

Wireless sensor network for detection and industrial acoustic event data storage

Moreno Reinoso Jefferson, Ing.¹, and Sánchez-Almeida Tarquino, PhD²

^{1,2}Escuela Politécnica Nacional, Grupo de Investigación Educativa INEDU-EPN, Ecuador, jefferson.moreno@epn.edu.ec, tarquino.sanchez@epn.edu.ec

Abstract— This study focuses on the designing and deployment of a Wireless Sensor Network that allows the collection, storage, and presentation of industrial acoustic contamination events data or dBA sound intensity which are measured through the implementation and programming of sensor nodes made up of Arduino UNO device and sound sensor MAX9814, this system sends the data through wireless transceiver module called nRF24L01 to a collecting device which is a Raspberry PI model B+ that receives the data by a like device nRF24L01. The collecting device performs calibration data by software considering a percent relative error of less than $\pm 5\%$ which is calculated based on data measured by the UT353 Sonometer of UNI-T, finally, this device redirects the acoustic contamination events data to a database called Influx dB Cloud for post analysis. The wireless sensor network deployment in a real environment is performed on the DANILACT enterprise that is dedicated to the manufacture and sale of products like mozzarella cheese, white cheese, milk, and yogurt. So, based on comments of administrative and operative personnel has been determined that the production processes generate annoying sound noise levels which have not been previously monitored for analysis, and in fact, the health of the enterprise's shift workers could be affected.

Keywords—industrial noise, detection, collection, sensor node, collecting node, influxdb cloud.

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

Red de sensores inalámbrica para la detección y almacenamiento de datos de eventos acústicos industriales.

Moreno Reinoso Jefferson, Ing.¹ , and Sánchez-Almeida Tarquino, PhD² 

^{1,2}Escuela Politécnica Nacional, Grupo de Investigación Educativa INEDU-EPN, Ecuador, jefferson.moreno@epn.edu.ec, tarquino.sanchez@epn.edu.ec

Abstract— *This study focuses on the designing and deployment of a Wireless Sensor Network that allows the collection, storage, and presentation of industrial acoustic contamination events data or dBA sound intensity which are measured through the implementation and programming of sensor nodes made up of Arduino UNO device and sound sensor MAX9814, this system sends the data through wireless transceiver module called nRF24L01 to a collecting device which is a Raspberry PI model B+ that receives the data by a like device nRF24L01. The collecting device performs calibration data by software considering a percent relative error of less than $\pm 5\%$ which is calculated based on data measured by the UT353 Sonometer of UNI-T, finally, this device redirects the acoustic contamination events data to a database called Influx dB Cloud for post analysis. The wireless sensor network deployment in a real environment is performed on the DANILACT enterprise that is dedicated to the manufacture and sale of products like mozzarella cheese, white cheese, milk, and yogurt. So, based on comments of administrative and operative personnel has been determined that the production processes generate annoying sound noise levels which have not been previously monitored for analysis, and in fact, the health of the enterprise's shift workers could be affected.*

Keywords—*industrial noise, detection, collection, sensor node, collecting node, influxdb cloud.*

I. INTRODUCCIÓN

El ruido en ambientes industriales ha sido un factor determinante en la salud y el rendimiento de los trabajadores; los altos niveles de ruido dentro de jornadas laborales pueden causar serios problemas de salud como: hipoacusia, tinnitus, pérdida parcial auditiva o en los peores casos una pérdida total de la misma. Con base en la norma ISO 9612, RD 286/2006; se pueden fijar los niveles de ruido perjudiciales para la salud humana debido a una exposición prolongada de este parámetro. Consecuentemente, nace la necesidad de diseñar un sistema basado en una red de sensores inalámbrica que permita la recopilación y almacenamiento de datos de eventos acústicos de una empresa del sector industrial, para determinar focos de contaminación acústica en un análisis posterior de los mismos [1].

La red inalámbrica diseñada se compone de un par de nodos sensores y un nodo recolector, un sistema encargado de la recolección de datos de niveles de ruido con una periodicidad de envío de cada sensor al nodo recolector configurable en

segundos, se calibran los datos por software y se almacenan en una base de datos en la nube llamada *Influxdb Cloud*. Finalmente, los datos se analizan y visualizan en una interfaz gráfica [2].

Se utiliza la comunicación vía radio empleando la banda ISM no licenciada y la tecnología inalámbrica basada en el motor de protocolo de banda base integrado, *Enhanced Shockburst*; debido a sus características enfocadas en la transmisión y recepción de datos con una administración eficiente en el consumo de potencia, alcance y en el manejo de operaciones de la capa de enlace de alta velocidad lo cual reduce el costo del sistema de manera significativa [3].

La arquitectura de la red y el número de nodos sensores se definió considerando el alcance del proyecto, los planes de ampliación de la red y zona de monitoreo de la empresa.

II. OBJETIVO

El presente trabajo tiene como objetivo el diseño y despliegue de un sistema para la recolección, almacenamiento y presentación de datos de eventos de contaminación acústica industrial de la empresa DANILACT, medidos en decibelio ponderado (dBA.) y calibrados por software a través de una red de sensores inalámbricos.

III. METODOLOGÍA

Para el desarrollo del presente proyecto se seguirá la metodología de investigación basada en el enfoque del diseño de redes:

- a) Normas técnicas y efectos del ruido
- b) Tecnología empleada: Wireless Sensor Network
- c) Motor de protocolo de banda base Enhanced Shockburst
- d) Análisis de requerimientos del proyecto
- e) Diseño y despliegue del prototipo
- f) Resultados y Discusión

A. Normas Técnicas y Efectos del Ruido

Uno de los agentes más contaminantes de los puestos de trabajo es el ruido ambiental interno; considerado peligroso para la audición si su nivel de exposición rebasa los límites permitidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS); en Tabla I, se presentan algunos efectos negativos que puede

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

producir una exposición prolongada de ruido ambiental industrial [1].

