

PROPUESTA DE UNA RED INALÁMBRICA PARA SUPERVISIÓN EN LÍNEA DE CONTAMINANTES DEL AIRE

Isabel Asadobay Sinaluisa¹, Adriana Paca Aucancela², José Guerra Salazar³, José Morales Gordon⁴, Julio Roberto Santillán Castillo⁵

^{1,2,3,4,5}Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador

¹e-mail: asadobaymaria@hotmail.com

²e-mail: apaca25@hotmail.es

³e-mail :j_guerra@esepoch.edu.ec

⁴e-mail :j_morales@esepoch.edu.ec

⁵e-mail: jsantillan@esepoch.edu.ec

RESUMEN

En el presente artículo se ilustra el diseño e implementación de un prototipo de nodos inteligentes integrables a una red inalámbrica para supervisión en línea de contaminantes del aire (MyAIR). Este mide contaminantes atmosféricos de zonas geográficas de manera inalámbrica utilizando tecnología Zigbee y Bluetooth en una red malla. La información obtenida es organizada y almacenada en una plataforma *IoT Ubidots*, para su posterior análisis. Dispone de una aplicación móvil que permite visualizar información de la contaminación presente en la zona, como alerta a la población, en seis rangos permisibles. Su estructura consta de tres módulos: Nodo de Adquisición de Datos (NAD), que recolecta datos de: Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Azufre (SO₂), Ozono (O₃), Dióxido de Nitrógeno (NO₂), Material Particulado PM₁₀, PM_{2.5}, y PM₁. Además se incluyen Nodos de Control de Datos (NCD) para el direccionamiento de datos a la nube y un Nodo de Visualización (NVI) que muestra la información de manera gráfica y dinámica. Con este diseño, se comprobó que los errores de medición mantienen valores inferiores a 0,8% de CO, 5% de O₃, 14% de NO₂ y de $\pm 10 \text{ ug/m}^3$ en material particulado, estableciéndose que no se incorporan errores significativos en el diseño. Al aplicar el coeficiente de correlación y obtener valores menores al 15% se demostró la estabilidad del prototipo. Pruebas de simulación demostraron que los nodos desarrollados pueden integrar redes de hasta 120 nodos conectados. Se concluye que el prototipo cumple con los requerimientos planteados para ser una red confiable y escalable, que genere información de ayuda en el campo socio-ambiental para la población y especialistas.

PALABRAS CLAVES: Calidad de Aire, Comunicación Inalámbrica, Sensores De Gases Contaminantes.

PROPOSAL OF A WIRELESS NETWORK FOR ONLINE SUPERVISION OF AIR POLLUTANTS

ABSTRACT

Current paper addresses the prototype design of intelligent nodes to integrating into a wireless network for online monitoring of air pollutants (MyAIR). The goal is to provide measurements regarding the atmospheric pollutants from geographical areas wirelessly, this using Zigbee and Bluetooth technology in a mesh network. The information obtained is organized and stored on an IoT Ubidots platform for further analysis. It has a mobile application that allows us to view information on pollution in the area, as it alerts the population in six permissible ranges. Its structure consists of three modules: A data acquisition node (DAN) that collects Carbon Monoxide data (CO), Sulfur Dioxide (SO₂), Ozone (O₃), Nitrogen Dioxide (NO₂), particulate matter PM₁₀, PM_{2.5} and PM₁. Data Control Node (DCN) is responsible for addressing data to the cloud and a Display Node (DN) that shows the information graphically and dynamically. It was found that the sensors do not present significant errors, maintaining values lower than 0,8% (CO), 5% of (O₃), 14% of (NO₂), and of $\pm 10 \text{ ug/m}^3$ at a given material establishing that no errors are incorporated into the design. By obtaining a correlation's coefficient value lower than 15%, the stability of the

PROPUESTA DE UNA RED INALÁMBRICA PARA SUPERVISIÓN EN LÍNEA DE CONTAMINANTES DEL AIRE

prototype was demonstrated. Simulation tests showed that developed nodes can integrate networks of up to 120 connected nodes. It is concluded that the prototype complies with the established requirements to be a reliable network and scalable that generates supporting information in the socio-environmental field for the population and specialists.

KEYWORDS: Air Quality, Pollutants, Wireless Communication, Pollutant Gas Sensor.

1. INTRODUCCIÓN

La Norma de Calidad del Aire Ambiente define la contaminación como “Sustancias en la atmósfera, que resultan de actividades humanas o de procesos naturales, presentes en concentración y tiempo suficiente bajo circunstancias que afectan la salud de los seres humanos y del ambiente” [1]. La contaminación del aire es generada por fuentes naturales y por actividades humanas producidas por la quema de combustibles fósiles, uso de vehículos, industrias, aerosoles, etc. Esta afecta particularmente al aparato respiratorio [2], puede ocasionar un aumento de la presión arterial, diabetes, derrame cerebral, insuficiencia cardíaca, ataques al corazón [3] y cáncer a lo largo del ciclo de vida [4].

Aun cuando la Organización Mundial de la Salud (OMS) establece las directrices referentes a la calidad del aire a nivel mundial y cada país tiene la responsabilidad de desarrollar sus propias normas acordes a su realidad, con la finalidad de favorecer la salud de sus habitantes, estas no se acatan. Pues estudios de la OMS establecen que 1.7 millones de niños a nivel mundial mueren al año a causa de la contaminación ambiental [4]. Investigaciones determinan que ocurren 8.8 millones de muertes por esta causa en todo el mundo, cifras que superan a las causadas por consumo del tabaco. Se considera que 120 muertes prematuras por cada 100.000 habitantes se presentan al año a nivel mundial y en Europa se registra 133 por esta misma causa [3].

Ecuador tiene la Norma Ecuatoriana de Calidad del Aire (NECA), que pertenece al Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria TULSMA (Libro VI De la Calidad Ambiental, anexo 4). NECA presenta los objetivos de calidad del aire, establece los límites de niveles máximos permisibles, métodos y procedimientos que permitan determinar y cuantificar los contaminantes en el aire y los considera a: material particulado de diámetro aerodinámico menor a 10 micrones (PM10) y menor a 2,5 micrones (PM2,5), dióxido de nitrógeno (NO2), dióxido de azufre (SO2), monóxido de carbono (CO) y ozono (O3) [5].

