

MEDICION DE VARIABLES MEDIOAMBIENTALES EN DIFERENTES ESCENARIOS

Agnes S. Nagy¹, Alicia Polanco Risquet², Daniel Henrríguez Rodríguez³, Omar Carralero Ibargollen⁴,
Osmanys L. Martínez de la Cotera Garciga⁵

^{1,2,3,4,5} Centro de Investigaciones de la Microelectrónica, CIME, Universidad Tecnológica de la Habana “José
Antonio Echeverría”, CUJAE, Cuba,

¹email: agnes.nagy@cime.cujae.edu.cu

²email: alicia.polanco@cime.cujae.edu.cu

RESUMEN

La contaminación ambiental es uno de los mayores problemas mundiales que afecta la salud humana. La Organización Mundial de Salud Pública anualmente publica un informe con estimaciones a nivel mundial sobre la exposición a la contaminación del aire y su repercusión para la salud, donde notificó que de cada nueve fallecimientos uno es debido a la exposición de la contaminación del aire en ambientes interiores y exteriores. Por estas razones, el desarrollo de sistemas para monitorizar la calidad de aire, tanto en el exterior como en el interior, es actualmente objeto de muchas investigaciones. En este trabajo se presentan dos redes inalámbricas de sensores para la monitorización de gases contaminantes del aire en dos escenarios diferentes; uno para el exterior, otro para recintos cerrados. Para cada escenario se fundamentan los requisitos de la red, teniendo en cuenta las características particulares de cada escenario y la utilidad práctica de los resultados de medición, la arquitectura que de allí se deriva para cumplir los requisitos, las componentes utilizadas para su construcción y los resultados obtenidos después de su implementación.

PALABRAS CLAVES: Contaminación ambiental, medición de variables medioambientales, redes inalámbricas de sensores.

MEASUREMENT OF ENVIROMENTAL VARIABLES IN DIFFERENT SCENARIOS

ABSTRACT

Environmental pollution is one of the biggest global problems affecting human health. The World Public Health Organization annually publishes a report with global estimates on exposure to air pollution and its impact on health, where it notified that of every nine deaths one is due to the exposure of pollution of air indoor and outdoor environments. For these reasons, the development of systems to monitor air quality, both outdoors and indoors, is currently the subject of much research. This paper presents two wireless sensor networks for monitoring air pollutant gases in two different scenarios; one for the outside, another for closed enclosures. For each scenario, the network requirements are established taking into account the particular characteristics of each scenario and the practical utility of the measurement results, the architecture derived from there to meet the requirements, the components used for its construction and the results obtained after its implementation.

KEY WORDS: Environmental pollution, measurement of environmental variables, wireless sensor networks

1. NTRODUCCIÓN

La contaminación ambiental es uno de los mayores problemas mundiales que afecta la salud humana. Aproximadamente 7 millones de personas mueren por año debido a enfermedades relacionadas con la contaminación del aire [1]. La Organización Mundial de Salud Pública anualmente publica un informe [2] con estimaciones a nivel

MEDICION DE VARIABLES MEDIOAMBIENTALES EN DIFERENTES ESCENARIOS

mundial sobre la exposición a la contaminación del aire y sus repercusiones para la salud, donde notificó que de cada nueve fallecimiento uno es debido a la exposición de la contaminación del aire en interiores y exteriores.

En el pasado se prestaba más atención a la contaminación atmosférica exterior, provocada en una pequeña fracción por emisiones de fuentes naturales, como las volcánicas y las geológicas, pero en la mayor parte causada por las actividades industriales, el uso de automóviles y otros medios de transporte, procesos de manufactura y combustión de la basura entre otros, produciendo diversas sustancias contaminantes, incluyendo gases y humo, como se muestra en la Fig. 1.



Figura 1: Fuentes de contaminación en el exterior.

Sin embargo, en los últimos años se han puesto de manifiesto las amenazas que representa la contaminación del aire en el ambiente interior, donde las personas permanecen durante intervalos de tiempo considerables; hogares, oficinas, industrias e instalaciones educativas. Está demostrado que el hombre urbano pasa el 80% de su tiempo en ambientes cerrados, contaminados en mayor o menor grado [3].

La entrada de contaminantes exteriores se produce a través del aire utilizado para la ventilación (natural, híbrida o mecánica), las infiltraciones por juntas, chimeneas, grietas, etc. (forzadas por las diferencias de presión debidas al viento y el gradiente térmico entre interior y exterior) o los cimientos del edificio. Como se observa en la Fig. 2, la diferencia entre los niveles de contaminantes del ambiente exterior e interior está en función del contaminante considerado [4].

