

Análisis del nivel de contaminación de CO₂ existente en el centro de la ciudad de Riobamba mediante un prototipo de red WSN



Analysis of the level of CO₂ pollution in the city center of Riobamba through a WSN network prototype

Marco Vinicio Ramos Valencia.¹, Blanca Faustina Hidalgo Ponce.², Natalia Patricia Layedra Larreas.³ & Yessenia Alexandra Gusqui Bejarano.⁴

Recibido: 01-07-2019 / Revisado: 15-07-2019 / Aceptado: 10-08-2019/ Publicado: 10-09-2019

Abstract.

DOI: <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v3i3.4..841>

The purpose of this research is to analyze the level of CO₂ pollution in the city center of Riobamba through a WSN network prototype to measure pollution rates and current pollution in the most congested streets of the city and that these data They are sent in real time for later analysis, in addition to designing a portable and accurate economic device in the pollution data obtained. First, a comparative analysis of wireless technologies was carried out and based on the analysis of efficiency achieved, it was determined that Wi-Fi is the most appropriate wireless technology for the design of the network. The precision of the prototype was determined when calculating the absolute error with data collected from experimental measurements, where it was shown that the level of reliability of the prototype is 95% at a maximum height of 2 meters with a data variation of 3%, which makes it stable and precise. Once the prototype operation tests and its validation have been carried out, it is concluded that the implemented prototype meets the necessary requirements so that the network is secure, portable, easy to configure and, above all, scalable, allowing the insertion of nodes without any complications after the network has already been implemented.

Keywords: Computer networks, Environment, Wireless Sensor Network (WSN), Air Pollution, Carbone Dioxide (CO₂).

¹ Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Informática y Electrónica. Riobamba, Ecuador. vi_ramos@esPOCH.edu.ec

² Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Informática y Electrónica. Riobamba, Ecuador. blanca.hidalgo@esPOCH.edu.ec

³ Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Informática y Electrónica. Riobamba, Ecuador. natalia.layedra@esPOCH.edu.ec

⁴ Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Informática y Electrónica. Riobamba, Ecuador. yessenia.gusqui@esPOCH.edu.ec

Resumen

El fin de esta investigación es analizar el nivel de contaminación de CO₂ existente en el centro de la ciudad de Riobamba mediante un prototipo de red WSN para medir los índices de contaminación y la polución actual en las calles más congestionadas de la ciudad y que estos datos sean enviados en tiempo real para su análisis posterior, además de diseñar un dispositivo económico portable y preciso en los datos de contaminación obtenidos. En primer Lugar, se realizó un análisis comparativo de tecnologías inalámbricas y según el análisis de eficiencia conseguido, se determinó que Wi-Fi es la tecnología inalámbrica más adecuada para el diseño de la red. La precisión del prototipo se determinó al realizar los cálculos del error absoluto con datos recogidos de mediciones experimentales, en donde se demostró que el nivel de confiabilidad del prototipo es del 95% a una altura máxima de 2 metros con una variación de datos del 3%, lo que lo hace estable y preciso. Una vez realizadas las pruebas de funcionamiento del prototipo y validación del mismo, se concluye que el prototipo implementado cumple con los requerimientos necesarios para que la red sea segura, portable, de fácil configuración y sobre todo es escalable por lo que permite la inserción de nodos sin complicación alguna luego de que la red ya ha sido implementada.

Palabras claves: Redes de computadores, Medio Ambiente, Red de Sensores Inalámbricos (WSN), Contaminación del Aire, Dióxido de Carbono (CO₂).

Introducción

En el mundo globalizado que nos encontramos en la actualidad la tecnología avanza a pasos agigantados, obligándonos a cambiar todo e incluso las actividades que realizamos a diario, a esto se une también los grandes avances que se han evidenciado en el área de las comunicaciones inalámbricas, en donde las redes de sensores inalámbricos cada vez obtienen un mayor auge en diversas aplicaciones; debido al gran aporte que realizan las redes WSN y sumado los avances tecnológicos existentes, la implementación de prototipos en áreas ambientales representan una estrategia clave para contribuir con el problema de contaminación por CO₂.

Riobamba es una de las ciudades que no está exenta del problema de contaminación por CO₂ generado por el parque vehicular y actualmente, en la ciudad, no se ha diseñado una red que permita supervisar los valores de concentración de CO₂, por lo que, el presente proyecto pretende determinar las características más adecuadas para realizar el diseño de la red de sensores inalámbricos, que permitan implementar un prototipo de red WSN que mida los niveles de concentración de dióxido de carbono en el centro de la ciudad de Riobamba y los almacene en una base de datos para su posterior visualización mediante un reporte gráfico.

El prototipo de red WSN a implementarse constituye una herramienta útil y de bajo costo que servirá de gran ayuda para que las instituciones locales cuenten con información diaria de la contaminación de CO₂ existente en el centro de la ciudad de Riobamba, esta información es fundamental ya que al recopilar los datos constantemente, las autoridades pueden buscar

oportunas soluciones cuando se incrementen los niveles de contaminación, de esta forma se podrá mitigar el impacto que causa la contaminación del aire en la salud de las personas, contribuyendo así en el buen vivir de las y los riobambeños.

Las redes WSN pueden incluir diversos tipos de sensores para medir factores en diferentes ámbitos, tales como: aplicaciones militares, industriales, ambientales, entre otras.