Considerando que en el Ecuador existen alrededor de 222 ciudades y que solo tres: Quito, Cuenca y Ambato, cuentan con sistemas de monitorización de calidad del aire, se determina que el 98.65% de las ciudades aun no supervisan estos parámetros en forma permanente. Motivo por el cual se ve la necesidad de desarrollar un prototipo de nodos inteligentes integrables a una red inalámbrica para la supervisión en línea de contaminantes del aire, denominado MyAIR. Esto con el fin de contribuir con una herramienta de ayuda de bajo costo, para informar y alertar a la población sobre los niveles específicos de calidad del aire presentes en la zona por donde transiten.

2. CONTENIDO

La metodología aplicada en esta investigación se basa en un análisis histórico bibliográfico de datos relacionados con la problemática y su realidad. Se establecieron requerimientos funcionales de hardware y software, con lo cual se planteó una concepción general del diseño acompañado del análisis detallado de cada una de las partes que lo integran, así como los esquemas electrónicos y software, que derivan en la implementación final. Para la obtención y análisis de resultados se emplearon pruebas de validación y funcionalidad. A continuación, se detalla el procedimiento seguido.

Indicador de calidad de aire

El prototipo desarrollado se basa en el Índice Quiteño de Calidad del Aire (ÍQCA), establecido por la Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito (REMMAQ). Está formado por una escala numérica representado a la vez por seis colores, mientras más alto sea el valor del IQCA, mayor es el nivel de contaminación atmosférica presente y consecuentemente peligrosa para la salud de la población. En la Tabla 1 se establecen las concentraciones de contaminantes criterio que definen niveles deseable, aceptable, precaución, alerta, alarma y emergencia en la calidad del aire [6].

Tabla 1: Niveles de valores IQCA.

Rango	Nivel	CO	SO2	O3	NO2	PM10	PM25
0-50	Deseable	0-5000	0-62.5	0-50	0-100	0-50	0-25
51-100	Aceptable	5001-10000	63.5-125	51-100	101-200	51-100	26-50
101-200	Precaución	10001-15000	126-200	101-200	201-1000	101-250	51-150
201-300	Alerta	15001-30000	201-1000	201-400	1001-2000	251-400	151-250
301-400	Alarma	30001-40000	1001-1800	401-600	2001-3000	401-500	251-350
401-500	Emergencia	>40000	>1800	>600	>3000	>500	>350

Concepción de la arquitectura general del prototipo MyAIR

En la Fig. 1 se plantea la concepción de la arquitectura del prototipo implementado. En esta se definen tres nodos: de adquisición de datos (NAD), de control de datos (NCD) y de visualización de información (NVI), que emplea la tecnología Zigbee para la comunicación de la red.

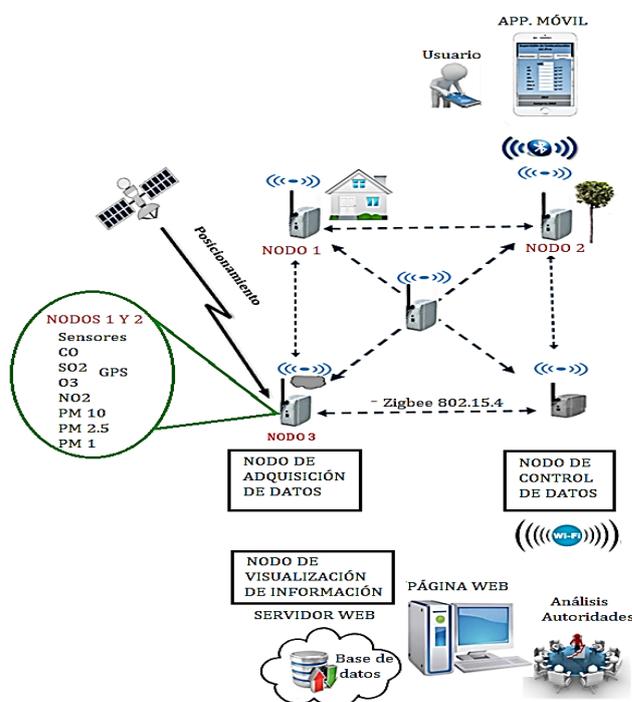


Figura 1: Concepción de la arquitectura general del prototipo MyAIR.

Se seleccionaron los dispositivos hardware de acuerdo a los requerimientos de diseño basada en la concepción de la arquitectura. Entre estos se puede mencionar Arduino Mega [7], módulo NodeMcu ESP8266 [8], XBee S2C [9], los sensores de gas: MQ-7 [10], MQ-131 [11], MQ-136 [12], PMS5003 [13], módulos Bluetooth [14] y GPS [15] y un cargador solar portátil. A continuación, se describe la función de cada uno de los nodos.

Nodo de adquisición de datos

En la Fig. 2 mediante un diagrama de bloques se presenta la conformación del NAD. Empieza en los bloques de Sensores MQ y PMS5003, encargados de medir los contaminantes: CO, SO2, O3, NO2, PM10, PM2.5 y PM1. Seguidamente el bloque de procesamiento de datos, conformado por un Arduino Mega, recibe cada dato para transformarlo en voltaje y posteriormente en unidad de medición de los contaminantes ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). El bloque de

PROPUESTA DE UNA RED INALÁMBRICA PARA SUPERVISIÓN EN LÍNEA DE CONTAMINANTES DEL AIRE

posicionamiento geográfico compuesto por un módulo GPS, identifica del NAD la latitud longitud fecha y hora en el que fue realizada la medición y la envía al bloque de procesamiento.

Los datos procesados se envían a los bloques de visualización de información compuesto por a un dispositivo móvil, el que dispone de una aplicación que se comunica vía Bluetooth y al bloque de transmisión Zigbee. El NCD, compuesto por transceptores XBee para establecer una red tipo malla, recibe la información. El NAD cuenta con un bloque de alimentación que permite conectarse a la red de energía eléctrica o a un cargador solar portátil. En la Fig. 3 se observar el esquema de conexión del NAD.