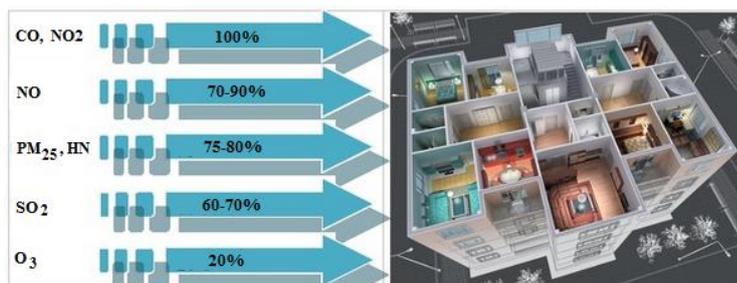


Figura 2: Diferencia entre los niveles de concentración en el ambiente exterior e interior.

Con el crecimiento de la población y de las fuentes de emisión de contaminantes, controlar la calidad del aire es un desafío cada vez mayor [5]. Por lo que el desarrollo de sistemas para monitorizar la calidad de aire, tanto en el exterior como en el interior, es actualmente objeto de muchas investigaciones reportadas [5]-[8].

En este trabajo se presentan dos redes inalámbricas de sensores para la monitorización de gases contaminantes del aire en dos escenas diferentes; uno para el exterior, otro para recintos cerrados. Para cada una de ellas se fundamentan los requisitos de la red, la arquitectura que de allí se deriva, las componentes electrónicas utilizadas en la construcción y los resultados obtenidos después de su implementación.

2. REDES DE SENSORES INALÁMBRICAS MEDIOAMBIENTALES

El concepto de redes de sensores surgió en las últimas décadas del siglo XX, y se conocían como redes de sensores distribuidos. Las investigaciones realizadas en este campo planteaban soluciones a problemas importantes asociadas

a las redes de sensores distribuidas [9], abriendo el camino al desarrollo de redes de sensores cableadas, e inalámbricas. Estas redes constituidas por sus nodos sensores son los pilares principales de una nueva forma de percibir el mundo que nos rodea, e interactuar con él.

Las redes inalámbricas de sensores (WSN, por sus siglas en inglés, *Wireless Sensor Network*) [10] consisten en un conjunto de nodos sensores, que están distribuidos físicamente en un área geográfica para monitorizar condiciones físicas o ambientales, con capacidad de almacenar y comunicar datos en una red de forma inalámbrica. Estas redes pueden tener arquitecturas muy diversas, dos de las cuales [11] se muestra en la Fig. 3.

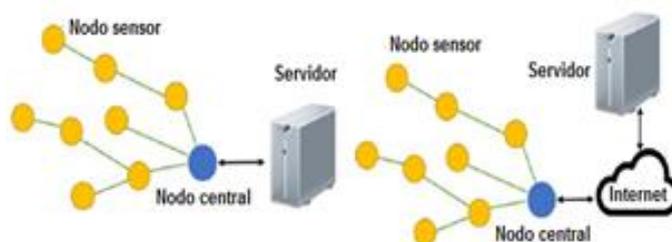


Figura 3: a) Arquitectura básica de WSN b) Arquitectura WSN utilizando Internet.

La arquitectura de la red inalámbrica de sensores debe cumplir con dos tipos de requisitos [11]: los requisitos generales y los específicos. Los requisitos generales, que todas las aplicaciones de redes inalámbricas de sensores deben cumplir, consisten en poseer organización, topologías dinámicas, heterogeneidad, movilidad, incorporación de los datos, escalabilidad, uso eficiente de energía y recursos limitados [12]. Los requisitos específicos de la red dependen del escenario particular de la aplicación.

El escenario de las dos aplicaciones que se presentan en este trabajo es el medioambiente: una de las aplicaciones tiene por objetivo proporcionar una herramienta base para el estudio del medioambiente en el exterior, mientras el de la otra aplicación es la medición de gases contaminantes del aire en recintos cerrados (*indoor*), para proteger la salud humana. Aunque las variables medioambientales a medir son similares, de la diferencia entre los escenarios (exterior e interior), se derivan arquitecturas diferentes, las cuales definen como es la estructura lógica y física de los componentes que integran la red y cómo estas interactúan entre sí, para lograr el objetivo en cada caso. Las aplicaciones aquí presentadas fueron desarrolladas e implementadas con dos nodos [13, 14]. Previendo la necesidad de ampliar estas aplicaciones, en ambos casos se tuvo en cuenta la escalabilidad de las redes tanto en número de sensores como en el número de nodos.