TABLA I
EFECTOS DEL RUIDO [1]

Efectos del ruido		
Efectos Biológicos Extrauditivos		Efectos sobre la audición (RD 286/2006)
Efectos fisiológicos	Incremento del ritmo cardiaco	Alteraciones auditivas temporales (fatiga auditiva)
	Aceleración del ritmo respiratorio	
	Vasoconstricción periférica	
	Disminución de la actividad cerebral e inmunitaria	
Efectos psicológicos	Molestias	Alteraciones auditivas permanentes (Hipoacusia o sordera)
	Cansancio	
	Desagrado	
	Pérdida de la concentración	
Efectos comportamentales	Cambio en las Posturas	Tinnitus (ruido en los oídos permanente o temporal)
	Ritmo de trabajo diferente	
	Prolongación o disrupción de tareas	
	Incremento en la tasa de errores	

Nota. Se enumeran los efectos del ruido que un trabajador podría tener si acostumbra un ambiente laboral con niveles de intensidad sonora altos.

Las lesiones presentadas en Tabla I dependen de los siguientes factores: espectro de frecuencias, intensidad, emergencia y ritmo, duración de la exposición, vulnerabilidad individual y la interacción con otras exposiciones como vibraciones [1]. Por otro lado, el estudio de la norma ISO 9612:2009 permite determinar un método de ingeniería para efectuar mediciones con la menor incertidumbre de niveles de exposición al ruido de trabajadores en ambientes laborales; dicha norma involucra los niveles de ponderación A los cuales compensan la intensidad sonora real medida con base a la frecuencia de la fuente sonora, también se especifican 3 estrategias para efectuar tareas de mediciones, siendo estas: medición basada en el trabajo, medición basada en tareas y medición del día completo. Según la norma en estudio aquellos niveles de ruido aceptables constituyen los menores a 83 dB, mientras que para valores superiores comienzan a ser críticos los problemas en la salud del trabajador [1].

B. Tecnología empleada: Wireless Sensor Network

Una red de sensores inalámbrica o WSN (Wireless Sensor Network) se constituye por nodos sensores pequeños conocidos como “motas”, distribuidos a lo largo de la zona a monitorear;

se los puede asociar con pequeñas computadoras con capacidad de procesamiento limitada formados por un microprocesador, un dispositivo de comunicación de radio, una fuente de poder y uno o más sensores. El uso de señales de radio hace posible la comunicación, eligiendo una ruta óptima hasta llegar a su destino; un nodo principal o “sink” con capacidades de comunicación con otros sistemas debido a que puede actuar como un Gateway [3].

Por consiguiente, una red WSN trabaja de manera colaborativa con el objetivo de lograr monitorizar parámetros físicos o ambientales como: temperatura, sonido, vibraciones, presión, movimiento o agentes contaminantes.

También presentan un gran potencial para aplicaciones como: seguimiento de objetos militares, sistemas de vigilancia, exploración de entornos peligrosos, sistemas de detección sísmica, etc. Por tanto, la tecnología WSN determina una llave que habilita el internet de las cosas (IoT, Internet of Things) en donde el ambiente de monitoreo puede ser tanto en aplicaciones indoor como outdoor con un costo accesible en los elementos de la red, además de un bajo consumo de potencia, gran autogestión, despliegue rápido y flexibilidad [3].

C. Motor de protocolo de banda base Enhanced Shockburst

Protocolo basado en una comunicación de paquetes, soporta varios modelos de operación manual para una operación avanzada autónoma del mismo [2]. En Tabla II se presentan otras características del protocolo en estudio, estas permiten mejoras significantes en la eficiencia para sistemas unidireccionales y bidireccionales sin añadir complejidad en el microcontrolador del host [3].

TABLA II
CARACTERÍSTICAS DEL PROTOCOLO ENHANCED SHOCKBURST [2]

Característica	Descripción
Ensamblaje de paquetes	Automática
Temporización de paquetes	
Transmisiones de ACK	
Retransmisiones de paquetes	
Consumo de potencia	Ultra baja
Eficiencia	Alta
Costo en microcontroladores	Bajo
Longitud del payload	Dinámica de 1 a 32 bytes
Topología	6 canales de datos multiceiver para redes en estrella de 1:6

Nota. Se mencionan algunas características del protocolo Enhanced Shockburst

D. Análisis de requerimientos del proyecto

Inicialmente, se analiza el mercado de las WSN para tener un enfoque de los dispositivos disponibles de nodos sensores y recolectores. Posteriormente, se determina una solución viable, de bajo costo y eficiente para hardware y software mediante sistemas de código abierto como los equipos Arduino Uno y Raspberry Pi, a través de la implementación de scripts desarrollados en C++ y Python, lo cual será abordado en profundidad en el siguiente apartado [4].

Ahora, a través de los *planes de ampliación y ensanche*, se logra efectuar de forma óptima la inserción de uno o varios nodos sensores para un monitoreo más eficiente de los niveles de ruido producidos por una determinada área en una empresa. Hay que tener en cuenta que gracias al protocolo Enhanced Shockburst se dispone de 6 canales de datos Multiceiver para redes con topología en estrella, es decir, cada dispositivo recolector tendrá la capacidad de comunicarse de manera simultánea con 6 nodos sensores a través de subcanales individuales dentro de un canal principal de datos [3].

Por último, se determina la ubicación *del proyecto*, es decir, el lugar de despliegue de la red WSN que logre una máxima utilidad o un mínimo costo. Para este caso, se considera la distribución de dos nodos sensores y un nodo recolector central el cual se encargará de la recopilación de los datos tomados por los equipos sensores y de enviarlos a un sistema externo para su posterior procesamiento.

Con el objetivo de establecer una zona de instalación conocida como microzona se realizó entrevistas con el personal gerencial, administrativo y operativo de la empresa Danilact, para recolectar información que permita contar con criterios técnicos para salvaguardar la vida útil de los equipos, y el buen funcionamiento e instalación de la red. De esta manera la definición de la microzona se realiza dentro de una macrozona definida como la ubicación de la empresa DANILACT en el sur de la ciudad de Quito, como se indica en la Fig. 1 [5].