- Aplicaciones militares: Con ayuda de las WSN es posible desplegar una vigilancia de misiones.
- Aplicaciones Industriales: Debido a los avances en la tecnología de sensores, las WSN prevalecen en diversas aplicaciones industriales como, por ejemplo: en la supervisión de refinerías de petróleo, monitorización de tuberías, etc.
- Aplicaciones Ambientales: Las redes WSN se utilizan ampliamente para monitorización ambiental y de vida silvestre, tales como: seguimiento de aves o animales, riego automático, estudios de contaminación, entre otros. (*Reda y Mellouk, 2016: pp. 11-12*)

Tecnologías de comunicación inalámbrica

Zigbee. - La tecnología inalámbrica Zigbee está diseñada para sistemas de baja potencia con una velocidad baja de transmisión de datos, opera en las bandas ISM del espectro de radio y utiliza la técnica de espectro expandido para el transporte de la información hacia su destino; esta tecnología se basa en el estándar IEEE 802.15.4 destinado para redes WPAN de bajo coste. Particularmente, esta tecnología está orientada a la domótica, pero también es muy utilizado en sistemas de control y medida, ya que ofrece la capacidad de utilizar microcontroladores pequeños y baratos; debido a la baja expectativa en su velocidad de transmisión, los dispositivos finales Zigbee son capaces de configurarse en modos de reposo, esto hace que Zigbee sea ideal para aplicaciones que requieran un consumo mínimo de energía. (Toulson y Wilmshurst, 2012).

Wi – Fi. - Es la tecnología inalámbrica de conexión de bajo coste que permite el transporte de información a distancias limitadas; esta tecnología de comunicación inalámbrica se basa en el estándar IEEE 802.11 y utiliza la técnica de radio de espectro extendido para que la señal se pueda propagar dentro del intervalo de frecuencias de los anchos de banda públicos permitidos. (Black, 2010)

Wi – Fi permite implementar redes locales sin la necesidad de hacer uso de cables, debido a que esta tecnología utiliza ondas de radio y señales infrarrojas en la banda de frecuencias libres; existen diferentes versiones de las redes inalámbricas Wi – Fi, entre las más utilizadas se encuentran las siguientes: IEEE 802.11a, IEEE 802.11b e IEEE 802.11g; sin embargo, actualmente la última versión IEEE 802.11n es la que se impone en el mercado. (Cabezas y González, 2010)

WiMAX. - Es la tecnología para redes inalámbricas de banda ancha (WLAN o WMAN) diseñada para competir con las redes xDSL y cable – módem debido a que no es necesario que exista visión directa para realizar la conexión de la red, se considera como una alternativa de solución para la instalación de plataformas empresariales. Esta tecnología se basa en el estándar

IEEE 802.16 permitiendo ofrecer servicios de voz y datos ya sea de forma residencial o comercial; WiMAX brinda movilidad a los usuarios ya que es capaz de llegar a lugares donde otras tecnologías no pueden funcionar, es así que, compite directamente con la tecnología Wi-Fi, pero se antepone a ésta debido a que incorpora QoS (calidad de servicio), característica que las redes WiFi no son capaces de asegurar. (Huidrobo, 2011)

Metodología

En este apartado se detalla el diseño metodológico que se utiliza para el desarrollo de la propuesta tecnológica, así como también se especifican los requerimientos necesarios para realizar el diseño de la red de sensores inalámbricos, considerando el buen rendimiento y asegurando una buena relación beneficio-costos; de igual manera se especifican las pruebas de funcionamiento realizadas para la validación del prototipo.

La metodología que se utiliza en el presente proyecto se basa en una investigación tecnológica experimental de carácter mixto, en donde se aplica el método inductivo para recopilar la información necesaria que permita determinar las características más adecuadas para que la red WSN realice la correcta monitorización de los niveles de contaminación de CO₂ del aire, mientras que la técnica de recopilación de datos más acertada para la ejecución del proyecto es el método de campo, en donde, durante un tiempo determinado se analizan, obtienen y recogen datos de los niveles de concentración de dióxido de carbono por medio de los nodos sensores de la red.

La propuesta tecnológica es de carácter mixto, ya que durante todo el proceso investigativo y de ejecución de las pruebas de funcionamiento del prototipo, se analizan variables tanto cualitativas como cuantitativas. Por otro lado, la población determinada para este proyecto son los habitantes de la ciudad de Riobamba de la provincia de Chimborazo, en donde se realiza un muestreo no probabilístico para determinar la muestra de estudio, por lo tanto, para establecer la muestra en donde se ejecutarán las pruebas de funcionamiento del prototipo, se consideran los siguientes criterios: ambiente de menor congestión vehicular y ambiente con mayor congestión vehicular.

Diseño de la Red de Sensores Inalámbricos

Para evaluar cada una de las tecnologías inalámbricas se utiliza la escala Likert, en donde se estima una ponderación para establecer el nivel de eficiencia que tienen las características de cada tecnología; la escala de valoración que se utiliza se indica en la Tabla 1.