3. APLICACIÓN INALÁMBRICA DE SENSORES EN RECINTOS CERRADOS

En el pasado se prestaba más atención a la contaminación atmosférica exterior, que a la contaminación del aire en los interiores. Sin embargo, en los últimos años se han puesto de manifiesto las amenazas que representa la contaminación del aire en recintos cerrados donde las personas permanecen durante intervalos de tiempo considerables; hogares, oficinas, industrias e instalaciones educativas. La contaminación del medioambiente exterior influye en el medioambiente interior de los recintos cerrados, donde además se adicionan otros contaminantes, como las causadas por las cocinas alimentadas con leña y madera, por el uso de aromatizantes, el humo de tabaco y otros.

Más del 90% de la contaminación atmosférica es causada por los contaminantes primarios [15]. Estos contaminantes son:

- Monóxido de azufre (SO)
- Monóxido de carbono, (CO)
- Óxidos de nitrógeno (NOx)
- Amoníaco (NH₃)
- Compuestos Orgánicos Volátiles (COVEM)
- Partículas (aerosoles)

MEDICION DE VARIABLES MEDIOAMBIENTALES EN DIFERENTES ESCENARIOS

El monóxido de carbono que se genera por mala combustión de materiales fósiles en cocinas, hornos, calentadores, chimeneas, automóviles y calderas es un gas incoloro, insípido y sin olor, que no puede ser detectado por los sentidos humanos. En ocasiones se le llama el asesino silencioso [16], ya que solo puede ser descubierto con un dispositivo especial. Dados sus efectos dañinos sobre la salud, este es el gas que será medido en recintos cerrados en esta aplicación.

Requisitos de la aplicación

El objetivo de esta aplicación es la medición de la concentración del monóxido de carbono en recintos cerrados (*indoor*), para proteger la salud de las personas. Como los hogares, oficinas, industrias o instalaciones educativas poseen varios recintos, la red de sensores inalámbricos que se desarrolle tiene que ser capaz de brindar protección en cada uno de ellos. Por lo tanto, los requisitos que se deben cumplir para el escenario descrito son los siguientes:

- En cada recinto se debe:
 - a. Medir la temperatura, humedad relativa (imprescindibles para el medioambiente) y concentración de CO en intervalos de tiempo preestablecidos.
 - b. Visualizar los resultados de medición.
 - c. Emitir señal de alarma cuando se sobrepase la máxima concentración de CO admisible.
- Se deben recoger y almacenar con fecha y hora los valores medidos en cada local para:
 - a. Conocer la historia del comportamiento en cada local.
 - b. Verificar las condiciones ambientales en caso de enfermedad.
 - c. Calcular el valor medio de la concentración de CO horaria.
- Se debe brindar la posibilidad de obtener información a distancia.

Arquitectura

Los requisitos antes planteados implican para la arquitectura de la red que:

- Se debe colocar un nodo sensor en cada local. El despliegue de los nodos es determinístico, ya que se ubican en posiciones fijas.
- Todos los nodos sensores realizan las mismas tareas, de forma independiente.
- Se necesita un nodo central para procesar y almacenar los datos.
- Cada nodo sensor se debe comunicar con el nodo central.
- Se necesita una aplicación para la comunicación con el nodo central a distancia.

En base de lo antes planteado se obtuvo la arquitectura vertical, mostrado en la Fig. 4, donde se observa que cada nodo sensor solo brinda la información que corresponde al recinto donde se encuentra, sin que se comuniquen entre sí. A través de la comunicación con el nodo central se recibe y procesa la información de los nodos, la cual, utilizando un reloj de tiempo real (RTC), se almacena en la base de datos del nodo central con fecha y hora.

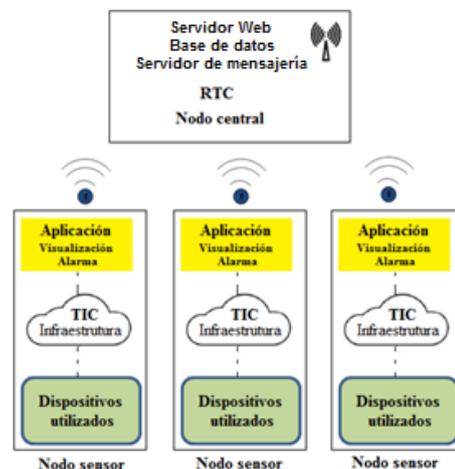


Figura 4: Arquitectura de la aplicación "indoor".

