBANA DE LA CIUDAD DE SANTA CLARA, CUBA

La empresa se encuentra ubicada al norte de la ciudad en la principal arteria vehicular, la carretera Central, cuya zona es altamente poblada sin edificios altos ni espacios abiertos. El radio higiénico sanitario de la zona de estudio es de 300 m según lo establecido en la NC.1020, (2014) y la pluma de sus emisiones es rumbo sur debido a la dirección del viento predominante (norte). Esta fuente principal es una industria de recape de neumáticos; que sus principales emisiones se deben a las emisiones de gases y material particulado proveniente de su sistema de generación de vapor. La evaluación se realizó los días 4 – 6 de marzo de 2020 en un Consultorio Médico (C), (22° 40'36.78"N, 79 ° 97'58.19"W, ubicado en la pluma de dispersión de la fuente principal de la zona a 150 m de la misma. La frecuencia de muestreo empleada fue de 7 segundos acopiándose un total de 17871 muestras. Los resultados obtenidos están reflejados en Figura 6.

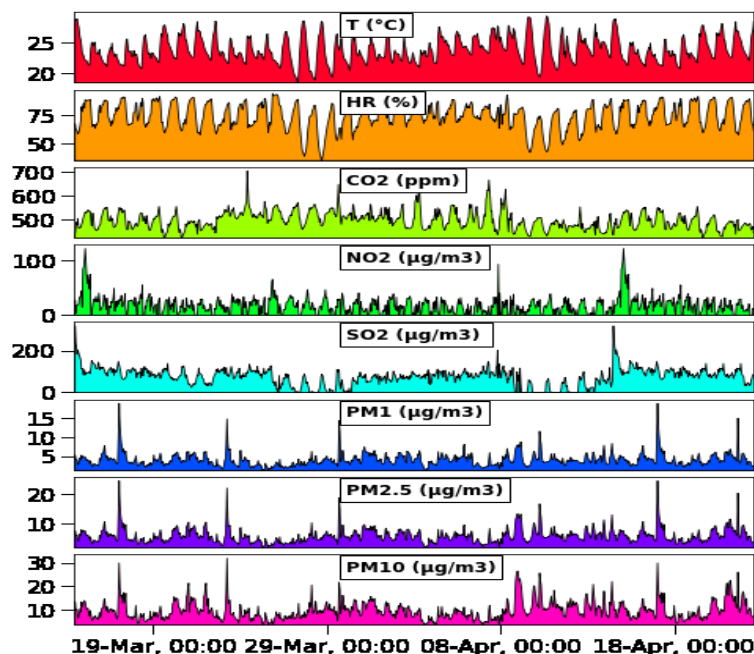


Figura 5

Campaña de monitoreo ambiental en una zona rural de la ciudad de Cienfuegos, Cuba.

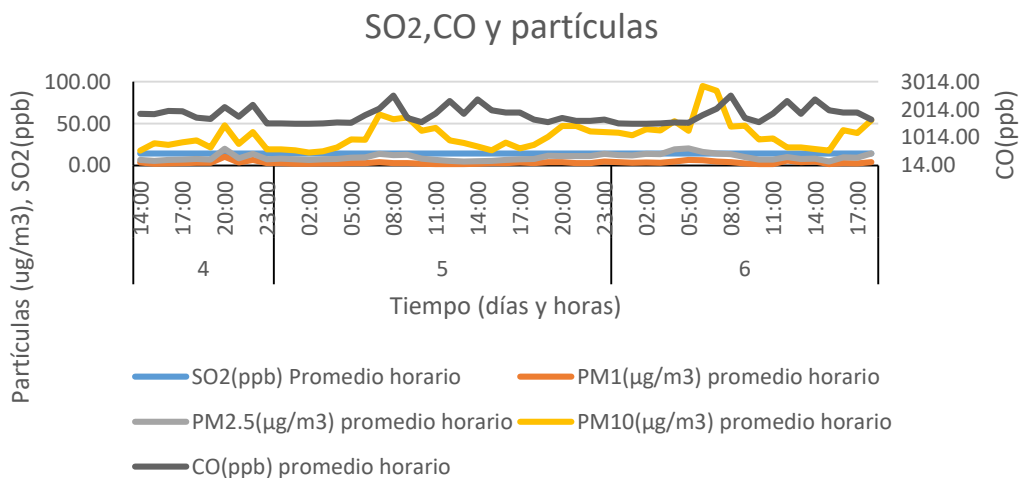


Figura 6

Campaña de monitoreo ambiental en zona urbana de la ciudad de Santa Clara, Cuba.

### **3.3.- PROCESO DE INSTALACIÓN DEL SISTEMA HZS-GARP-AQ-03**

El proceso de instalación del sistema es sencillo. Su colocación puede hacerse tanto en el plano horizontal como vertical a diferentes niveles de altura. Aspecto fundamental resulta conocer la dirección del viento, esto asegura medir con adecuada exactitud las variables relacionadas con las partículas en suspensión en sus distintos tamaños, así como los contaminantes gaseosos. Desde el punto de vista energético el sistema es conectado a la red eléctrica (110 V – 220 V) si existiese disponibilidad por conexión. Por otra parte, si se tratase de un lugar sin acceso a la red eléctrica, el módulo de energía específicamente el panel solar debe tener contacto directo con el sol, para su continuo proceso de recepción de luz solar. Una vez accionado el switch en posición encendido (ON) el sistema comienza su proceso de medición de manera autónoma.