Tabla 1: Escala de valoración

1	2	3	4	5
Nada eficiente	Ineficiente	Poco eficiente	Eficiente	Muy eficiente
0%	1-25%	26-50%	51-75%	76-100%

Elaborado por: Los autores

Por otro lado, para conocer la eficiencia final de cada una de las tecnologías, se calcula la ponderación que tiene cada tecnología evaluada; para el cálculo de la ponderación se utiliza la ecuación 1.

$$P = \frac{\sum N_i}{T_i} * 100\% \quad (1)$$

En donde:

N_i = Nivel de incidencia de la característica evaluada

T_i = Total de incidencias de la tecnología al 100% de eficiencia

En la Tabla 2 se puede observar el cuadro comparativo de las tecnologías de comunicación inalámbrica, se indica el nivel de incidencia de las características de las tecnologías evaluadas, así como también la eficiencia resultante de cada una de ellas, en donde la tecnología que sobresale es Wi-Fi con el 80%.

Tabla 2: Comparación de tecnologías de comunicación inalámbrica

Característica	Zigbee		Wi – Fi (n)		WiMAX	
	Teórico	Nivel Incidencia	Teórico	Nivel Incidencia	Teórico	Nivel Incidencia
Velocidad (Mbps)	0.250	2	450	4	80	3
Alcance	10 – 100 m	2	100m	3	50Km	4
Frecuencia (GHz)	2.4	4	2.4	4	2 - 11	4
QoS	-	4	-	4	-	5
Consumo	-	5	-	5	-	4
Costo	-	5	-	4	-	3
Ponderación de eficiencia		73.33%		80%		76.67%

Elaborado por: Los autores

La red de sensores inalámbricos a desarrollar se basa en una red tipo estrella con tecnología Wi-Fi, integrada por un mecanismo de detección y un mecanismo de control que cumplen con los requerimientos tanto de hardware como de software que intervienen en el diseño de la red.

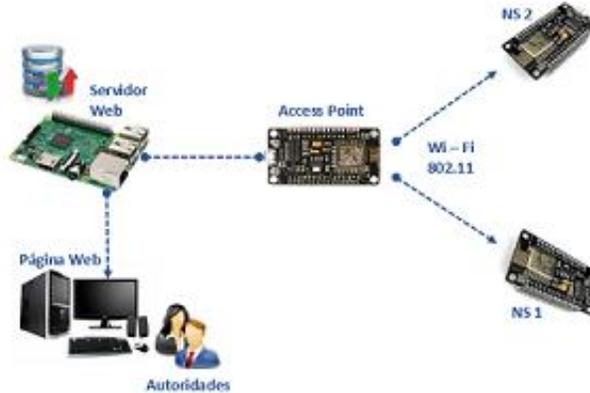


Figura. 1: Diseño de la Red de sensores inalámbricos

Mecanismos de la Red WSN

A continuación, se detallan los bloques que integran cada uno de los mecanismos de la red WSN, así como también se indica la función que desempeña cada mecanismo.

a. Mecanismo de detección

Esta etapa tiene a cargo, la función de recoger la información y enviarla al mecanismo de control; el mecanismo de detección está integrado por cuatro bloques: alimentación, procesamiento, localización y sensores. El bloque de alimentación del mecanismo de detección es el que se encarga de proveer energía para el funcionamiento de los bloques de procesamiento, localización y sensores.

A su vez, el bloque de localización es el encargado de entregar la ubicación del nodo sensor, finalmente el bloque de procesamiento es el que procesa la información recibida tanto del bloque de sensores como del bloque de localización y transmite dicha información por la red. En la Figura 2-2, se indican los bloques que forman parte del mecanismo de detección.

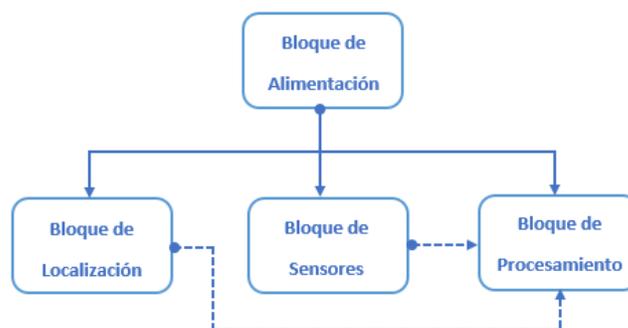


Figura 2: Bloques del mecanismo de detección

- Bloque de Alimentación. -Para el bloque de alimentación se toma en cuenta el cálculo de duración de la batería para estimar el tiempo necesario de ejecución de las pruebas de funcionamiento del prototipo, en donde el tiempo de duración de la batería se calcula con la ecuación (2).

$$\text{Tiempo de duración de batería} = \frac{\text{carga eléctrica}}{\text{consumo eléctrico dispositivos}} \quad (2)$$

Se utilizan dos tipos de baterías; la primera batería se encarga de proveer energía a las tarjetas electrónicas que se utilizan en los bloques tanto del mecanismo de control como el de detección, así como también para el módulo GPS UBlox Neo 6M del bloque de localización del mecanismo de detección; la segunda batería en cambio se encarga específicamente del módulo sensor MG811 del bloque sensor del mecanismo de detección, ya que el módulo sensor MG811 necesita una fuente de alimentación más alta que ofrezca mejores prestaciones debido a que su consumo de energía es más elevado a diferencia de los otros componentes.

$$\text{Tiempo de duración de batería} = \frac{2100}{200}$$

$$\text{Tiempo de duración de batería} \approx 10 \text{ horas}$$

La batería que se utiliza en el bloque de alimentación del mecanismo de detección es una batería recargable polímero ion de litio de 3.7V – 1000mAh; este tipo de batería cuenta con protección ante sobrecargas y trabaja a una temperatura de 20° C.