Componentes electrónicos utilizadas

Para la construcción de los nodos sensores se utilizó la plataforma de desarrollo Arduino Nano. Los nodos sensores son similares, pero tienen identificadores diferentes. Para la medición de la temperatura y humedad relativa se utilizó el sensor comercial DHT11 y para la concentración de CO el sensor de gas MQ-7. En los nodos se incorpora un módulo de visualización para los parámetros medidos por los sensores y alarma sonora para la máxima concentración admisible del monóxido de carbono. Para la comunicación WIFI del nodo sensor con el nodo central se utiliza el módulo ESP8266. La Fig. 5 muestra los componentes de los nodos sensores.

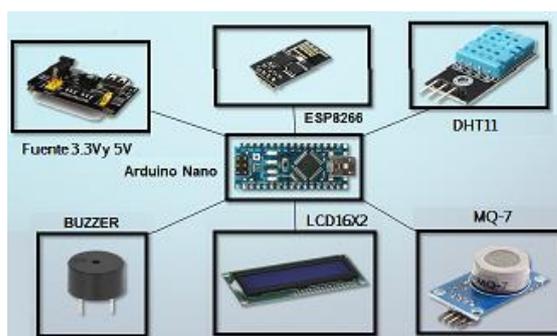


Figura 5: Componentes de los nodos sensores.

El nodo central está formado por la plataforma de placa única Raspberry Pi 3 B y tiene incorporado un RTC para mantener la fecha y hora en caso de cortes eléctricos. Los componentes del nodo central se muestran en la Fig. 6.

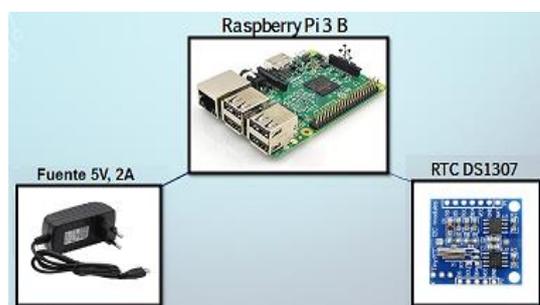


Figura 6: Componentes del nodo central.

La aplicación permite observar desde dispositivos móviles las lecturas y funcionamiento de los nodos sensores mediante una aplicación Android, además de acceder a la base de datos por vía Web.

Resultados

Las siguientes figuras confirman la obtención de los resultados esperados de esta aplicación. En la Fig. 7 se muestra uno de los nodos sensores en funcionamiento. La temperatura medida por el nodo puede ser comparado con el valor medido por un termómetro de mercurio. También se muestran los datos enviados por el nodo, recibidos en el nodo central.

MEDICION DE VARIABLES MEDIOAMBIENTALES EN DIFERENTES ESCENARIOS

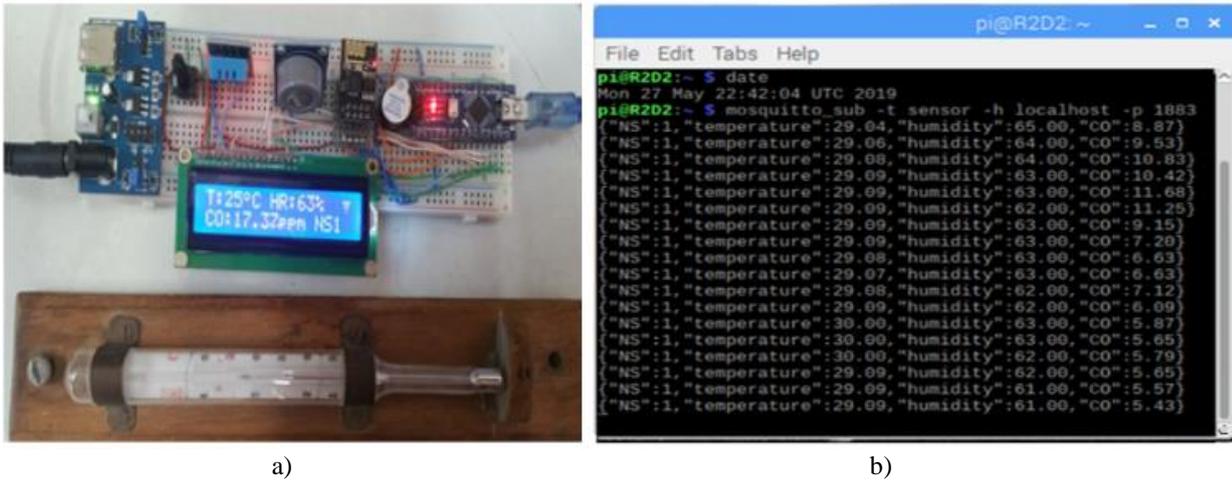


Figura 7: a) Uno de los nodos sensores en funcionamiento b) Datos recibidos en el nodo central.