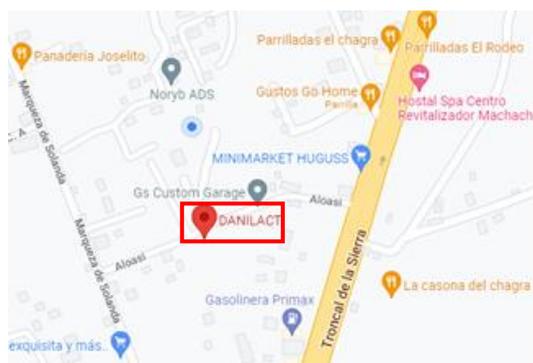


Fig. 1 Mapa de macro localización de la empresa elegida. Fuente: Autor

E. Diseño y Despliegue del prototipo

La red inalámbrica WSN está constituida por:

Dispositivo Arduino Uno; placa electrónica basada en el procesador Atmega328, un oscilador cerámico de 16 MHz, una conexión USB, un botón de reinicio, una cabecera ICSP (In Chip Serial Programmer) y un conector de alimentación Jack. El suministro de energía es a través de una conexión USB o una fuente de alimentación externa a una batería de 12 V [4]. Arduino maneja el lenguaje de programación C++, dispone de un cargador de arranque el cual le permite cargar nuevo código. “La comunicación se realiza empleando el protocolo STK500” [6].

Dispositivo Raspberry Pi modelo B+; considerado como un minicomputador de bajo precio, tamaño reducido, alta versatilidad, fácil disponibilidad en accesorios, repuestos y

comodidad, el cual soporta lenguajes de programación de alto nivel como Python, Java y C++ [4].

Módulo de comunicación inalámbrica nRF24L01; módulo transceiver de radio, diseñado para trabajar en la banda ISM de licencia libre de 2,4 GHz. Permite un enlace de comunicación a altas velocidades (250 kbps, 1Mbps y 2 Mbps) con un mínimo consumo de potencia (11.3mA - 13.5 mA). Constituido por un sintetizador completo de frecuencia integrado, un amplificador de potencia, un demodulador, un modulador y, el motor de protocolo Enhanced Shockburst, que dota de capacidades de comunicación inalámbrica simultánea con hasta 6 dispositivos [7].

Sensor de sonido MAX9814; dispositivo para la detección de datos de eventos de contaminación acústica, definido como un amplificador de alta calidad con control automático de ganancia y polarización de bajo ruido, integra un sistema para manejar fenómenos de saturación frente a intensidades de sonido elevadas o picos repentinos; su análisis se efectúa teniendo en cuenta la amplia oferta de sensores, el costo y el difícil acceso a los mismos. En Fig. 2 se muestra la estructura del sensor MAX9814 [8].



Fig. 2 Sensor MAX9814 [9]

Ahora, las *pruebas iniciales de la red WSN* se llevan a cabo a través de la implementación de un nodo sensor, es decir; la conexión del sensor de sonido MAX9814 con la placa Arduino Uno, sistema que permite medir niveles de intensidad de sonido en decibelios ponderados (dBA). Posteriormente se da paso a una *calibración por software* que utiliza los datos de intensidad de sonido en dBA medidos por el sonómetro UNIT-UT353 con el objetivo de lograr un error porcentual relativo menor al $\pm 5\%$ entre los datos tomados por ambos equipos.

La intensidad de sonido en decibelios ponderado (dBA), se define como la suma entre la intensidad de sonido en dB y un valor conocido como filtro de ponderación “A” expresado en función de la frecuencia dado por la ecuación (1), el cual rectifica el nivel de cada sonido a fin de expresar la sonoridad producida a una frecuencia definida y cuyo comportamiento se presenta en Fig. 3 [10]

$$P(f) = 2 + 20 \log_{10} \left(\frac{12200^2 \cdot f^4}{(f^2 + 20.6^2) \cdot (f^2 + 12200^2) \cdot \sqrt{(f^2 + 107.2^2) \cdot (f^2 + 737.9^2)}} \right) \quad (1)$$

Finalmente, la intensidad de sonido en dB se puede calcular mediante la implementación de la Transformada Rápida de Fourier (FFT), caracterizada por su ahorro y rapidez en el

cálculo de las operaciones efectuadas para la obtención de los espectros de amplitudes de una determinada señal [11].

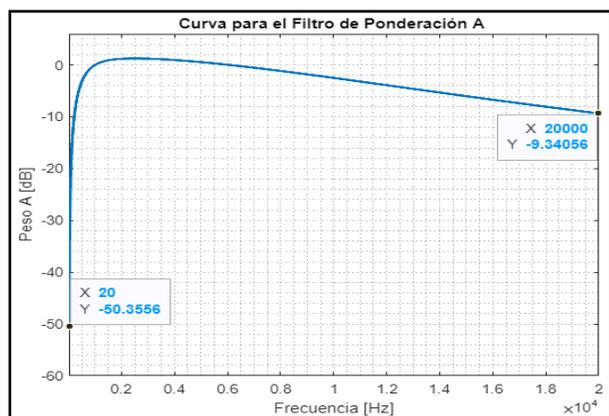


Fig. 3 Curva del filtro de ponderación A. Fuente: Autor

En la Fig. 3, se aprecia el comportamiento del filtro para frecuencias del rango audible para el ser humano entre 20 y 20kHz, presenta pesos de ponderación positivos para frecuencias entre 1 kHz y 6.1kHz y pesos negativos para otros casos. Posterior a añadir el peso de ponderación “A” a los datos de intensidad de sonido en dB estimados por la herramienta FFT, se procede a calibrar los datos de ruido en dBA tomados por los nodos sensores.

El proceso de calibración por software se lleva a cabo desde un nodo sensor e implicó las siguientes tareas:

- a) Adquisición del sonómetro marca UNIT-UT353 cotizada por la empresa ELICROM [25].
- b) Disponibilidad de una fuente de sonido con potencia máxima de 15000 mW, proveniente de un amplificador marca Primer American Classic GA-158C y un generador de señales de frecuencia variable (Matlab).
- c) Preparación de un ambiente libre de perturbaciones externas con una disposición de la fuente de sonido a una distancia de 3 metros respecto al nodo sensor a calibrar.