En la Tabla 3, se indica el consumo de corriente que tienen los dispositivos del bloque de procesamiento y de localización del mecanismo de detección (Bootscience, 2019), en donde se puede observar que el consumo total es de 175mA.

Tabla 3: Consumo de los dispositivos que integran el mecanismo de detección

Dispositivos	Corriente (mA)
NodeMCU v3	120
GPS UBlox NEO 6M	55
TOTAL	175

De igual manera que la batería seca, la batería de litio se conecta a un elevador de tensión para ajustarle a un voltaje de 5V debido a que las tarjetas electrónicas que se utilizan en el prototipo necesitan de este voltaje para su normal funcionamiento; en cuanto a la corriente de salida que se obtiene es de aproximadamente 1500mA, y su tiempo de descarga es el siguiente (Del Valle, 2018).:

$$\text{Tiempo de duración de batería} = \frac{1500}{175}$$

$$\text{Tiempo de duración de batería} \approx 8 \text{ horas}$$

Por otro lado, el consumo de energía de los dispositivos del bloque de procesamiento y almacenamiento del mecanismo de control se detallan en la Tabla 4

Tabla 4: Consumo de los dispositivos que integran el mecanismo de control

Dispositivos	Corriente (mA)
NodeMCU v3	120
Raspberry Pi 3 Model B	350
TOTAL	470

El consumo total de los dispositivos del mecanismo de control es de 470mA, debido a esto se utiliza una batería polímero ion de litio que tenga una corriente más elevada para abastecer al mecanismo de control sin inconveniente alguno. La batería que se utiliza en el bloque de alimentación del mecanismo de control es una batería de litio de 3.7V – 3000mAh que se conecta a un elevador de tensión para ajustar su voltaje a 5V con una corriente de salida aproximada de 3500mA; a continuación, se detalla el cálculo del tiempo de duración de la batería del mecanismo de control.

$$\text{Tiempo de duración de batería} = \frac{3500}{470}$$

$$\text{Tiempo de duración de batería} \approx 7 \text{ horas}$$

Las baterías que integran el bloque de alimentación del mecanismo de detección tienen un tiempo de descarga aproximado de 10 y 8 horas para la batería seca y batería de litio respectivamente, mientras que la batería de litio que se utiliza para el bloque de alimentación del mecanismo de control tiene un tiempo de descarga aproximado de 7 horas; es así que en base a los cálculos realizados anteriormente se estima que el tiempo necesario para realizar la ejecución de las pruebas de funcionamiento del prototipo sin ningún inconveniente es de 6 horas al día.

b. Mecanismo de control

Esta etapa permite almacenar y visualizar la información recibida del mecanismo de detección una vez que ya ha sido procesada; este mecanismo se integra de cuatro bloques: alimentación, procesamiento, almacenamiento y visualización.

El bloque de procesamiento del mecanismo de control es exactamente el mismo que se utiliza en el mecanismo de detección, pero varía en el modo de configuración de la placa electrónica ya que se configura en modo AP (Access Point).

Por otro lado, el bloque de alimentación es similar al que se utiliza en el mecanismo de detección, pero difiere en la utilización de la batería seca. A continuación, se indica la función que cumplen los demás bloques del mecanismo de control como se pueden observar en la Figura 2.

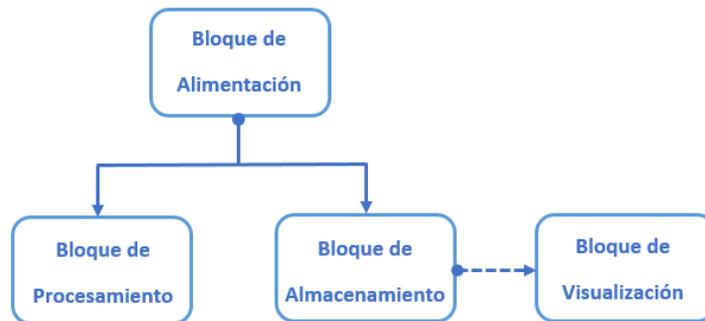


Figura 2: Bloques del mecanismo de control

- Bloque de Almacenamiento. - En esta etapa se utiliza la placa electrónica Raspberry Pi 3 Model B para instalar un servidor Web que permita crear una base de datos MySQL para almacenar los datos recibidos por el mecanismo de control a través de una página web creada.
- Bloque de Visualización. -El bloque de visualización es un complemento del bloque de almacenamiento del mecanismo de control, ya que mediante la creación de una página web en el servidor y con la ayuda de la librería HighChart es posible crear un reporte gráfico de la información almacenada en la base de datos, esto con el objetivo de que las autoridades gubernamentales puedan observar de una manera sencilla las variaciones de los niveles de concentración de CO₂ en función del tiempo.

Herramientas software

- a. Software Arduino IDE. - El Software Arduino IDE (Arduino Integrated Development Environment) es un entorno de programación de código abierto que se basa en el lenguaje C++; este software permite comunicarse con el hardware Arduino para cargar el software de programación desarrollado (Arduino, 2015). Para el desarrollo del software de medición de dióxido de carbono se hizo uso del Software Arduino IDE v1.6.7.
- b. Sistema Operativo Raspbian. - Raspbian es una distribución libre de los sistemas operativos GNU/Linux, basado en Debian; raspbian es el sistema operativo oficial

soportado por raspberry pi y ofrece más de 35000 programas precompilados para el desarrollo de aplicaciones en una raspberry (Raspberry Pi, 2017).