Los datos recibidos de los nodos se almacenan con fecha y hora en la base de datos del nodo central, donde se puede seleccionar el nodo sensor que desea observar, como se muestra en la Fig. 8.

nombre	temperatura	humedad	co	fecha
NS1	29.04	65	8.87	2019-05-27 22:43:06
NS1	29.06	64	9.53	2019-05-27 22:45:07
NS1	29.08	64	10.83	2019-05-27 22:47:09
NS1	29.09	63	10.42	2019-05-27 22:49:10
NS1	29.09	63	11.68	2019-05-27 22:51:11
NS1	29.09	62	11.25	2019-05-27 22:53:12
NS1	29.09	63	9.15	2019-05-27 22:55:13
NS1	29.09	63	7.2	2019-05-27 22:57:14
NS1	29.08	63	6.63	2019-05-27 22:59:15
NS1	29.07	63	6.63	2019-05-27 23:01:16
NS1	29.08	62	7.12	2019-05-27 23:03:17
NS1	29.09	62	6.09	2019-05-27 23:05:18
NS1	30	63	5.87	2019-05-27 23:07:20
NS1	30	63	5.65	2019-05-27 23:09:21
NS1	30	62	5.79	2019-05-27 23:11:22
NS1	29.09	62	5.65	2019-05-27 23:13:23
NS1	29.09	61	5.57	2019-05-27 23:15:24

Figura 8: Datos almacenados en la base de datos

El usuario puede desde cualquier dispositivo móvil con sistema Android conectarse por WIFI al punto de acceso que se encuentra en el nodo central, para darle órdenes de lectura a los nodos sensores y así obtener la información de parámetros ambientales del nodo sensor que se seleccione. La Fig. 9 muestra la información recibida en el teléfono móvil. La ventaja de la aplicación desarrollada consiste en su fácil escalabilidad, tanto en sensores como en nodos, además de contribuir a la seguridad ambiental de las personas en recintos cerrados.

4. RED INALÁMBRICA DE SENSORES PARA EL ESTUDIO DEL MEDIOAMBIENTE EXTERIOR

Esta red tiene como objetivo fundamental la monitorización y conservación de los valores de variables medioambientales en el exterior, lo que implica la necesidad de adquirir, procesar y almacenar los datos, para posibilitar estudios posteriores.

En las redes de sensores para el exterior los nodos sensores se despliegan de forma no determinística, adaptándose a las condiciones naturales dinámicas, con muchos eventos, a veces en lugares hostiles y de difícil acceso, donde el mantenimiento resulta difícil. Por las razones anteriores esta aplicación debe ser autoconfigurable, evitando al máximo la dependencia de un humano, y además, debe asegurar la conservación de los datos ante fallos [17].

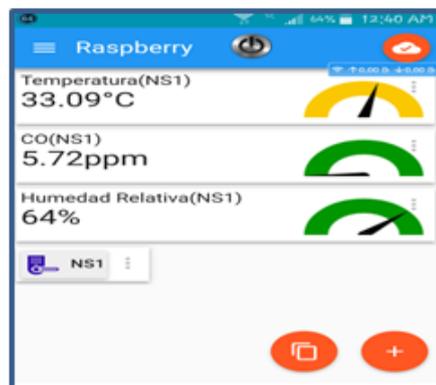


Figura 9: Información recibida en el teléfono móvil.

Requisitos de la aplicación

Dado el difícil acceso humano a estas redes y el carácter de sistema abierto del medioambiente exterior, donde existe gran diversidad de contaminantes del aire, se plantean como requisitos:

- Utilizar Internet para asegurar el acceso a la información almacenada
- Obtener la información de las variables medioambientales: temperatura, humedad relativa y la concentración de los gases contaminantes LPG (liquified petroleum gas), monóxido de carbono, propano, metano, alcohol, hidrógeno y humo.

De estos requisitos se derivan otros:

- Uno de los nodos de la red debe tener conexión a internet y debe ser sustituible en caso de fallar esta conexión.
- Cada nodo sensor debe tener capacidad de cálculo suficiente para adquirir y procesar las nueve variables medioambientales.
- La información medioambiental obtenida por cada uno de los nodos debe almacenarse en varios lugares para evitar la pérdida de la información en caso de fallas.
- Toda la red debe trabajar de forma continua y sincronizada.