Posteriormente, se generó un archivo en formato Excel para registrar los datos de intensidad de sonido emitidos por la fuente y medidos tanto por el nodo sensor diseñado, como por el sonómetro UNIT-T353; para un rango de frecuencias entre 50Hz a 4kHz y efectuando un tratamiento de los datos utilizando programación en Python, se logró determinar la curva con la tendencia de los datos tomados, esto se muestra en Fig. 4.

A partir de un breve análisis de las curvas de la Fig. 4 se determina un vector de compensación definido como la diferencia entre los datos tomados por el sensor diseñado y el sonómetro UNIT-UT353. Ahora, para corregir los valores de intensidad de sonido en dBA adquiridos por el nodo sensor diseñado se insertan los valores iniciales del vector de compensación para un rango de frecuencias determinado.

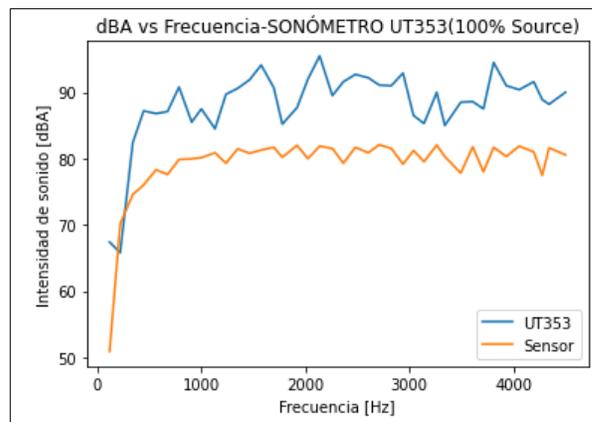


Fig. 4 Intensidad de sonido en dBA vs Frecuencia en Hz. Fuente: Autor [18]

El resultado del proceso descrito determina una similitud en la tendencia de las gráficas, sin embargo, el error porcentual calculado no es menor al $\pm 5\%$. Para disminuir el error se procede a una recalibración, corrigiendo los valores del vector de compensación, consiguiendo errores menores al $\pm 5\%$, dicho resultado se aprecia en Fig. 5.

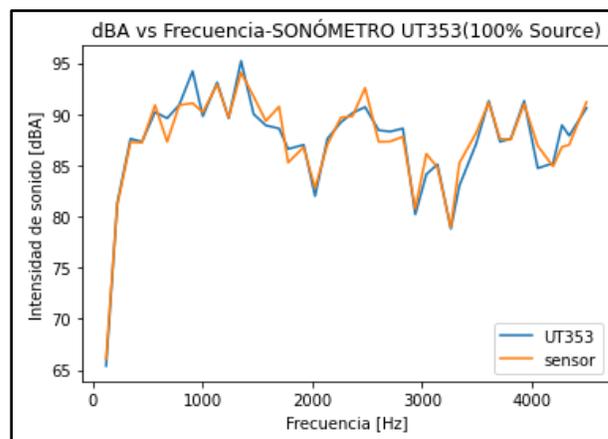


Fig. 5 Intensidad de sonido en dBA vs Frecuencia en Hz con un error relativo menor al $\pm 5\%$. Fuente: Autor

Posteriormente, se lleva a cabo el desarrollo de scripts que doten de funcionalidades de transmisión de datos a los nodos sensores y de recepción al nodo recolector, este último también con capacidades de calibrar los datos recibidos, almacenarlos temporalmente y enviarlos a una base de datos en la nube llamada *Influxdb cloud* disponible en el siguiente enlace considerando el uso de las siguientes credenciales de una cuenta en Google:

- Correo: flyjeff94@gmail.com
- Contraseña: social_network22

<https://ap-southeast-2-1.aws.cloud2.influxdata.com/orgs/8647bce7942d385d/data-explorer>

A continuación, en la Fig.6 se presenta un diagrama de bloques del funcionamiento de la red WSN diseñada, se aprecian los procesos que se llevan a cabo para ejecutar las tareas de transmisión recepción y almacenamiento de los datos recopilados por la red WSN diseñada y escritos en la nube influxdb cloud.

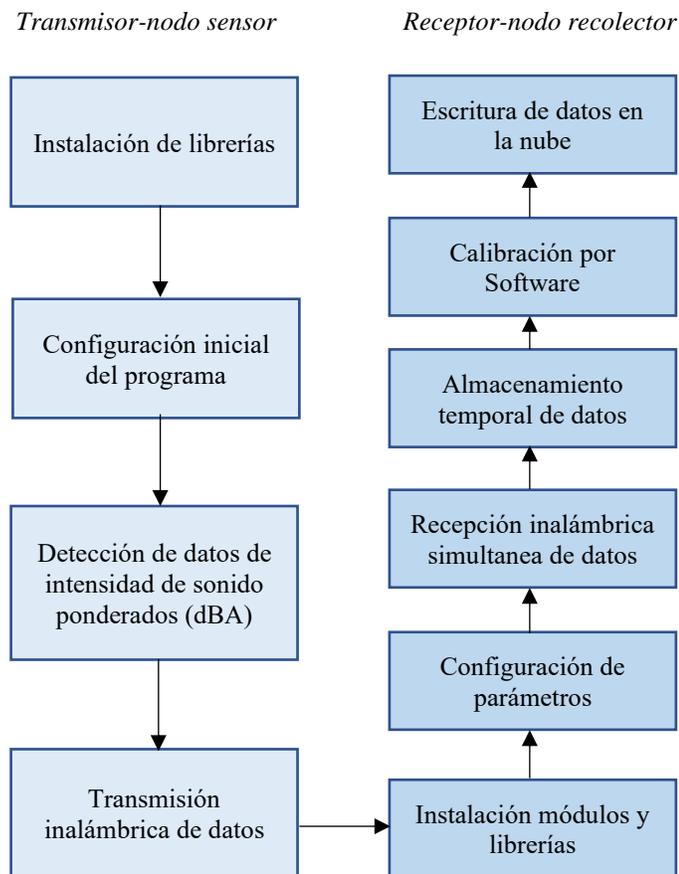


Fig. 6 Diagrama de bloques del funcionamiento de la red WSN diseñada.
Fuente: Autor

Transmisor-nodo sensor

1) Inserción de librerías:

Para efectuar esta tarea se necesita descargar las librerías adecuadas para el equipo involucrado, en el caso del dispositivo Arduino Uno se usan las librerías: nRF24L01, SPI y arduinoFFT [12].