- c. Servidor web Apache. - El servidor http Apache es un software de código abierto orientado a la implementación de código fuente robusto, de calidad y que se encuentre libremente disponible en un servidor web o http; este servidor puede ser implementado en plataformas que integren el protocolo HTTP (Protocolo de transferencia de hipertexto) (Apache, 2018).

Software de medición de dióxido de carbono

El software de monitorización entra en funcionamiento una vez que el bloque de alimentación de los mecanismos de detección y control proporcionan la energía para que la red WSN inicie la conexión entre los mecanismos. El mecanismo de control es el encargado de emitir la señal de la red Wi-Fi, de igual manera recibe y acepta las peticiones de conexión a la red realizadas por el mecanismo de detección; a su vez el bloque de almacenamiento inicia su funcionamiento cuando se conecta a la red, en donde recibe y acepta las peticiones de envío de datos del mecanismo de detección para su posterior almacenamiento en la base de datos SQL y generación del reporte gráfico.

Por otro lado, cuando el mecanismo de detección ejecuta su proceso de funcionamiento, se inicia la comunicación serie del gps e inmediatamente detecta la señal de la red Wi-Fi para establecer la petición de conexión al mecanismo de control, una vez que se encuentra conectado a la red obtiene los datos de posicionamiento y de concentración de CO₂ en ppm y establece la conexión con el servidor para el envío de datos a través de la página web del servidor, finalizando de esta manera el proceso que cumple el mecanismo de detección.

Ambientes de Prueba

Una vez comprobado el funcionamiento del prototipo se procede a la instalación de la red WSN en el centro de la ciudad de Riobamba, en donde los ambientes seleccionados para realizar las pruebas de monitorización de concentración de CO₂ se consideraron en base al congestionamiento vehicular existente.

Además, los lugares seleccionados fueron recomendados por la Dirección de Gestión, Salubridad e Higiene; el Ambiente A de prueba es considerado el punto de menor congestionamiento vehicular y corresponde al GADM de Riobamba, mientras que el punto de mayor congestionamiento corresponde al Ambiente B del sector del Terminal Terrestre.

Las pruebas de funcionamiento del prototipo de medición de CO₂ en el centro de la ciudad de Riobamba se realizaron por un periodo de 6 días en dos etapas; cada etapa de prueba se la ejecutó por tres días consecutivos en los horarios de 8-10 AM, 12-14 PM y 17-19PM, considerados como las horas pico en la ciudad.

Resultados

Luego de haber desarrollado el prototipo de medición de dióxido de carbono se procede a realizar las respectivas pruebas de funcionamiento para la validación del mismo; previo a la instalación del prototipo de red WSN en los dos ambientes de prueba seleccionados se tomaron mediciones de los niveles de concentración de CO₂ directamente de una fuente emisora de dióxido de carbono.

De igual manera se realizaron mediciones variando la altura para seleccionar la altura adecuada de ubicación de los nodos sensores de la red. La fuente de emisión directa de CO₂ utilizada para las pruebas de funcionamiento es una bomba de agua a gasolina utilizada en las lubricadoras.

Para determinar la precisión del prototipo de monitorización y validar el funcionamiento del mismo se realizaron cálculos, en donde se toma en cuenta la media y el error absoluto debido a que los datos provienen de mediciones experimentales; los cálculos se realizaron con las ecuaciones (3) y (4), en donde se toma en consideración un total de 43 muestras en un tiempo aproximado de 20 segundos según el resultado de las mediciones realizadas.

- MEDIA

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i \cdot f_i}{n} \quad (3)$$

donde:

\bar{x} = Media de las mediciones

x_i = Mediciones recogidas por el sensor

f_i = Frecuencia de muestreo

n = Total de muestras recogidas

La calidad y sensibilidad del prototipo de medición de dióxido de carbono se determinó específicamente al realizar el cálculo del error absoluto, ya que el resultado obtenido representa el error entre la medida real y el valor obtenido por los sensores, para realizar este cálculo se utilizó la ecuación (4).

- ERROR ABSOLUTO

$$E_a = \frac{\sum_{i=1}^n |\bar{x} - x_i|}{n} \quad (4)$$

donde:

E_a = Error absoluto

\bar{x} = Media de las mediciones

x_i = Mediciones recogidas por el sensor

n = Total de muestras recogidas

Para obtener el error absoluto que tiene el prototipo de medición de CO₂ al variar la altura, se logró obtener una concentración aproximada de 700ppm; este valor se tomó en cuenta como medida de referencia ya que en la gráfica de la curva característica del sensor se puede observar fácilmente que para una concentración de 700ppm se obtiene un voltaje de 0.310V antes de la etapa de amplificación del módulo sensor; por otro lado, para determinar la altura máxima de ubicación de los nodos sensores de la red se realizaron varias pruebas, en donde se obtuvieron resultados relevantes con las alturas que se indican en las Tablas 5 y 6 para obtener estos resultados se instalaron los dos nodos sensores a la vez, de esta manera se pudo verificar la variación de precisión que tiene el prototipo de monitorización.