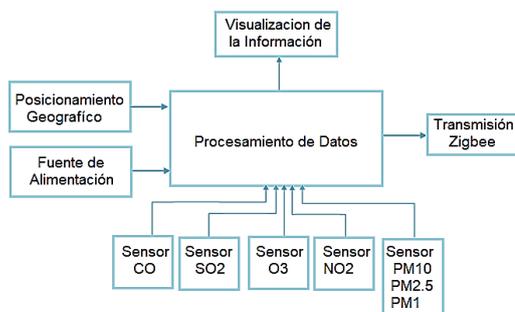


Figura. 2: Diagrama de bloques del NAD.

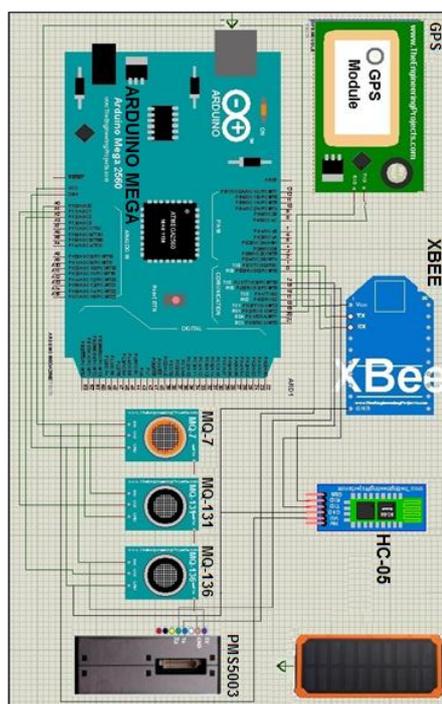


Figura. 3: Esquema de conexión del NAD.

Nodo de Control de Datos y de Visualización de Información.

En la Fig. 4 se presenta el diagrama de bloques del NCD junto al NVI. El NCD cuenta con una fuente de alimentación propia, está conformado por el bloque Recepción Zigbee que recoge los paquetes de datos procesados del NAD. Estos datos son congregados en el bloque de control de datos, compuesto por la placa NodeMCU8266 que se encarga de controlar el envío y almacenamiento de la información en la red por medio del nodo NVI. Utiliza un portal Web que muestra en forma detallada la información de calidad del aire. En la Fig. 5 se puede observar el esquema de conexión del nodo de control de datos.

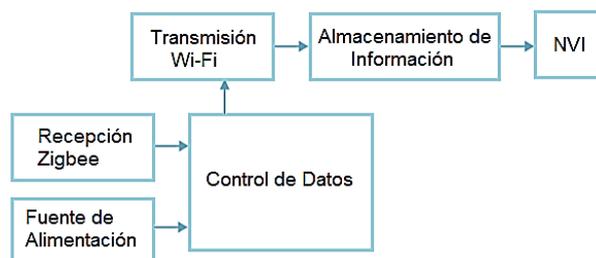


Figura 4: Diagrama de bloques del nodo NCD y NVI.



Figura. 5: Esquema de conexión NCD.

Software para el prototipo MyAIR

Para crear los programas controladores del hardware del prototipo, se utilizó la versión de IDE 1.8.7 [16]. La aplicación XCTU, desarrollada por Digi, que permite acceder, configurar dispositivos conectados y testear la comunicación entre los XBee que conforman la red [17]. Para el desarrollo de la aplicación móvil se empleó APP Inventor versión 2.50, que trabaja con App Inventor block y App Inventor Designer [18].

Se utilizó Ubidots, que es una plataforma de Internet de las cosas, permite almacenar y supervisar datos de sensores en tiempo real por medio de una página web [19]. Trabaja con una variedad de tarjetas de desarrollo [20]. A continuación, se da una descripción del software desarrollado para cada uno de los nodos:

Software del nodo adquisición de datos

Recoge información de los sensores y aplica su conversión de voltaje a concentración en ppm y posteriormente a $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Obtiene la ubicación del NAD, fecha y hora por medición. Con ella estructura una trama y la transmite al NCD, a través de comunicación Zigbee. En la Fig. 6 se expone la estructura de la trama transmitida por el NAD.

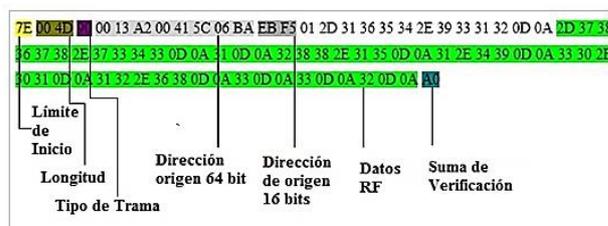


Figura 6: Estructura de la trama transmitida al NCD.

PROPUESTA DE UNA RED INALÁMBRICA PARA SUPERVISIÓN EN LÍNEA DE CONTAMINANTES DEL AIRE

El NAD vía Bluetooth, envía en tiempo real la información de los contaminantes a una aplicación móvil para emitir niveles de alerta basados en IQCA.

Software de nodo de control de datos

Incluye las librerías de comunicación entre el NodeMCU ESP8266 y Ubidots, permite establecer conexión, inicializar el puerto para la comunicación con el módulo XBee. Para luego verificar la recepción de datos y los convierte a punto flotante para ser enviados a una base de datos de internet.

Software para el dispositivo móvil

El objetivo de la aplicación es a través de comunicación Bluetooth conectarse con el NAD y dar a conocer las lecturas del nivel de contaminación, presente en la zona en intervalos no mayores a los 5 minutos. La pantalla principal de la aplicación móvil que se muestra en la Fig. 7, está constituida por teclas para conectarse o desconectarse. Presenta información de identificación del NAD, la medición de los gases contaminantes y material particulado en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ es visualizada en función al color de alerta establecido en el IQCA.