Arquitectura

Partiendo de los requisitos planteados, desde arriba hacia abajo, se obtuvo una arquitectura horizontal, donde una plataforma operativa gestiona la red y los servicios, y recolecta los datos de gran número de fuentes. Esta estructura se muestra en la Fig. 10, para el caso de dos nodos sensores.

Cada nodo mide las variables de su propio medioambiente, las procesa, las almacena y las transmite al otro, asegurando que, en caso de fallo, en ambos nodos siempre esté guardada la información de los dos. Por la complejidad del trabajo que cada nodo sensor realiza, la plataforma escogida es la Raspberry Pi 3 B, como se observa en la Fig. 10. Los nodos sensores son muy similares, más no idénticos. Uno de los nodos actúa como maestro y otro como esclavo.

El nodo que actúa como maestro además de obtener mediciones medioambientales como el resto de los nodos, cuenta con un reloj de tiempo real (RTC) el cual se usará junto con un Servidor NTP (ejecutado en la propia Raspberry Pi) para sincronizar fecha y hora en todos los nodos conectados. Otra característica del nodo maestro es que crea un punto de acceso inalámbrico (Hotspot), al cual se conectan los nodos esclavos no solo para obtener fecha y hora de este nodo, sino también para sincronizar sus bases de datos entre todos, asegurando que cada uno de ellos cuente con toda la información medioambiental obtenida.

El nodo esclavo se conecta automáticamente al nodo maestro pues reconoce su red de acceso inalámbrico como una red de confianza. En el caso de que el nodo esclavo pierda conexión con su nodo maestro, después de un tiempo (programable) cambia su estado de esclavo a un estado llamado suplente, creando una nueva red inalámbrica que permite la conexión del resto de los nodos hasta que se restablezca el nodo maestro, asegurando un procedimiento de autoconfiguración de la red que le permite ser tolerante a fallas. El usuario puede comunicarse con cualquier nodo a través de internet.

MEDICION DE VARIABLES MEDIOAMBIENTALES EN DIFERENTES ESCENARIOS

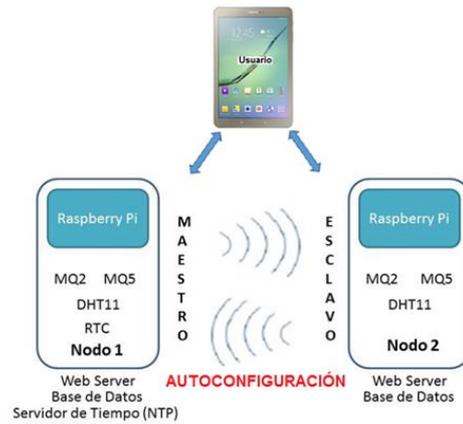


Figura 10: Arquitectura de la aplicación con dos nodos.

Componentes electrónicos utilizadas

Para la construcción de los nodos sensores se utilizó la plataforma Raspberry Pi 3 B. Esta plataforma tiene un SoC (*Sistema on Chip*) de la compañía Broadcom con un procesador Quad-Core, velocidad de reloj 1,2 GHz, memoria RAM de 1 GB, 40 GPIO, y comunicación WIFI y Bluetooth sin adaptadores. Se alimenta con una fuente de 5 V. Para la medición de la temperatura y humedad relativa se utilizó el sensor comercial DHT11 y para la concentración de los gases contaminantes los sensores de gas MQ-2 y MQ-5. En el nodo maestro, además de estas componentes, se incluye un RTC. Las componentes utilizadas en los nodos sensores (maestro y esclavos) se muestra en la Fig. 11.

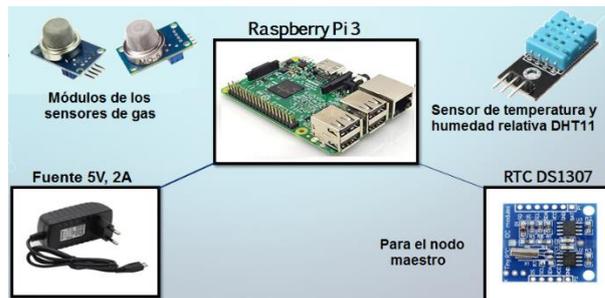


Figura 11: Componentes de la aplicación "outdoor".

Resultados

Las figuras siguientes muestran los resultados obtenidos, después de implementar la aplicación. En la Fig.12 se presenta la foto del prototipo de un nodo sensor.