En la Tabla 5 se puede observar que para una altura de 150cm existe un error del 4%, mientras que al aumentar la altura en 50cm existe una variación del 1% en el error absoluto del prototipo de medición de CO₂.

Tabla 5: Error absoluto a 150cm de altura

Voltaje (mV)	x_i	f_i	$x_i \cdot f_i$	\bar{x}	$ \bar{x} - x_i $
314	701ppm	15	10515	702.0232558	1.0232558
314	702ppm	12	8424	702.0232558	0.0232558
314	703ppm	16	11248	702.0232558	0.9767442
ERROR ABSOLUTO					0.04

En la Tabla 6 se indica el error absoluto que tiene el prototipo de medición de dióxido de carbono a una altura de 200cm, en donde el error resultante es de 0.05 lo que significa que la altura máxima permitida para que el prototipo tenga un 95% de confiabilidad es de 200cm.

Tabla 6: Error absoluto a 200cm de altura

Voltaje (mV)	x_i	f_i	$x_i \cdot f_i$	\bar{x}	$ \bar{x} - x_i $
314	701ppm	7	4907	702.2790698	1.2790698
314	702ppm	17	11934	702.2790698	0.2790698
314	703ppm	19	13357	702.2790698	0.7209302
ERROR ABSOLUTO					0.05

Ambiente A

El Ambiente A de prueba corresponde al GADM de Riobamba, en donde se ejecutaron las pruebas de monitorización de los niveles de concentración de dióxido de carbono existentes en el lugar determinado por un periodo de tres días consecutivos. Las pruebas de funcionamiento se realizaron durante 6 horas diarias en los horarios establecidos anteriormente para un día

normal de trabajo y durante el fin de semana con el fin de observar la variación de los niveles de CO₂.

a. Instalación de los mecanismos de la red WSN

Para la instalación de los mecanismos de la red WSN en este ambiente se utilizó la infraestructura de la red Wi-Fi del GAD Municipal de Riobamba y debido a los requerimientos de la Dirección de Gestión de Tecnologías de la Información de la institución se instaló un solo nodo sensor, además fue necesario hacer uso de corriente continua para alimentar a los mecanismos de la red con cargadores adecuados, ya que al ser una institución pública el acceso los fines de semana es restringido.

El mecanismo de detección del prototipo de la Red WSN se instaló en el balcón del Salón José María Román, mientras que el mecanismo de control tuvo una variación, ya que al utilizar la infraestructura Wi-Fi montada por la Dirección de Gestión de Tecnologías de la Información, el dispositivo del bloque de procesamiento fue reemplazado por un router Cisco.

Cabe recalcar que, por disposición de las autoridades, el lugar de ubicación del mecanismo de detección fue en el balcón, por lo tanto, se sobrepasa el nivel máximo de altura permitido determinado anteriormente, lo que significa que al ubicarse a una altura aproximada de 3.5m el nivel de confiabilidad que tiene el prototipo disminuye en un 4%.

Por el contrario, el mecanismo de control integrado por el nuevo dispositivo del bloque de procesamiento se instaló en una caja metálica que se encuentra junto al balcón, esto por motivos de seguridad de los equipos.

b. Análisis de gráficas

Una vez finalizada las pruebas de funcionamiento del prototipo de monitorización, con ayuda del bloque de visualización del mecanismo de control se pudo observar las gráficas de cada uno de los días en los que se realizaron las pruebas de funcionamiento. En los Gráficos. 1, 2 y 3 se puede observar la variación de los niveles de concentración de CO₂ registrados durante los tres días de prueba en los horarios establecidos.



Figura 3: Monitorización – viernes, agosto 16 del 2019

En la Figura. 3 se indican las variaciones de concentración de CO₂ registradas el día viernes, 16 de agosto del presente año, en donde el nivel más alto de concentración registrado en la mañana fue de 1616ppm, mientras que para la tarde el nivel de concentración aumentó a 1843ppm y en la noche disminuyó a 1243ppm.



Figura. 4: Monitorización – sábado, agosto 17 del 2019

Las variaciones de concentración de CO₂ registradas el día sábado, 17 de agosto se indican en el Figura 4, en este día se registró un valor de 1547ppm como la concentración más alta en la mañana, a su vez en la tarde se evidenció un aumento llegando a los 1726ppm y descendiendo por la noche a 1090ppm.



Figura. 5: Monitorización – Domingo, agosto 18 del 2019

Por el contrario, en el día domingo, 18 de agosto se registraron niveles de concentración más bajos en comparación a los demás días ya que no existe la continua presencia de automotores, es así que para la mañana el nivel más alto de concentración de CO₂ fue de 956ppm, mientras que para la tarde y la noche se registró una disminución de 768ppm y de 735ppm respectivamente.

La medición realizada en un día normal de trabajo registra variaciones de concentración de CO₂ más altas en comparación a las variaciones registradas en el fin de semana, además el pico más alto de concentración de dióxido de carbono en este ambiente se registró en un día normal de trabajo ya que alrededor de este ambiente se encuentran varias instituciones, por

lo tanto, existe la concurrencia de automotores especialmente en las horas de entrada y salida de las instituciones.