Figura 7: La pantalla principal de la aplicación móvil.

Plataforma de Visualización de Información Ubidots

Para presentar los datos actuales en forma gráfica y dinámica en una página web, se ha creado una cuenta al proyecto en Ubidots. Por medio de este sitio web se obtiene información de los contaminantes, mostrando valores máximos y mínimos, gráficos comparativos y cuadro de valores actuales, como se muestra en la Fig. 8. También se puede obtener archivos de datos históricos, interpretables en hojas de cálculo.



Figura 8: Visualización de datos en la plataforma Ubidots.

3. ANÁLISIS Y RESULTADOS

En la Fig. 9 se muestran los componentes que integran el prototipo desarrollado. Para verificar su funcionamiento, se realizaron cuatro grupos de pruebas, que se detallan a continuación.



Figura. 9: Prototipo MyAIR desarrollado.

Selección de la topología de red

Esta prueba es por simulación y consistió en analizar qué topología de red se ajusta a los requerimientos del prototipo. Se realizó por medio del *software* Riverbed Modeler versión 17.5.A PL7 [21], el cual posee propiedades de la tecnología Zigbee. Considerando que los parámetros para medir el rendimiento de una red dependerán de la naturaleza y diseño de la misma, se ha determinado simular las dos topologías en un tiempo de 60 minutos y evaluar tres parámetros. Debido a la utilización de un simulador gratuito con ciertas limitaciones en la configuración y visualización, los resultados de los parámetros a evaluar corresponden a un estimado.

Retardo

Se evaluó este parámetro para saber el tiempo que tarda un bit de datos en viajar desde el dispositivo final al coordinador en la red. Se observa que la red con topología malla presenta retardos aproximados de 0.0068s y en la topología estrella de 0.0073s, lo que significa poca variación entre las topologías. Los resultados obtenidos se presentan en la Fig. 10.

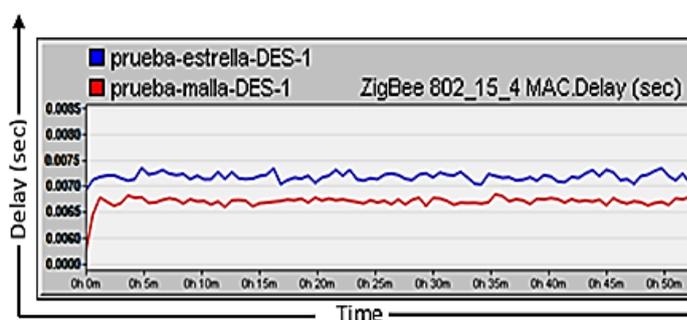


Figura 10: Retardo de datos en la topología malla (rojo) y estrella (azul).

Carga total

PROPUESTA DE UNA RED INALÁMBRICA PARA SUPERVISIÓN EN LÍNEA DE CONTAMINANTES DEL AIRE

Se evaluó para evidenciar el tamaño de paquete permitido en la red, de acuerdo a los resultados generados en la simulación. Se observa que la red con topología malla, presenta valores aproximados de 32,000 bits/s, mayor carga de datos con respecto a la topología estrella de 22,000 bits/s. Los resultados obtenidos se presentan en la Fig. 11.

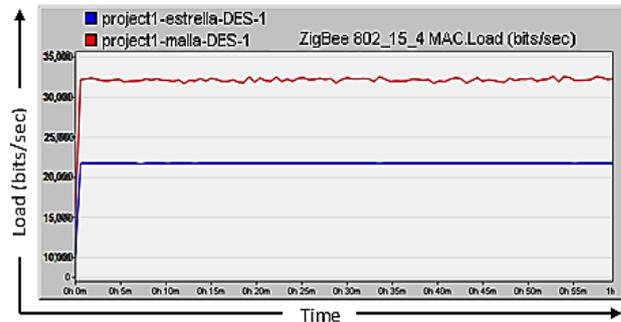


Figura 11: Carga total de datos en la topología malla (rojo) y estrella (azul).

Throughput

Se analizó este parámetro para verificar el número de datos receptados correctamente. De los resultados obtenidos en la Fig. 12, se observa que la entrega exitosa de datos de la red con topología malla es 30,000 bits/s y de la topología estrella es de 21,000 bits/s aproximadamente.

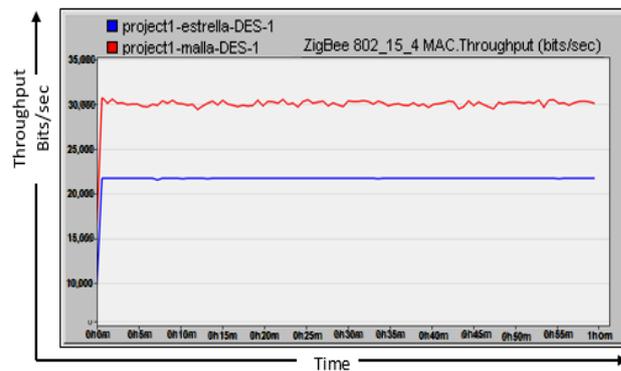


Figura 12: Throughput de datos en la topología malla (rojo) y estrella (azul).

Del análisis se determina que la red con topología malla es la más adecuada para ser empleada en el prototipo MyAIR debido a su mayor capacidad de carga de datos de 10,000 bits/s, mayor capacidad de transferencia 9,000 bits/s y retardo menor en 0.0005s, valores aproximados.

Número de nodos conectados en la red malla MyAIR

La prueba buscó determinar cuántos nodos puede soportar la red implementada, para lo cual se simularon tres redes, de 10, 20 y 30 nodos finales conectados, en un tiempo de 60 minutos. Posteriormente se calculó el valor estimado de número de nodos que soportaría la red, en base a los retardos que resulten de cada red simulada. En la Fig. 13 se presenta las redes simuladas.