2) Configuración inicial del programa:

Se configura el canal 0x66 y dos canales diferentes; específicamente los canales 0xE8E8F0F0E3 y 0xE8E8F0F0E6 para el nodo sensor 1 y 2 respectivamente, estos canales deben coincidir necesariamente con los configurados en el dispositivo recolector para una transmisión y recepción de datos exitosa [2].

3) Detección de niveles de intensidad de sonido en decibelios ponderados (dBA):

El proceso de detección de lleva a cabo con la implementación de la herramienta matemática FFT adquiriendo los niveles de intensidad de sonido en dB con mayor amplitud para posteriormente añadir el valor del filtro de ponderación y obtener la intensidad de sonido en decibelios ponderados (dBA).

4) Envío de datos:

Se prepara inicialmente el tipo de dato a enviarse, el cual es un array de caracteres que inicialmente se lo declara como un String, dato que almacena la potencia no calibrada en dBA, frecuencia y un identificador para distinguir a cada nodo sensor, posteriormente se calcula su longitud y se prepara el buffer o array de caracteres para almacenar dicho dato. Finalmente se emplea la instancia `radio.write (&texto,sizeof(texto))` para el trabajo de envío de datos; el símbolo "&" determina un indicador que apunta a la variable que contiene los datos que se desea enviar (texto), el segundo argumento establece la cantidad de bytes que utilizará dicha variable [13]. Las tareas mencionadas son implementadas en el script presente en el siguiente enlace:

https://docs.google.com/document/d/1u1sCXoZ3e07VFhQIZP U5udHAKsBoVCe8v2haM_pVCyM/edit?usp=sharing

Receptor-nodo Recolector

1) Inserción de librerías y complementos

Los procesos de recepción y almacenamiento inicial de datos se implementan activando la interfaz serial SPI e instalando el módulo `lib_nrf24` para hacer uso de la librería NRF24 y de las funciones de recepción de datos. También se importan las librerías `date time` para manejo del tiempo, `csv` para manejo de archivos con extensión `.csv` y la librería `RPi.GPIO` para configuraciones de pines generales de entrada y salida del dispositivo recolector.

2) Configuración de parámetros

Se configuran parámetros como: dos canales dispuestos en una lista de dos dimensiones y configurados en los nodos sensores, tamaño del payload en 32 bytes, canal de comunicaciones, velocidad de datos de 1 Mbps, nivel de amplificación de potencia mínimo y un mecanismo de detección de errores CRC (Cyclic Redundancy Check).

3) Recepción inalámbrica simultanea de datos

Se requiere activar la apertura del canal definido para cada nodo sensor, efectuar la lectura de los datos (payload) receptados por dispositivo de radio y la creación de dos listas vacías que permiten establecer temporalmente una lista en dos dimensiones para almacenar los datos de intensidad de sonido en un archivo con extensión `.csv` [14].

Se añade una funcionalidad implementada con los bloques `try`, `except` y `raise` de Python que permiten limitar el número de datos adquiridos, por consiguiente, al llegar al número de datos limite configurado se activa una excepción dentro del código

del programa obligándolo a parar la adquisición y almacenamiento de datos.

4) Proceso de calibración

Los datos almacenados temporalmente en el dispositivo recolector se usan dentro del proceso de calibración, ya que cada dato debe ser calibrado en función del valor determinado en el vector de compensación discutido en párrafos previos, de esta manera se crea otro archivo con los datos de intensidad de sonido en dBA calibrados para subirlos a la base de datos Influxdb cloud.

5) Escritura de datos en la nube

Para llevar a cabo dicha tarea, se requiere de una cuenta en la base de datos Influxdb Cloud que puede crearse ingresando a su página de inicio de sesión y llenando la correspondiente información para posteriormente seleccionar un servidor de AWS, Amazon o Azure donde se almacenarán los datos [15].

Posteriormente, se instala el módulo influxdb-client de Python, luego desde la página de influxdb cloud se crea un bucket y un token para autenticar el acceso y escritura de datos en la API (Application Programming Interfaz) de Influxdb Cloud. A partir de ello se inicializa el cliente utilizando los módulos y librerías necesarias, token, organización (correo electrónico), y url del servidor de la base de datos. El siguiente paso consiste en la creación de una estructura de datos tipo tupla que almacena los datos a escribirse en el bucket y consecuentemente llevar a cabo la escritura de los datos en la API de influxdb cloud [16].

Las tareas mencionadas son implementadas en el script presente en el siguiente enlace:

<https://docs.google.com/document/d/1ehNQiIBRroZszK1JST5AGeat8ipK5cHK9AGOssgD-xI/edit?usp=sharing>

Se considera el uso una cuenta gratis ya que permite un almacenamiento de hasta 10 000 datos o series durante un lapso de 30 días determinándose una elección óptima para este tipo de trabajo. Hay que recalcar que en la base de datos influxdb cloud cada dato escrito se considera una “serie” definida como una colección de puntos que comparten los siguientes parámetros: una medida, un conjunto de etiquetas (tag set) y una clave de campo (field key) [17]

Ahora, los datos recopilados por la red WSN pueden ser presentados a través del explorador de datos de Influxdb Cloud el cual permite apreciar la información recopilada por la red WSN a través de tablas, histogramas, mapas de calor u otras herramientas. También permite ejecutar tareas de filtrado mediante un grupo o un filtro y así visualizar los datos con mayor versatilidad que pueden ser descargados en un archivo con extensión .csv [17].

El diseño de la red WSN se desarrolla a partir de un *prototipo de estructura base* para alojar los módulos que constituyen los dispositivos de la red WSN; brindando soporte, protección y estabilidad.