Ambiente B

El Ambiente B está localizado en la Av. La Prensa y Agustín Dávalos, Sector del Terminal Terrestre; las pruebas de funcionamiento de este ambiente se realizaron a la semana siguiente de haber realizado las pruebas de funcionamiento en el Ambiente A; al igual que en el Ambiente A se ejecutaron las pruebas en el mismo horario y días establecidos.

a. Instalación de los mecanismos de la Red WSN

En la instalación del mecanismo de detección integrado por los dos nodos sensores, el nodo 1 se ubicó a 150cm de altura, mientras que el nodo 2 se instaló a 200cm de altura, de esta forma se aseguró el 95% de confiabilidad del prototipo en base a los cálculos de precisión del prototipo realizados anteriormente.

Por otro lado, el mecanismo de control se instaló aproximadamente a 40m de distancia del lugar de ubicación del mecanismo de detección; cabe indicar que al ser una red Wi-Fi no se puede exceder los 100m de alcance que tiene la tecnología.

Al igual que en el Ambiente A se realizó un análisis de los gráficos obtenidos, en donde los resultados de las variaciones de dióxido de carbono registrados el día Viernes, 25 de agosto del presente año son las siguientes:

- El pico más alto de concentración de dióxido de carbono registrado por el sensor 1 en la mañana fue de 1581ppm, mientras que existe una variación mínima en la medición realizada por el sensor 2, en donde el valor fue 1547ppm.
- Los niveles de concentración de dióxido de carbono, en la tarde y noche de un día normal de trabajo en el Ambiente B se incrementaron, en la tarde los niveles que se alcanzaron fueron de 1894ppm y 1878ppm registrados por el nodo sensor 1 y el nodo sensor 2 respectivamente, mientras que en la noche el nodo sensor 1 detectó un nivel de 2055ppm y el valor registrado por el nodo sensor 2 fue de 2019ppm.

En cambio, en la medición del nivel de concentración de dióxido de carbono realizado el día Sábado, 24 de agosto, se consiguieron los siguientes resultados:

- En la mañana, el nodo sensor 1 detectó 1689ppm, mientras que el valor registrado por el nodo sensor 2 fue de 1652ppm.
- Por otro lado, en la tarde el nivel máximo fue de 1742ppm y 1717ppm registrados por el sensor 1 y 2 respectivamente, mientras que en la noche se llegó a un nivel de 1764ppm registrado por el nodo sensor 1 y de 1726ppm registrado por el sensor 2.

Finalmente, los resultados que se consiguieron el día domingo, 25 de agosto, se detallan a continuación:

- Los niveles máximos alcanzados por el nodo sensor 1 y 2 en la mañana fueron de 1066ppm y de 1021ppm respectivamente.
- Por la tarde y noche, los niveles de concentración de dióxido de carbono disminuyeron a diferencia de los días anteriores; el resultado registrado en la tarde fue de 838 ppm y de

820ppm detectados por el sensor 1 y 2 respectivamente, mientras que en la noche el nodo sensor 1 registró un nivel de 895ppm y el valor del nodo sensor 2 fue de 876ppm.

En la medición realizada por los nodos sensores en el Ambiente B, se registró una diferencia mínima en las concentraciones medidas por cada sensor, además para este Ambiente, en los días viernes y sábado se registraron niveles de concentración más altos, en donde el pico más alto de dióxido de carbono se registró en un día normal de trabajo.

Histórico de la red WSN

Luego de haber realizado las pruebas de funcionamiento del prototipo y almacenado la información recibida en la base de datos, se creó un histórico con los datos más relevantes según el análisis de gráficas realizado de cada uno de los ambientes de prueba.

Cabe recalcar que no se puede realizar un análisis de todos los datos recopilados en la base de datos, debido a que cada uno de los ambientes en donde se realizaron las pruebas tienen distintas condiciones, pero mediante la creación del histórico se pudo observar que efectivamente tanto el Ambiente A como el Ambiente B presentan niveles de concentración de CO₂ que no sobrepasan los niveles máximos tolerables de CO₂ (5000ppm) según la Tabla 7.

Además, el nivel más alto de concentración de CO₂ se registró en el Ambiente B del sector del Terminal Terrestre, este valor registrado se considera equivalente al nivel de concentración de CO₂ permitido para el aire en oficinas con ventanas cerradas, por lo tanto, se determina que la contaminación existente aún no representa un riesgo grave para la salud de los habitantes de la ciudad de Riobamba.

Tabla 7: Lugares y niveles de concentración de CO₂ permitidos

Nivel de concentración de Co ₂		Lugares
% ⁵	ppm	
0,04	400	Valor promedio mundial (aire limpio)
0,07	700	Aire limpio en una ciudad
0,1	1000	Aire en interiores
0,15	1500	Aire en oficinas
0,2	2000	Aire en oficinas con ventanas cerradas
0,5	5000	Valor máximo tolerable

Para determinar la estabilidad se utilizó la media, desviación típica y el coeficiente de variación; cabe recalcar que el coeficiente de variación es el que permite comparar la dispersión existente entre dos diferentes distribuciones.

⁵ 1% = 10000ppm

En este caso, la estabilidad del prototipo se determinó en base a los datos históricos obtenidos por la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) y los datos recopilados por el prototipo de red WSN desarrollado (NOAA, 2019)

Con ayuda del software estadístico R, se logró obtener el resultado de la variación de los datos de las dos distribuciones diferentes, en donde se comprobó que existe una variación aproximada del 1% tal como se indica en la Tabla 8.