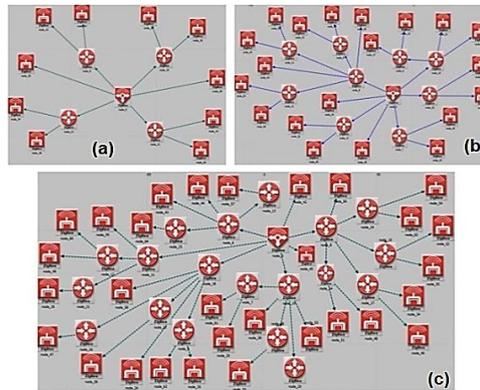


Figura 13: Red con topología malla con 10 (a), 20 (b) y 30 (c) nodos.

Como resultado se obtuvieron retardos de 0.007s, 0.0073s y 0.0084s para las redes con 10, 20 y 30 nodos respectivamente. Era de esperar que a mayor número de nodos el retardo presente un incremento, como se aprecia en la Fig. 14.

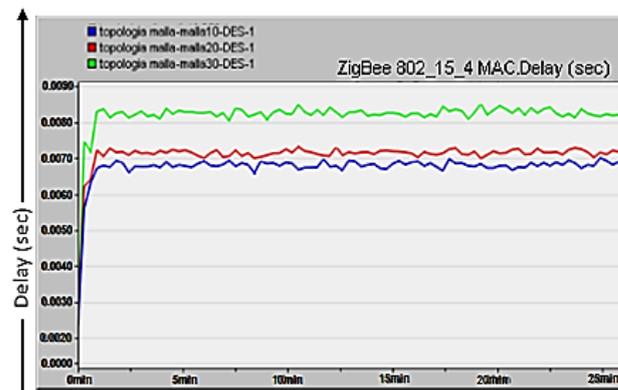
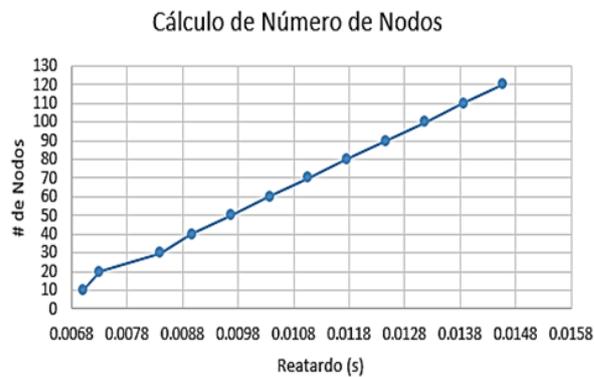


Figura. 14: Retardo de la topología malla con 10 (azul), 20 (rojo) y 30 (verde) nodos.

Con los valores de retado y el parámetro de latencia, se considera que el tiempo de demora empleado en cumplir la comunicación en la red no debe ser mayor a 15 ms [22]. Se relacionó el número de nodos con el valor de los retardos, obteniéndose un número estimado de nodos que puede conectarse a la red, como se presenta en la Fig. 15.



PROPUESTA DE UNA RED INALÁMBRICA PARA SUPERVISIÓN EN LÍNEA DE CONTAMINANTES DEL AIRE

# Nodos	10	20	30	40	50	60
Retardo (s)	0.0070	0.0073	0.0084	0.0090	0.0097	0.0104

# Nodos	70	80	90	100	110	120
Retardo (s)	0.111	0.0118	0.0125	0.0132	0.0139	0.0146

Figura 15: Número de nodos a partir del retardo en la red malla

Al analizar la gráfica de la Fig. 15 se determinó que son aproximadamente 120 los nodos que puede conectarse a la red, considerando solo los valores de retardo.

Cálculo de distancia entre nodos en la red malla

Para determinar la distancia máxima aceptable entre nodos, se ha empleado el parámetro RSSI (*Received Signal Strength Indicator*, por sus siglas en inglés). Este es el indicador de potencia de señal recibida [23] disponible en Zigbee, siendo una escala de referencia que se utiliza para medir la potencia de la antena del módulo receptor. Para obtener el valor del RSSI se utilizó el software XCTU versión 6.4.1 [9], mediante su herramienta *Range Test* y a partir de esta referencia se calculó la distancia máxima entre dos nodos. Se empleó la siguiente fórmula (1).

$$d = 10^{\frac{\text{RSSI}-A}{10n}} \quad (1)$$

Donde:

- n: Constante de pérdida en el espacio libre
- d: distancia entre nodos transmisor y receptor (metros)
- A: RSSI tomada a una distancia de un metro.

En base al resultado obtenido, se concluye que la distancia máxima, teórica entre nodos es 71 m.

Pérdida de paquetes en la red malla

Con ayuda del *software* Riverbed que muestran los valores de paquetes enviados y recibidos en una red en 60 minutos de simulación. Se determina que no existe pérdida de paquetes enviados en redes constituidas por 10, 20 y 30 nodos. Del total de los paquetes enviados se presentan porcentajes de 2.66% (10 nodos), 11.33% (20 nodos) y 35.45% (30 nodos), de paquetes en espera.

A partir de una red con 40 nodos se observa una pérdida de 40 paquetes que representa 1.6% del total enviado. De la prueba se concluye que la red que integra hasta 30 nodos es la ideal ya que no presentará pérdida de datos.

Caracterización de mediciones de gases contaminantes y material particulado

El proceso de calibración de los sensores MQ, se obtuvo en base a la hoja de datos de cada sensor, se empleó las curvas características de sensibilidad del gas. Al estimar los puntos de la curva característica de sensibilidad, se tomó varios puntos de referencia para obtener, $y = ax^b$ que es la ecuación de la curva con tendencia potencial de cada gas y coeficiente de determinación R^2 indicador de calidad de resultados, mediante Microsoft Excel 2016. Se obtuvieron los siguientes valores de R_L, R_S, R_0 de resistencias de los sensores MQ para obtener las señales de salida analógica, empleando las fórmulas 2 y 3.

$$R_S = \left(\frac{V_C - V_{RL}}{V_{RL}} \right) \cdot R_L \quad (2)$$

$$X = \frac{R_S}{R_0} \quad (3)$$

Donde:

- R_L : Resistencia de carga (recomendada en la hoja de datos)
- R_S : Resistencia superficial
- V_C : Voltaje de entrada
- V_{RL} : Voltaje de salida
- R_0 : Resistencia interna del sensor

Al aplicar las fórmulas (2) y (3) para todos los sensores se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Valores de calibración de los sensores MQ

Sensor del gas	Ecuación de tendencia potencial	R^2	R_L (K Ω)	R_S (Ω)	R_0 (Ω)	Concentración (PPM)
CO	$Y = 103,62x^{-1.501}$	0,997	10	425	250	10-10000
SO2	$Y = 40,618x^{-1.113}$	0,997	20	34,44	5,74	1-200
O3	$Y = 41,201x^{-1.119}$	0,997	15	183	30	10-1000
NO2	$Y = 2613,0x^{-2.78}$	0,993	20	4590	510	10-1000

Se efectuaron pruebas para determinar si no se incorpora un error adicional por parte del prototipo a los resultados de medición. Para la evaluación de los sensores de CO, O3, NO2, MP10 y MP2.5. Se compararon las mediciones con los resultados diarios generados por los equipos de características similares pertenecientes de la estación de monitoreo automático de calidad del aire, ubicado en el Gobierno Autónomo Descentralizado Municipalidad de Ambato (GADMA).

Se trabajó con los equipos de referencia: *Advanced Pollution Instrumentation Teledyne* modelo T204, que posee un rango de medición de 0-1000 ppb para ozono y de 0-20000ppb para dióxido de nitrógeno, con una precisión de 0.5% [1]. El analizador *Teledyne* modelo T300 para CO, con rango de medición de 0-1000 ppm con una precisión de 0.5% [2] y el equipo *Particulate Monitor BAM 1020* para PM10 y PM2.5, con un rango de medición de 1 mg, con resolución de 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ [3]. En la Fig. 16 se muestran los equipos de la estación de monitoreo en funcionamiento.



Figura 16: Equipos de la estación de monitorización.

La prueba consistió en mantener en funcionamiento continuo al NAD cerca de los equipos referencia, en horario aleatorio durante tres días obteniendo 25 muestras. Para su análisis se consideraron los errores relativos de los equipos proporcionados por el Departamento de Gestión Ambiental del GADMA.

Caracterización del sensor de CO

De las muestras obtenidas se determinaron los errores absolutos del sensor de CO (MQ7) del prototipo y del analizador de referencia *Teledyne* T300, que posee un error relativo de 0.8% y fue transformado a su equivalente en $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Al analizar los resultados se determina que el error absoluto obtenido no sobrepasa el error esperado, perteneciente al equipo de referencia. Lo que demuestra que las mediciones de CO del prototipo son tolerables en relación al analizador avalado.

Caracterización del Sensor de O3 y NO2

Se calcularon los errores absolutos de las mediciones del sensor de NO2 y O3 (MQ131) del prototipo y se compararon con los estimados de mediciones realizadas por el equipo Teledyne T204, que presenta un error relativo de 14% para NO y 25% para O3. De las comparaciones realizadas se observa que los errores obtenidos no sobrepasan los errores calculados a partir de los porcentajes establecidos en el equipo de referencia, lo que indica que el prototipo no incorpora un error adicional significativo a los resultados de medición.

2.5.3 Caracterización del Sensor de PM10 y PM2.5

Consistió en determinar el error absoluto presente en las medidas obtenidas por el sensor PMS5003 del prototipo que entrega valores enteros y compararlas con el equipo de referencia BAM 1020, que presenta un error de $\pm 8 \text{ ug/m}^3$. En base a los resultados, se obtiene que los errores absolutos oscilan entre 0.1 a 1.5 para PM2.5 y de 0.2 a 2.9 para PM10. Esto determina que no son errores representativos en relación al equipo de referencia. Se concluye así que el prototipo diseñado no incorpora un error mayor el del sensor, que es $\pm 10 \text{ ug/m}^3$.

2.5.4 Repetitividad del nodo adquisición

La prueba consistió en poner en funcionamiento el prototipo en un lugar cerrado, con la finalidad de mantener igual condición de ambiente y se registraron 10 mediciones de cada sensor en intervalos de un minuto. Se calculó el coeficiente de variación obteniéndose valores entre 2.3% a 11%. Esto implica que el prototipo MyAIR es estable, pues no superar el 15% definido por autores [4].

2.6 Caracterización de la comunicación inalámbrica

El propósito fue determinar el alcance y pérdida de datos en la comunicación, la misma consistió en tres pruebas que a continuación se detallan.

2.6.1 Alcance de comunicación RF entre los nodos del prototipo

Se evaluó la transmisión/recepción mediante dos pruebas con línea de vista y con obstrucción, distanciando los nodos coordinador (NCD) y *router* (NAD). Se establecieron tramos de 10m hasta cuando los datos dejaron de ser receptados. La medición se efectuó empleando *Google Maps*. En la Tabla 3, se resumen las categorías de comunicación de radiofrecuencia alcanzada con línea de vista, al realizar las pruebas con el prototipo MyAIR.

Tabla 3: Categorías de comunicación de radiofrecuencia con línea de vista.

DISTANCIA (m)	CALIDAD SEÑAL	DESCRIPCIÓN
0 - 220	Excelente	La red se estableció automáticamente y los paquetes de datos son receptados correctamente
220 - 290	Alto	No existe pérdida de paquetes
290 - 425	Medio	Los paquetes de datos son recibidos con un mínimo retardo
425 - 520	Bajo	Existe pérdida de paquetes y error en los datos recibidos
>520	Nulo	En adelante no se evidencia comunicación entre los nodos

Se concluye que la red del prototipo MyAIR tiene una comunicación libre de pérdidas a 425 m con línea de vista. Al realizar la prueba de alcance de comunicación con obstrucción, se determina que la distancia máxima alcanzada entre el coordinador y el *router* es de 55 m.