Fig. 7 Caja de almacenamiento de componentes electrónicos Pro'sKit Fuente: Autor

El prototipo utiliza tres cajas Pro'sKit como la mostrada en Fig. 7, en la que se visualizan dos orificios efectuados en este caso para la inserción del módulo sensor de sonido y tranceptor inalámbrico. También, se considera la inserción de un switch y una batería de 9V para cada uno de los sensores motas. La movilidad teórica es máxima de un kilómetro respecto al nodo recolector. El nodo sensor está constituido por los siguientes dispositivos:

- Módulo tranceptor inalámbrico NRF24L01
- Módulo sensor de sonido MAX 9814
- Placa Arduino Uno
- Batería de 9V Energizer de 625 mAh
- Switch KCD11 3A, 250V
- Jack para batería de 9V para alimentación de Placa Arduino.
- 11 cables electrónicos macho hembra

Una vez efectuadas las modificaciones necesarias a la estructura base; el resultado final se muestra en Fig. 8.



Fig. 8 Nodo sensor de sonido. Fuente: Autor

El nodo recolector está constituido por los siguientes dispositivos:

- Módulo tranceptor inalámbrico NRF24L01
- Raspberry Pi modelo B+
- Cargador Micro Usb para alimentación de Raspberry Pi 5V 3A
- Cable de red con conector RJ45
- 7 cables electrónicos macho hembra.

De la misma manera en la Fig. 9 se presente el resultado final del nodo recolector.



Fig. 9 Nodo recolector o sink. Fuente: Autor

Se efectúa un cálculo del *consumo de energía y tiempo de duración de las baterías* de un nodo sensor considerando la corriente que los módulos que forman parte del equipo requieren para su correcto funcionamiento. El consumo de corriente de cada módulo se lo efectuó a través de mediciones con el multímetro en serie al módulo respectivo, obteniéndose la Tabla III

TABLA III
CONSUMO DE CORRIENTE DE LOS MÓDULOS DE UN SENSOR DE SONIDO.
FUENTE: AUTOR

Módulo	Consumo [mA]
Sensor de sonido MAX9814	3.5
Transceiver nRF24L01	7.5
Placa Arduino UNO	39
Total	50

El total de corriente se determinó a partir de una medición en serie con la batería de 9V y la placa Arduino Uno con todos sus módulos en funcionamiento. Luego se calculó una corriente de 39 mA correspondiente a la placa Arduino uno. Ahora, la potencia de consumo del sensor de sonido sería $P=V*I$ [W] siendo de 450 mW, en donde, $I = 50\text{mA}$; corriente total de consumo del sensor y apreciada en la Tabla III y $V=9$ [V]; voltaje de la batería. Para finalizar, se calculó el tiempo de duración de la batería " $T_{d,B}$ " que usa un nodo sensor como alimentación mediante la relación existente entre la capacidad de la batería en miliamperios hora (mAh) respecto a la corriente total que consume el dispositivo como se muestra en (2).

$$T_{d,B} [\text{Horas}] = \frac{\text{Capacidad de la Batería [mAh]}}{\text{Corriente total [mA]}} \quad (2)$$

Considerando la capacidad de 625 mAh que presenta la batería empleada en los nodos sensores y la corriente total mostrada en Tabla III, el tiempo de duración sería de 12.5 horas mismo que podría incrementarse si se insertan bancos de baterías en paralelo o batería de mayor capacidad.

La red de sensores diseñada e implementada permite la detección, transporte, recopilación, escritura y presentación de datos de intensidad de sonido medidos en dBA y almacenados en la nube Influxdb cloud. Mantiene una topología tipo estrella con dos nodos sensores con un envío periódico de datos configurable en segundos hacia un nodo recolector, tarea efectuada a través de un canal con dos canales distintos para

cada equipo sensor, los cuales deben coincidir con los canales de datos configurados en el nodo recolector. Se determinó una latencia en la escritura de datos debido al uso de una cuenta gratis de influxdb Cloud. A partir de varias pruebas de transmisión y recepción de diferentes números de datos de intensidad de sonido ambiental; se construye Fig. 10 y se determina un comportamiento lineal en el tiempo de escritura de datos, dicho comportamiento depende de la pendiente de la recta, denominado factor k; al tomar los puntos finales e iniciales de la gráfica en estudio se puede hallar la pendiente de la recta y corresponde a $k=1.2$.

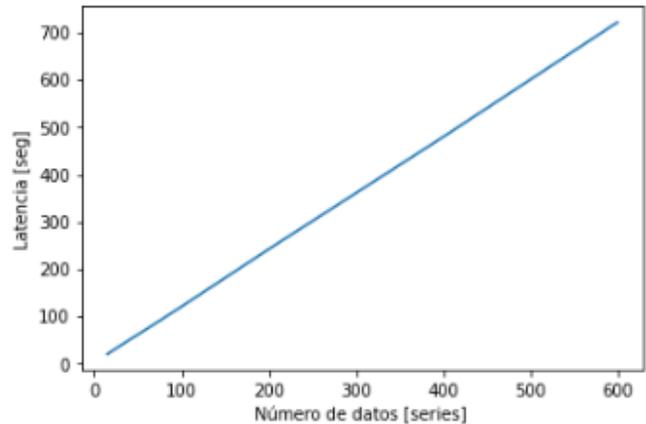


Fig. 10 Latencia vs número de datos a ser escritos. Fuente: Autor

Por ejemplo, si se toma en cuenta la recepción y escritura de datos durante 6 horas continuas y envío de datos cada 6 segundos; se tendrán 10 datos por minuto y considerando a (3):

$$\text{Número de datos} = \frac{\text{datos}}{\text{minuto}} * 60 * \text{horas} \quad (3)$$

Teóricamente se tendrán que escribir 3600 series o datos representando aproximadamente una latencia de 72 minutos; cálculo efectuado en base a (4).

$$y = \frac{mx}{60} \quad (4)$$

Donde:
y: latencia en minutos
m: pendiente o factor k
x: número de datos o series

También, se efectuó el *despliegue de la red de sensores inalámbrica* en la empresa de fabricación de lácteos Danilact, mismo que se llevó a cabo en las áreas de fabricación de queso mozzarella y queso fresco mostradas en Fig. 11(a) y (b) respectivamente.