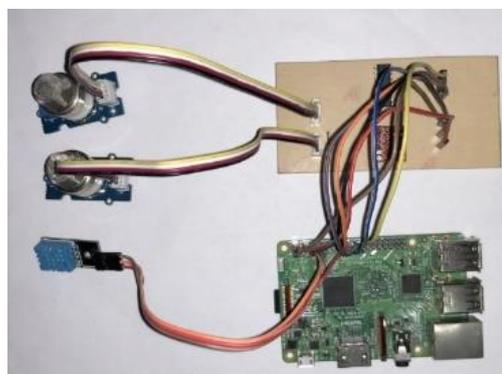


Figura 12: Foto del prototipo de un nodo sensor.

El acceso a la base de datos y las mediciones almacenadas en el Nodo 1 se muestran en la Fig.13. En esta base de datos se almacenan con fecha y hora los resultados obtenidos de la medición de temperatura, humedad relativa, y la concentración de 7 gases contaminantes. Al intercambiar información, en cada nodo sensor se almacenan los datos sensados por él y también los datos sensados por el otro nodo.

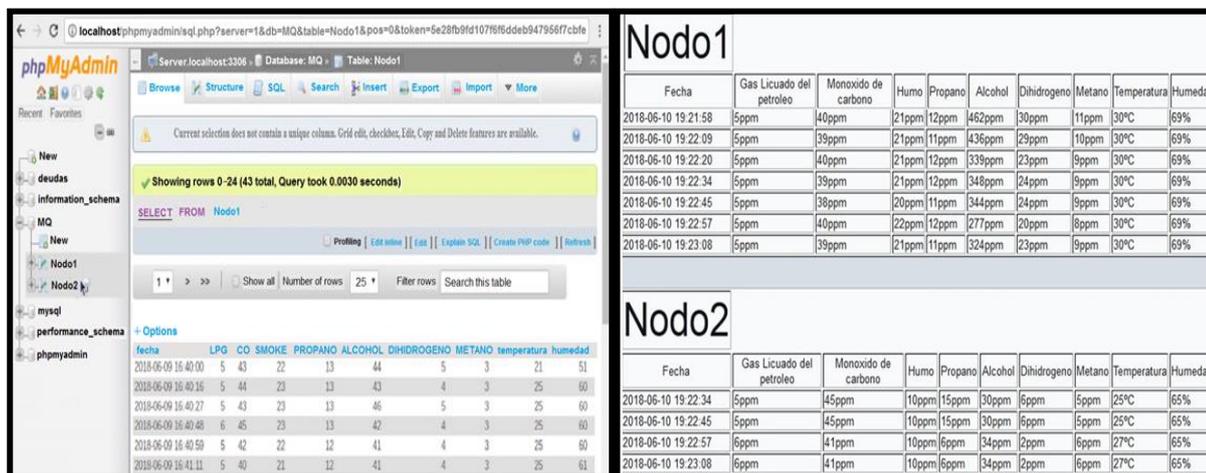


Figura 13: Acceso a la base de datos y los datos almacenados en el Nodo 1.

5. CONCLUSIONES

Basado en el estudio de la calidad y contaminantes del aire, se identificaron dos escenarios medioambientales notablemente diferentes: el exterior y el interior. De los escenarios diferentes se derivaron redes inalámbricas de sensores con arquitecturas diferentes para la medición de las variables ambientales. En el caso de recintos cerrados la arquitectura es vertical, con posicionamiento determinístico y sin interacción entre los nodos sensores, implementándose la red desde abajo hacia arriba. Esta aplicación no necesita conexión a internet. Para el estudio del ambiente exterior la arquitectura de red que cumple con los requisitos es horizontal, con interacción entre los nodos, almacenando en cada nodo las mediciones de todos los nodos para evitar la pérdida de datos. Los nodos son guiados por un nodo maestro, que incluye un reloj de tiempo real y conexión a internet. Ambas redes son escalables en sensores y en nodos sensores.