### **4.- CONCLUSIONES**

El análisis de las variables asociadas a calidad del aire y los medios para su medición permitió hacer una selección de sensores que se considera adecuada para el soporte a la toma de decisiones. Se logró construir un dispositivo funcional con un costo inferior a los 1000 euros (despreciando costos de ingeniería). Las arquitecturas de hardware y software propuestas para el HZS-GARP-AQ-03 satisfacen las necesidades planteadas para el sistema y permiten un aumento de prestaciones en un futuro cercano mediante la inclusión de nuevos elementos. La validación del HZS-GARP-AQ-03 en ambiente urbano interior por un periodo de 45 días se considera exitosa, al no presentar ninguna anomalía en su operación y registrándose datos válidos. Solo se grafican los días del 4 – 6 ya que la industria de recape de neumáticos solo funcionó durante ese periodo, el resto mostró valores típicos de un ambiente limpio sin amplias interacciones con el exterior. La evaluación inicial del HZS-GARP-AQ-03 en ambiente rural exterior, demostró que el sistema era fiable como para operar en esas condiciones por un periodo de 30 días, sin apreciarse deterioro de los elementos que componen el sistema.

### **AGRADECIMIENTOS**

Los autores agradecen el apoyo financiero brindado mediante los proyectos: Global Minds BE2017GMHVLHC106 “A low-cost measuring device to directly monitor exhaust gases generated by fuel engines: Design, development, validation” y “Low-cost sensor system to improve decision support to evaluate the impact of the air quality”.

### **REFERENCIAS**

1. Tran VV, Park D, Lee Y-C. Indoor air pollution, related human diseases, and recent trends in the control and improvement of indoor air quality. *International journal of environmental research and public health*. 2020;17(8):2927.
2. Cuéllar Luna L, Maldonado Cantillo G, Suárez Tamayo S, del Puerto Rodríguez A, Romero Placeres M. Estratificación del riesgo de muerte por enfermedades no transmisibles asociado a la contaminación ambiental en Cuba. *Medisan*. 2021;25(6):1394-410.
3. Yang T, Liu W. Does air pollution affect public health and health inequality? Empirical evidence from China. *Journal of Cleaner Production*. 2018;203:43-52.
4. Miguel A, Almeida G, editors. *Calidad del aire y enfermedades respiratorias en La Habana, 2022*. conabreus2023; 2023.
5. Chen T-M, Kuschner WG, Gokhale J, Shofer S. Outdoor air pollution: nitrogen dioxide, sulfur dioxide, and carbon monoxide health effects. *The American journal of the medical sciences*. 2007;333(4):249-56.
6. Kinney PL. Interactions of climate change, air pollution, and human health. *Current environmental health reports*. 2018;5(1):179-86.
7. Guo J, Zhao M, Xue P, Liang X, Fan G, Ding B, et al. New indicators for air quality and distribution characteristics of pollutants in China. *Building and Environment*. 2020;172:106723.
8. Schneider P, Castell N, Vogt M, Dauge FR, Lahoz WA, Bartonova A. Mapping urban air quality in near real-time using observations from low-cost sensors and model information. *Environment international*. 2017;106:234-47.
9. Rodríguez EH, Schalm O, Martínez A. Development of a Low-Cost Measuring System for the Monitoring of Environmental Parameters that Affect Air Quality for Human Health. *ITEGAM-JETIA*. 2020;6(22):22-7.
10. Jo J, Jo B, Kim J, Kim S, Han W. Development of an iot-based indoor air quality monitoring platform. *Journal of Sensors*. 2020;2020.
11. Li H, Zhu Y, Zhao Y, Chen T, Jiang Y, Shan Y, et al. Evaluation of the Performance of Low-Cost Air Quality Sensors at a High Mountain Station with Complex Meteorological Conditions. *Atmosphere*. 2020;11(2):212.
12. Martínez A, Hernández-Rodríguez E, Hernández L, Schalm O, González-Rivero RA, Alejo-Sánchez D. Design of a low-cost system for the measurement of variables associated with air quality. *IEEE Embedded Systems Letters*. 2022.