Fig. 11 (a) y (b) Área 1 y 2 para elaboración de queso mozzarella y queso fresco, respectivamente. Fuente: Autor.

En el área 1 se ubicó el nodo sensor 1, mientras que en el área 2 el nodo sensor 2. La disposición elegida para instalar los nodos sensores se presentan en Fig. 12 (a) y (b); considerando que estas zonas son de mayor presencia de ruido industrial y concurrencia de trabajadores. Para la fijación de los equipos a la pared se usó cinta doble faz marca Truper que presenta un 200% mayor adhesión que las cintas normales. El soporte dispuesto para cada nodo sensor se lo efectúa a 16.5 cm respecto a la parte superior del nodo y se lo construyó en base a 3 capas de cartón, cinta doble faz, silicona negra marca ABRO e hilo textil industrial; sistema que brinda mayor estabilidad y fijación del nodo con una disposición aproximada de 90 grados respecto a la pared.

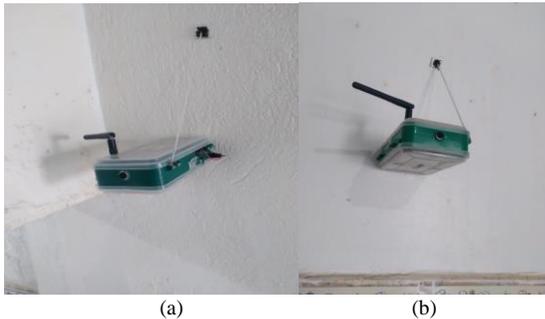


Fig. 12 (a) y (b) Instalación del nodo sensor 1 y 2, respectivamente, en sus correspondientes áreas. Fuente: Autor

El trabajo de instalación de los equipos continúa con la preparación del nodo recolector. Como se observa en Fig. 13, se considera un punto de red obtenido mediante un punto de acceso marca PIX LINK para brindar una conexión directa mediante un cable de red al equipo recolector, de esta manera el equipo tendrá la funcionalidad de escritura en la base de datos influxdb cloud, de otra forma los datos quedarían almacenados de manera temporal en el equipo recolector.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez puesta en marcha la red de sensores inalámbrica, mediante la ejecución de los programas desarrollados en Python y en C++; se pueden apreciar datos de intensidad de sonidos en

decibelios ponderados recopilados por la red de sensores inalámbrica.



Fig. 13 Instalación del nodo recolector. Fuente: Autor

Se añade con detalle el proceso de escritura y presentación de los datos de intensidad de sonido en dBA recopilados, teniendo en cuenta el almacenamiento de los datos en un servidor de AWS quién administra una base de datos en la nube llamada Influxdb Cloud. En la Tabla IV se presenta el contenido de un dato o serie recopilado por la red WSN.

TABLA IV.
CONTENIDO DE UN DATO O SERIE RECOPILODO POR LA RED WSN
DISEÑADA. FUENTE: AUTOR

Fecha y Hora	Etiqueta de Sensor	Intensidad de sonido[dBA]	Etiqueta de Frecuencia	Frecuencia [Hz]
17/8/2022 16:45:41	P2_dBA	60.27	F_Hz	316.58

De esta forma la red de sensores inalámbrica diseñada y desplegada efectuó la recopilación, almacenamiento y presentación de 408 datos de intensidad de sonido en decibelio ponderado (dBA) en influxdb cloud durante aproximadamente 40 minutos el miércoles 17 de agosto del 2022 y de 1592 datos durante aproximadamente 2.65 horas el jueves 18 de agosto del 2022. La red fue desplegada durante dos días lográndose construir una base de datos con un total de 2000 datos o series almacenadas y accesibles desde cualquier parte del mundo. A continuación, en el siguiente enlace; se pone a disposición los 2000 datos de intensidad de sonido en dBA descargados desde la API de influxdb cloud:

https://drive.google.com/file/d/1nZwehW_9lbjCN4GlpDbahvWTrK2nOmE4/view?usp=sharing

Por otro lado, el funcionamiento principal de los nodos sensores se lleva a cabo gracias a la programación del microcontrolador Atmega328; sin embargo, “S. Sonavane” presenta una solución de una red WSN empleando el microcontrolador MSP430 con un suministro de voltaje de 1-3.6 V y un reloj de cristal con una frecuencia mínima de 32.7 MHz; mejorando en el suministro de energía y tiempo de respuesta. En el presente estudio se hace uso del transceiver nRF24L01 para la transmisión y recepción de datos; debido a sus características bajo costo, altas velocidades y consumo reducido de energía. Las velocidades de datos elevadas se combinan con dos sistemas de ahorro de energía provistos por