Integridad de comunicación RF entre los nodos del prototipo

Se comprobó la integridad de la comunicación, supervisando los puertos de comunicación serial mediante el Arduino IDE y XCTU en los nodos NAD y NCD respectivamente. Se evaluaron las tramas transmitidas cada tres minutos durante 5 horas hasta una distancia de 220m, perteneciente a la categoría de excelente de la prueba anterior. Los resultados obtenidos de la supervisión confirman que las tramas transmitidas y recibidas por el coordinador no presentan errores, lo que asegura la integridad de los datos transmitidos.

Comunicación Bluetooth con la aplicación móvil

Consistió en supervisar que los datos transmitidos y emitidos por el puerto serie del NAD sean los mismos que se presenten en un dispositivo móvil conectado. El procedimiento de esta prueba se evidencia en la figura 17.



Figura 17: Datos enviados desde el NAD (izquierda) y datos recibidos en la aplicación móvil (derecha).

El NAD está programado para enviar y actualizar los datos de contaminación cada diez segundos. Es por ello que se evaluaron cinco tramas de datos recibidos durante un minuto a la distancia de 30m. De los resultados de las pruebas se evidencia que el 100% de los datos son receptados correctamente, en tiempo real, a distancias de hasta 30m.

Caracterización del Nodo de Control de Datos

La finalidad fue verificar el registro de los datos en la plataforma de internet. Para ello se enviaron grupos de 7 datos desde la placa NCD a la plataforma. En la Fig. 18 se muestra una captura de los datos enviados desde la placa NodeMCU ESP8266 por Wi-Fi y su visualización en Ubidots. De las pruebas por observación se comprueba que los datos direccionados a la plataforma de internet son receptados y registrados sin error.



Figura 18: Datos supervisados del puerto serie del NCD y recibidos en la plataforma Ubidots.

Funcionamiento del prototipo MyAIR

PROPUESTA DE UNA RED INALÁMBRICA PARA SUPERVISIÓN EN LÍNEA DE CONTAMINANTES DEL AIRE

Se optó alimentar el prototipo con un cargador solar portátil con capacidad de 10000 mA/h de 5V-1A. De cálculos se determinó que el prototipo dispone 10 horas de autonomía energética, valor para cubrir el tiempo de cortes de energía de la zona. Se considera que el costo del prototipo representa el 97.78% de ahorro en relación a equipo comercial de similar característica, lo que demuestra que su construcción es de bajo costo. En la Fig. 19 se evidencia el prototipo instalado.



Figura 19: Prototipo MyAIR instalado.

4. CONCLUSIONES

Fundamentado en el Índice Quiteño de Calidad del Aire (ÍQCA) se desarrolló una propuesta de bajo costo, de una red inalámbrica para supervisión en línea de contaminantes del aire basada en comunicación inalámbricas *Bluetooth*, *Zigbee* y *Wi-Fi*. Permite registrar en una página *web* el nivel de contaminantes presentes en el aire en una determinada área y genera alertas mediante una aplicación móvil.

El prototipo mantiene errores de medición menores a 0,8% de CO, 5% de O₃, 14% de NO₂ y $\pm 10 \text{ ug/m}^3$ en material particulado. Se demostró su estabilidad, al obtener un coeficiente de variación menor al 15% según lo reportado por autores. Concluyendo que es competitivo frente a equipos comerciales similares.

A partir de simulación se estableció que la topología malla de MyAIR, presenta mayor capacidad de carga de datos (10,000 bits/s), mayor *throughput* (9,000 bits/s) y menor retardo (0.0005s) aproximadamente, en comparación a la topología estrella, valores estimados debido a las limitaciones del simulador. Está en condiciones de integrar redes de hasta 30 nodos sin pérdida. Se determinó que la distancia de conexión máxima alcanzada entre nodos es de 55 m con obstrucción y de hasta 425 m con línea de vista proporcionado una comunicación libre de pérdidas.

REFERENCIAS

- [1] Teledyne API, «Operation Manual Model T204 Nitrogen Oxides + O₃ Analyzer,» 2014. [En línea]. Available: <http://www.teledyne-api.com/prod/Downloads/07889A - T204 Operation Manual.pdf>. [Último acceso: 2019].
- [2] Teledyne API, «Operation Manual Model T300/T300M Carbon Monoxide Analyzer,» 2018. [En línea]. Available: <http://www.teledyne-api.com/prod/Downloads/06864D%20-%20T300%26T300M%20Manual.pdf>. [Último acceso: 2019].
- [3] Met One Instruments. Inc., «BAM-1020 Continuous Particulate Monitor,» 2013. [En línea]. Available: <https://metone.com/wp-content/uploads/2019/04/bam-1020.pdf>. [Último acceso: 2019].
- [4] I. N. d. E. INE, «Anexo estadístico Coeficiente de variación y error asociado al estimador encuesta nacional de empleo (ENE),» 2016. [En línea]. Available: http://historico.ine.cl/ene/files/pdf/anexo_estadistico_coeficiente_de_variacion_y_error_asociado_al_estimador_v_20160429.pdf.
- [5] V. Diaz, «Informe de Calidad del Aire-2016,» Quito, 2017.
- [6] S. d. Ambiente, «Contaminantes comunes del Aire y sus Efectos sobre la Salud Humana,» 2016. [En línea]. Available: http://www.quitoambiente.gob.ec/ambiente/images/Secretaria_Ambiente/red_monitoreo/informacion/contaminantes_aire_efec_salud.pdf.
- [7] El País, «Un estudio sube las muertes por contaminación al doble de las previstas,» 12 03 2019. [En línea]. Available: https://elpais.com/sociedad/2019/03/12/actualidad/1552394039_304954.html. [Último acceso: 2019].
- [8] OMS, «Las consecuencias de la contaminación ambiental: 1,7 millones de defunciones infantiles anuales, según la OMS,» 6 3 2017. [En línea]. Available: <https://www.who.int/es/news-room/detail/06-03-2017-the-cost-of-a-polluted-environment-1-7-million-child-deaths-a-year-says-who>. [Último acceso: 2019].