13. Hernandez-Rodriguez E, Kairúz-Cabrera D, Martinez A, González-Rivero RA, Schalm O, editors. Low-Cost Portable System for the Estimation of Air Quality. The conference on Latin America Control Congress; 2023: Springer.
14. Hernández-Rodríguez E, González-Rivero RA, Schalm O, Martínez A, Hernández L, Alejo-Sánchez D, et al. Reliability Testing of a Low-Cost, Multi-Purpose Arduino-Based Data Logger Deployed in Several Applications Such as Outdoor Air Quality, Human Activity, Motion, and Exhaust Gas Monitoring. *Sensors*. 2023;23(17):7412.
15. NC NC. Calidad del aire - Metodología para modelar las afectaciones de la calidad del aire a escala local debido a las emisiones de contaminantes atmosféricos desde fuentes fijas. 2014.
16. Collier-Oxandale A, Feenstra B, Papapostolou V, Zhang H, Kuang M, Der Boghossian B, et al. Field and laboratory performance evaluations of 28 gas-phase air quality sensors by the AQ-SPEC program. *Atmospheric Environment*. 2020;220:117092.
17. Arroyo P, Gómez-Suárez J, Suárez JI, Lozano J. Low-Cost Air Quality Measurement System Based on Electrochemical and PM Sensors with Cloud Connection. *Sensors*. 2021;21(18):6228.
18. González Rivero RA, Schalm O, Alvarez Cruz A, Hernández Rodríguez E, Morales Pérez MC, Alejo Sánchez D, et al. Relevance and Reliability of Outdoor SO<sub>2</sub> Monitoring in Low-Income Countries Using Low-Cost Sensors. *Atmosphere*. 2023;14(6):912.
19. González Rivero RA, Morera Hernández LE, Schalm O, Hernández Rodríguez E, Alejo Sánchez D, Morales Pérez MC, et al. A Low-Cost Calibration Method for Temperature, Relative Humidity, and Carbon Dioxide Sensors Used in Air Quality Monitoring Systems. *Atmosphere*. 2023 2023/01/17;14(2):191.
20. Morera-Gómez Y, Elustondo D, Lasheras E, Alonso-Hernández CM, Santamaría JMJA. Chemical characterization of PM<sub>10</sub> samples collected simultaneously at a rural and an urban site in the Caribbean coast: Local and long-range source apportionment. 2018;192:182-92.

## CONFLICTO DE INTERESES

No existe conflicto de intereses entre los autores, ni con ninguna institución a la que cada uno está afiliado, ni con ninguna otra institución.

## CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

1. **Erik Hernández Rodríguez:** Conceptualización, Análisis formal, Investigación, Software, Validación - Verificación, Visualización, Redacción- borrador original.
2. **Alain Martínez:** Conceptualización, Análisis formal, Metodología, Validación - Verificación, Visualización, Redacción – revisión y edición.
3. **Olivier Schalm:** Conceptualización, Análisis formal, Metodología, Adquisición de fondos, Supervisión, Redacción – revisión y edición.
4. **Rosa Amalia González Rivero:** Conceptualización, Análisis formal, Investigación, Visualización, Redacción-borrador original.
5. **Luis Hernández:** Conceptualización, Análisis formal, Metodología, Adquisición de fondos, Supervisión, Supervisión.

## AUTORES

**Erik Hernández Rodríguez,** Ingeniero Automático, Máster en Ciencias, Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, Villa Clara, Cuba, ehrodriguez@uclv.cu, 0000-0003-3947-5487. Principales intereses de investigación: Diseño y evaluación de aplicaciones basadas en sistemas empujados. Desarrollo de aplicaciones basadas en lenguajes de alto nivel.

**Alain Martínez Laguardia,** Ingeniero Automático, Doctor en Ciencias, Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, Villa Clara, Cuba, amguardia@uclv.edu.cu, 0000-0002-6873-126X. Principales intereses de investigación: Diseño de sistemas embebidos y el desarrollo de vehículos autónomos, sus aplicaciones y técnicas de navegación. Actualmente trabaja en el tema de desarrollo de sistemas para medir la calidad del aire basados en sensores de bajo costo y hardware/software de código abierto.

**Olivier Schalm,** Se graduó como químico analítico en la Universidad de Amberes en 1994 y obtuvo su doctorado en 2021. Actualmente, es investigador de la Academia Marítima de Amberes, Bélgica, olivier.schalm@hzs.be; ORCID: 0000-0001-8705-7293. Investiga en la utilización de sensores de bajo coste en un contexto marítimo. Su investigación abarca la calidad

del aire y el monitoreo de movimiento, la visualización de datos y la traducción de mediciones de contaminantes en evaluaciones de riesgo para la salud humana en un contexto ocupacional y no ocupacional.

**Rosa Amalia González Rivero**, Licenciada en Química, Máster en Ciencias, Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, Villa Clara, Cuba, rogrivero@uclv.cu, 0000-0002-6905-4379. Principales intereses de investigación: Calibración de sensores de bajo costo para el monitoreo ambiental. Técnicas de análisis estadístico para el tratamiento de datos.

**Luis Hernández Santana**, Ingeniero Automático, Doctor en Ciencias, Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, Villa Clara, Cuba, luishs@uclv.edu.cu, 0000-0003-0558-3690. Principales intereses de investigación: Profesor Titular del Departamento de Automática de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la UCLV. Líder científico y fundador del Grupo de Automatización, Robótica y Percepción (GARP) de la UCLV. Ha recibido importantes premios y reconocimientos tanto a nivel nacional como internacional, relacionados con su labor científica. Premio Nacional de la Academia de Ciencias de Cuba. Ha dirigido importantes investigaciones en las universidades VUB, KULeuven y la Academia Naval de Amberes en Bélgica.



Esta revista se publica bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Sin Derivar 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)