Los autores agradecen a la Escuela Politécnica Nacional

REFERENCES

- [1] G. D. NAVARRA, «Disposiciones mínimas de seguridad y salud de los trabajadores relativas a la EXPOSICIÓN AL RUIDO», Instituto Navarro de Salud Laboral, NAVARRA, 2008.
- [2] S. S. Sonavane, V. Kumar, y B. P. Patil, «Designing wireless sensor network with low cost and low power», en 2008 16th IEEE International Conference on Networks, New Delhi, India, 2008, pp. 1-5. doi: 10.1109/ICON.2008.4772585.
- [3] X. Wang, C. Zhang, y S. Yang, «Design of Wireless Video Communication System Used to Monitor and Control Plant Disease», en 2009 International Conference on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing, Wuhan, China, abr. 2009, pp. 584-587. doi: 10.1109/NSWCTC.2009.235.
- [4] J. I. J. Mariñas, «Soft computing para el análisis de datos en Redes de Sensores Inalámbricas», Córdoba, 2013.
- [5] M. C. Padilla, «El Marco Lógico para el Diseño de Proyectos, BID, Banco Interamericano de desarrollo, Oficina de Apoyo regional de Operaciones, Oficina de Gestión de Cartera y Seguimiento de proyectos», noviembre, 2004.
- [6] R. E. Herrador, «01-guia_de_usuario_arduino.pdf», noviembre, 2009, Creative Commons Attribution-Noncommercial-Share Alike 3.0. [En línea]. Disponible en: https://foros.giltesa.com/otros/arduino/fc/docs/01-guia_de_usuario_arduino.pdf
- [7] Nordic Semiconductor, «NRF24L01 pdf, NRF24L01 Description, NRF24L01 Datasheet, NRF24L01 view :: ALLDATASHEET », [En línea]. Disponible en <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1243924/ETC1/NRF24L01.html>
- [8] M. integrated, «Microphone Amplifier with AGC and Low-Noise Microphone Bias, » 06 2009. [En línea]. Available: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/MAX9814.pdf>.
- [9] Amazon, «Amazon.com: Comimark MAX9814 - Amplificador de micrófono electret, 2 unidades, control de ganancia automática para Arduino: Electrónica». [En línea]. Disponible en: https://www.amazon.com/-/es/interruptor-detecci%C3%B3n-mic%C3%B3fono-adeecuado-Arduino-MAX9814/dp/B09CPLRMCL/ref=sr_1_16?crd=2JXTB0OZLQGNN&keywords=sensor%2Bmax9814&qid=1661396872&srefix=%2Caps%2C644&sr=8-16&th=1
- [10] Z. Gilvey, « MathWorks, MATLAB Answers, » 18 07 2019. [En línea]. Disponible en: <https://es.mathworks.com/matlabcentral/answers/472246-fft-to-dba-to-overall-dba>.
- [11] A. M. Manzano, «Transformada Rápida de Fourier Implementación y Algunas Aplicaciones,» Murcia, 06 2018. [En línea]. Disponible en: https://www.um.es/documents/118351/9850722/Mart%C3%ADnez+Manzano+TF_48705250_v2.pdf/c44507c8-e990-4aac-b282-927acadcedd1
- [12] GITHUB, «Libería nRF24L01 para Raspberry,» [En línea]. Disponible en: <https://github.com/nRF24/RF24>.
- [13] H. t. Mechatronics, «nRF24L01 – How It Works, Arduino Interface, Circuits, Codes, » [En línea]. Disponible en: <https://howtomechatronics.com/tutorials/arduino/arduino-wireless-communication-nrf24l01-tutorial/>.
- [14] Ramiro de la Vega, Pharos.sh, «Leer y escribir archivos CSV en Python,» [En línea]. Disponible en: <https://pharos.sh/leer-y-escribir-archivos-csv-en-python/>.
- [15] InfluxDB Cloud, «Create your Free account influxDB Cloud». [En línea]. Disponible en: <https://cloud2.influxdata.com/signup>
- [16] InfluxDB Cloud, «Use the InfluxDB Python client library | InfluxDB Cloud Documentation». [En línea]. Disponible en: <https://docs.influxdata.com/influxdb/cloud/api-guide/client-libraries/python>.
- [17] InfluxDB Cloud, «InfluxDB key concepts | InfluxDB OSS 1.8 Documentation». [En línea]. Disponible en: https://docs.influxdata.com/influxdb/v1.8/concepts/key_concepts/.

el propio dispositivo: un regulador de voltaje interno que asegura el rechazo de un suministro elevado de energía y un amplio rango de suministro de potencia; por su parte “S. Sonavane”, considera mantener al equipo transeiver la mayor parte del tiempo en modo sleep logrando un ahorro significativo de consumo de energía; se abordan los distintos estados de consumo de energía : enviando (sending), recibiendo (receiving), idle (estado sleep) y stanby [2].

Se emplea el modo Multiceiver para lograr una recepción simultánea de datos a través de un canal principal en la banda de los 2,4 GHz; según “X. Wang”, se deben aprovechar los 6 canales o subcanales que comparten un canal de frecuencia similar, sin embargo, en el uso de los subcanales o canales se limita al número de nodos sensores a desplegarse en una zona de estudio [3].

Los datos de intensidad de sonido en dBA recopilados por la red WSN implementada permiten apreciar valores promedios de 68.64 [dBA] y máximos de 85.27 [dBA]. Los valores promedio se establecen en el rango de valores aceptables según la norma ISO 9612:2009, mientras que el valor máximo apreciado provocaría efectos negativos en la salud auditiva.

IV. CONCLUSIONES

La red de sensores inalámbrica implementada efectuó las tareas de recopilación almacenamiento y presentación de datos de eventos de contaminación acústica industrial o intensidad de sonido en dBA de manera exitosa considerando el monitoreo de dos áreas de producción de la empresa Danilact, sin embargo se presentan limitaciones en cuanto a la velocidad de escritura y almacenamiento de los datos debido al uso de una cuenta gratis en Influxdb Cloud; específicamente una latencia de 1,2 segundos en la escritura de datos o series de 55 Bytes y el borrado de datos luego de 30 días de almacenamiento.

Las limitaciones mencionadas no se consideraron un obstáculo debido al número de datos almacenado por la red de sensores implementada y se pueden superar dichas limitaciones ejecutando una recopilación de datos periódica o actualizando la cuenta gratis a una cuenta basada en uso o anual.

También, el módulo transeceptor inalámbrico NRF24L01 y su protocolo empleado Enhanced Shockburst potenciaron el funcionamiento e implementación de la red WSN debido a sus características como: geometría, alcance y funcionalidad Multiceiver; permitiendo a través de una topología en estrella; la transición y recepción simultánea de datos con canales diferentes a través de un canal que trabaja en la banda ISM no licenciada de los 2.4 GHz

La API (Application Programming Interfaz) de Influxdb Cloud a través de su explorador de datos habilita la visualización y filtrado de las series recopiladas y almacenadas por la red de sensores inalámbrica y desplegada en la empresa Danilact. Consecuentemente se construyeron 2000 series dentro de una base datos localizada en un Servidor de AWS en US West Oregon misma que puede servir para la ejecución de algún tipo de procesamiento de datos a través de técnicas avanzadas de procesamiento digital de señales.