Tabla 8: Diferencia de variación entre dos distribuciones diferentes

Datos NOAA	Datos Red WSN	Media	Desviación Típica	Coefficiente de variación (%)
404.47	404	404.23	0.3323	0.0822
404.59	400	402.29	3.2456	0.8067
404.65	400	402.32	3.2880	0.8172
404.40	400	402.2	3.1112	0.7735
404.65	407	405.82	1.6617	0.4094
404.82	400	402.5	3.5355	0.8783

Según los resultados obtenidos de la variación existente entre los datos recogidos por el un sensor respecto al otro, se determinó que la variación máxima de los datos es del 3%; el porcentaje de variación resultante se encuentra dentro del rango permitido por el INEC [15], por tanto, se considera que el prototipo de red WSN para la monitorización del nivel de contaminación de CO₂ es estable

Conclusiones

- La tecnología seleccionada para el diseño del prototipo de red WSN según el análisis comparativo de tecnologías es Wi-Fi con el 80% de eficiencia total resultante; además al ser un prototipo destinado para instituciones gubernamentales, implementar el prototipo en base a la tecnología Wi-Fi es la mejor opción ya que existe una infraestructura de red Wi-Fi en diversos puntos de la ciudad de Riobamba.
- El prototipo de medición de dióxido de carbono está integrado por un mecanismo de detección y un mecanismo de control, en donde los elementos que conforman cada uno de los mecanismos se seleccionaron en base a un análisis comparativo y según el nivel de eficiencia evaluado; cabe destacar que la mejor opción a utilizar como plataforma es NodeMCU con el 90% de eficiencia.
- El nivel de confiabilidad del prototipo de medición de dióxido de carbono se determina al variar la altura de ubicación de los nodos sensores ya que existe un margen de error de 0,05 a una altura conveniente de 200cm, lo que significa que a esa altura el prototipo tiene un 95% de confiabilidad, con una variación en los datos del 3%.
- Al evaluar el funcionamiento del prototipo de red WSN, se comprueba que el prototipo tiene una estabilidad aproximada del 1% con una repetitividad en los datos del 0.83%, por lo tanto, se considera que el prototipo desarrollado es estable y preciso.

Referencias bibliográficas

- Toulson, Rob. and Wilmshurst, Tim: Fast and Effective Embedded Systems Desing, Reino Unido, Newnes, 2012.
- BLACK, Uyless. Redes Edición 2010. Madrid-España: Ediciones Anaya Multimedia, 2010
- Cabezas, Luis and González, Francisco: Redes inalámbricas, Madrid, Ediciones Anaya Multimedia, 2010.
- Huidrobo, José: Telecomunicaciones, Bogotá, Ediciones de la U, 2011.
- CASCO, Sergio. Raspberry Pi, Arduino y Beaglebone Black Comparación y Aplicaciones [en línea]. Paraguay-Asunción: 2014.
- "Naylamp Mechatronics," [Online]. Available: <http://www.naylampmechatronics.com/inalambrico/153-nodemcu-esp8266.html>.
- "MG811 CO2 Sensor," [Online]. Available: <http://www.winsensor.com/d/files/PDF/Solid%20Electrolyte%20CO2%20Sensor/MG811%20CO2%20Manual.pdf>.
- Del Valle, Luis: "Programar Fácil," [Online]. Available: https://programarfácil.com/podcast/nodemcu-tutorial-paso-a-paso/#Acceso_a_los_pines_del_NodeMCU_V2.
- "Botscience," [Online]. Available: http://botscience.net/store/index.php?route=product/product&product_id=73.
- "Raspberry Pi," [Online]. Available: <http://docs-europe.electrocomponents.com/webdocs/14ba/0900766b814ba5fd.pdf>. [Accessed 21 10 2017].
- Arduino: "Arduino Software (IDE)," 07 09 2015. [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Environment>.
- "DistroWatch.com," 10 09 2017. [Online]. Available: <https://distrowatch.com/table.php?distribution=raspbian>.
- "Apache," [Online]. Available: http://httpd.apache.org/ABOUT_APACHE.html.
- "Fiscalab," [Online]. Available: <https://www.fiscalab.com/apartado/errores-absoluto-relativos#contenidos>.
- "PCE Instruments," [Online]. Available: <http://www.pce-iberica.es/medidor-detalles-tecnicos/definicion-calidad-aire-y-co2.htm>.
- NOAA: Trends in Atmospheric Carbon Dioxide. [Online]. Available: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/graph.html>
- INEC: "Determinación de los coeficientes de variación estimado," 18 11 2013. [Online]. Available: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjEvYaB1sPWAhVH7SYKH3SCR0QFgggMAE&url=http%3A%2F%2Fanda.inec.gob.ec%2Fanda%2Findex.php%2Fcatalog%2F>

PARA CITAR EL ARTÍCULO INDEXADO.

Ramos Valencia, M. V., Hidalgo Ponce, B., Layedra Larreas, N., & Gusqui Bejarano, Y. (2019). Análisis del nivel de contaminación de CO2 existente en el centro de la ciudad de Riobamba mediante un prototipo de red WSN. *Ciencia Digital*, 3(3.4.), 104-115.
<https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v3i3.4.841>



El artículo que se publica es de exclusiva responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan el pensamiento de la **Revista Ciencia Digital**.

El artículo queda en propiedad de la revista y, por tanto, su publicación parcial y/o total en otro medio tiene que ser autorizado por el director de la **Revista Ciencia Digital**.