REFERENCIAS

- [1] «World Health Organization: 7 million deaths in 2012 due to air pollution», nov, 2014. <http://www.militaryaerospace.com/articles/> (accedido abr. 15, 2016).
- [2] «. OMS: Estimaciones sobre la exposición a la contaminación del aire y su repercusión para la salud», sept. 27, 2014. <https://www.who.int/es/news-room/detail> (accedido may. 15 2019).
- [3] «Informe del Instituto Valenciano de la Edificación», jul. 2019. <http://aire.five.es/155> (accedido jul. 15, 2019).
- [4] Convention de recherche ADEME, «“Étude expérimentale des conditions de transfert de la pollution atmosphérique d’origine locale à l’intérieur des bâtiments d’habitation,”», Rapport final, Avril 2001
- [5] S. Kumar, y D. Katoria, « Air Pollution and its Control Measures », *International Journal of Environmental Engineering and Management*, vol. 4, n.º 5, pp. 445-450, India, 2013, ISSN 2231 – 1319.
- [6] R.Vara, M. Sami, R. Mishra, y P. Rajalakshmi, « Real Time Wireless Air Pollution Monitoring », *Ictact Journal on Communication Technology*, vol. 2, pp. 370-375, 2011.
- [7] R. Simaitis y otros, « Air pollution at Parking-lots of Vilnius», », *Journal of Enviromental Engineering and Landscape Management*, vol. 12, n.º 1, pp. 38-43,2004.
- [8] M. H. Miraz, M. Ali, « A review on Internet of Things (IoT), Internet of Everything (IoE) and Internet of Nano Things (IoNT) », *IEEE Xplore*, <http://dx.doi.org/10.1109/ITechA.2015.7317398>.
- [9] C. Chong, S. Mori, E. Tse y R. Wishner, « Distributed Estimation in Distributed Sensor Networks », en *American Control Conference*, 1982, Arlington, VA, USA.

MEDICION DE VARIABLES MEDIOAMBIENTALES EN DIFERENTES ESCENARIOS

- [10] International Telecommunication Union, « Serie Y.2121 “Requirements for support of ubiquitous sensor network (USN) applications and services in the NGN environment” », Telecommunication Standardization Sector of ITU, 2010.
- [11] J. S. Rueda, J. M. Talavera, «Similitudes y diferencias entre Redes de Sensores Inalámbricas e Internet de las Cosas: Hacia una postura clarificadora», *Revista Colombiana de Computación*, vol. 18, n.º 2, pp. 58-74, 2017, <https://doi.org/10.29375/25392115.3218>
- [12] S. Hadim y N. Mohamed, « Middleware: Middleware Challenges and Approaches for Wireless Sensor Networks », *IEEE Distributed Systems Online*, vol. 7, n.º 3, pp. 1-23, 2006.
- [13] D. Henríquez, «Aplicación inalámbrica de sensores para la medición de contaminantes en recintos cerrados», Tesis de diploma, Universidad Tecnológica de la Habana, Cuba, 2019.
- [14] O. Carralero, O. Martínez, «Nodos Sensores para Aplicación Medioambiental utilizando Raspberry Pi 3», Tesis de diploma, Universidad Tecnológica de la Habana, Cuba, 2019.
- [15] «Contaminantes primarios y secundarios», <https://es.scribd.com/document/135763760/Contaminantes-primarios-y-secundarios>. (accedido may. 10, 2019).
- [16] J. I. Vega, M. A. Lagos, y G. Salgado, «Monitoreo de concentración de monóxido de carbono usando tecnología Long-Range», *Ingenius*, pp. 73, jul. 2017.
- [17] A. B. Bermúdez, «Especificaciones de un sistema de monitorización medioambiental para el lago Titicaca basado en redes inalámbricas de sensores», Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Madrid, España, 2014.

SOBRE LOS AUTORES

Agnes S. Nagy: Profesora Auxiliar del CIME/CUJAE. Graduada en 1972 de Licenciada en Física en la Universidad de La Habana, Master en Electrónica del Estado Sólido. CIME/CUJAE 1982, Doctor en Ciencias Técnicas CIME/CUJAE, 1998. Desde el año 2006 es Académica Titular de la Academia de Ciencias de Cuba.

Alicia Polanco Risquet: Investigadora Titular, Profesora Auxiliar del CIME/CUJAE. Graduada en 1981 de Ingeniera Eléctrica en la CUJAE, Master en Microelectrónica, CIME/CUJAE 1985, Doctor en Ciencias Técnicas CIME/CUJAE, 2001.

Daniel Henríquez Rodríguez: Especialista B en Telemática. Graduado en 2019 de Ingeniero en Telecomunicaciones y Electrónica, Universidad Tecnológica de la Habana.

Omar Carralero Ibagollen: Graduado en 2018 de Ingeniero en Telecomunicaciones y Electrónica, Universidad Tecnológica de la Habana.

Osmanys L. Martínez de la Cotera Garciga: Graduado en 2018 de Ingeniero en Telecomunicaciones y Electrónica, Universidad Tecnológica de la Habana.