- [9] N. E. d. C. d. A. NECA, «Norma ecuatoriana de calidad del aire,» 2017. [En línea]. Available: <http://www.quitoambiente.gob.ec/ambiente/index.php/norma-ecuatoriana-de-la-calidad-del-aire>.
- [10] Q. Ambiente, «Índice quiteño de la calidad del aire,» 2015. [En línea]. Available: http://www.quitoambiente.gob.ec/ambiente/images/Secretaria_Ambiente/red_monitoreo/informacion/iqca.pdf.
- [11] Arduino, «ARDUINO MEGA 2560 REV3,» 2019. [En línea]. Available: <https://store.arduino.cc/usa/mega-2560-r3>. [Último acceso: 2019].
- [12] Espressif Inc., «ESP8266EX Datasheet,» 2019. [En línea]. Available: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/0a-esp8266ex_datasheet_en.pdf. [Último acceso: 2019].
- [13] DIGI, «DIGI XBEE S2C 802.15.4 RD MODULES,» 2018. [En línea]. Available: https://www.digi.com/pdf/ds_xbee-s2c-802-15-4.pdf. [Último acceso: 2019].
- [14] Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Ltd, «Toxic Gas Sensor (Model : MQ-7) Manual,» 2014. [En línea]. Available: <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Biometric/MQ-7%20Ver1.3%20-%20Manual.pdf>. [Último acceso: 2019].
- [15] Henan Hanwei Electronics Co., Ltd, «MQ131 Semiconductor Sensor for Ozone,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.cooking-hacks.com/skin/frontend/default/cooking/pdf/MQ-131.pdf>. [Último acceso: 2018].
- [16] L. Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., «Hydrogen Sulfide Gas Sensor (Model : MQ136) Manual,» 2015. [En línea]. Available: [https://www.eleparts.co.kr/data/goods_old/design/product_file/SENSOR/gas/MQ136%20\(Ver1.4\)%20-%20Manual.pdf](https://www.eleparts.co.kr/data/goods_old/design/product_file/SENSOR/gas/MQ136%20(Ver1.4)%20-%20Manual.pdf). [Último acceso: 2019].
- [17] AQMD, «AQMD-Manual,» 2016. [En línea]. Available: http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/resources-page/plantower-pms5003-manual_v2-3.pdf. [Último acceso: 2018].
- [18] I. Studio, 2010. [En línea]. Available: https://components101.com/sites/default/files/component_datasheet/HC-05%20Datasheet.pdf. [Último acceso: 2018].
- [19] ubox, «Neo-6 u-blox 6 GPS Modules Data Sheet,» s.f.. [En línea]. Available: [https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6_DataSheet_\(GPS.G6-HW-09005\).pdf](https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6_DataSheet_(GPS.G6-HW-09005).pdf). [Último acceso: 2019].
- [20] F. Azzola, «DZone,» 28 Agosto 2018. [En línea]. Available: <https://dzone.com/articles/10-arduino-ide-alternatives-to-start-programming>.
- [21] J. Buriticá y M. González, «PROTOTIPO DE UNA RED INALÁMBRICA ZIGBEE PARA LA MEDICIÓN DE NIVELES DE GASES EN MINAS DE CARBÓN,» Director: Carlos Enrique Montenegro Narváez, 2015. [En línea]. Available: <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/11605/2015Buriticajuan2.pdf?sequence=2&isAllowed=y>. [Último acceso: 2019].
- [22] A. Ricoy R., «App Inventor en Español Primeros pasos,» 2016. [En línea]. Available: <https://sites.google.com/site/appinventormegusta/primeros-pasos>.
- [23] E. S. Rodríguez Moreno y V. F. López Ordoñez, «DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA INTELIGENTE PARA UN EDIFICIO MEDIANTE IOT UTILIZANDO EL PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN LORAWAN,» Director: Ing. Camargo López Julian Ronando, Bogoá D.C., Colombia, 2017.
- [24] L. M. Toquica Ramírez y M. L. Gusmán Ruiz, «repository.udistrital.edu.co,» ING. Julián Rolando Camargo López, Bogota D.C., 2016.
- [25] Riverded Support, «Riverded Support,» 2019. [En línea]. Available: <https://support.riverbed.com/content/support/software/steelcentral-npm/modeler-index.html>. [Último acceso: 2019].
- [26] Y. Alverca y F. Berrazueta, «ZIGBEE COMO UNA APLICACIÓN A LA DOMOTICA , Y EL ESTANDAR IEEE 802.15.4,» 2015. [En línea]. Available: http://clusterfie.epn.edu.ec/ibernal/html/CURSOS/Oct05Marzo06/In-alambricas/Trabajo1/Paper/Proyecto1_g2.pdf. [Último acceso: 2019].
- [27] N. Vara, G. A. Poletto , M. Caceres y A. J. Busso, «Extensionismo, Innovación y Transferencia Tecnológica : claves para el desarrollo,» 2015. [En línea]. Available: <http://revistas.unne.edu.ar/index.php/eitt/article/view/275/241>. [Último acceso: 2019].

SOBRE LOS AUTORES

PROPUESTA DE UNA RED INALÁMBRICA PARA SUPERVISIÓN EN LÍNEA DE CONTAMINANTES DEL AIRE

María Isabel Asadobay Sinaluisa, Ingeniera en Electrónica, Telecomunicaciones y Redes. Obtiene certificaciones en la Academia Cisco ESPOCH, CNNA1, 2, 3 y 4.

Adriana Estefanía Paca Aucancela, Ingeniera en Electrónica, Telecomunicaciones y Redes. Obtiene certificaciones en Academia Cisco ESPOCH, CNNA1 y 2.

José Enrique Guerra Salazar, Master en Diseño de Sistemas Electrónicos, Ingeniero en Electrónica y Computación, Docente Principal, Facultad de Informática y Electrónica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.

José Luis Morales Gordon, Magister en Sistemas de Control y Automatización Industrial, Ingeniero en Electrónica y Computación, Docente Auxiliar, Facultad de Informática y Electrónica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.

Julio Roberto Santillán Castillo, Master Universitario En Ingeniería de Software y Sistemas Informáticos, Doctor en Ciencias de La Educación Mención Informática Educativa, Docente Principal, Facultad de Informática y Electrónica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.