



**Desarrollo una red de sensores que permita la monitorización de los niveles de contaminación
mediante tecnología LPWAN**

Ramírez Tacuri, Wellington Gabriel

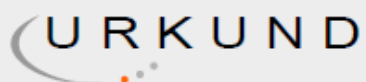
Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones

Ing. Lara Cueva, Román Alcides PhD.

15 de Agosto del 2020



Urkund Analysis Result

Analysed Document: Ramirez_WGabriel_Proyecto_Investigacion.pdf (D77309034)
Submitted: 7/30/2020 4:12:00 AM
Submitted By: wgramirez1@espe.edu.ec
Significance: 2 %

Sources included in the report:

Román

Lara Cueva

Firmado digitalmente
por Román Lara Cueva
Fecha: 2020.07.30
14:56:11 -05'00'

1553994563_TESIS_CORREGIDO.docx (D49937843)

Tesis_BryanAllauca.pdf (D77308949)

LA TESIS.pdf (D48179550)

<https://www.mdpi.com/1424-8220/11/3/2652>

<https://developer.android.com/studio/intro?hl=es-419>

<https://naylampmechatronics.com/conversores-dc-dc/196-convertidor-voltaje-dc-dc-step-down-3a-lm2596.html>

https://www.uv.mx/pozarica/mca/files/2019/05/G02_MACARIO-ISAIAS-BARRIOS-MELCHOR.pdf

Instances where selected sources appear:

12



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “Desarrollo una red de sensores que permita la monitorización de los niveles de contaminación mediante tecnología LPWAN” fue realizado por el señor **Ramírez Tacuri Wellington Gabriel** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 11 de Agosto del 2020

Román
Lara Cueva

Firmado digitalmente
por Román Lara Cueva
Fecha: 2020.08.14
08:42:53 -05'00'

.....
Lara Cueva, Alcides Román

C. C. 1713988218



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo, **Ramírez Tacuri, Wellington Gabriel**, con cédula de ciudadanía n° 172442036-7, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Desarrollo una red de sensores que permita la monitorización de los niveles de contaminación mediante tecnología LPWAN** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 11 de Agosto del 2020

Firma

Ramírez Tacuri, Wellington Gabriel

C.C.: 172442036-7



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo **Ramírez Tacuri, Wellington Gabriel**, con cédula de ciudadanía n° **172442036-7**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Desarrollo una red de sensores que permita la monitorización de los niveles de contaminación mediante tecnología LPWAN** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 11 de Agosto del 2020

Firma

Gabriel R

Ramírez Tacuri, Wellington Gabriel

C.C.: 172442036-7

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a Dios y mi Cristo por la salud, la vida y las fuerzas para llevar a cabo todo el esfuerzo necesario empleado en el desarrollo de todo el proyecto, a mi madre Violeta, mi hermana Priscila y hermano Antonio que siempre han estado incondicionalmente apoyándome en el transcurso de toda la carrera universitaria, en especialmente a mi madre Violeta por ser una fuente de inspiración y de superación a lo largo de toda mi vida.

Ramírez Tacuri Wellington Gabriel

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por darme la oportunidad de permitirme culminar con este gran paso dentro de mi vida, a toda mi familia que estuvo acompañándome en todos los buenos y malos momentos en todo el trayecto de mi carrera universitaria.

Agradezco al Director del proyecto de investigación Ing. Román Lara, por toda la paciencia y la asistencia prestada para el desarrollo y culminación del proyecto, así como con las revisiones del mismo.

Agradezco al Doctor Vicente Delgado por guiarme con directrices específicas para el desarrollo del proyecto así como con la ayuda prestada con los equipos del Laboratorio de Medio Ambiente de la Universidad.

Agradezco a mis amigos de facultad Stalin, Alejandro, Jhony, Marcelo, Byron, Bryan, a mis amigos personales Johan, Alex, Katherine, Marco y Sandy los que me han acompañado a lo largo de este largo trayecto, apoyándome y brindando su amistad conmigo.

Ramírez Tacuri Wellington Gabriel

Índice de Contenidos

Reporte de verificación de similitud _____	2
Certificado del director del proyecto _____	3
Responsabilidad de Autoria _____	4
Autorización de Publicación _____	5
Dedicatoria _____	6
Agradecimiento _____	7
Índice de Contenidos _____	8
Índice de tablas _____	12
Índice de figuras _____	15
Resumen _____	19
Abstract _____	20
Capitulo 1 _____	21
Introducción _____	21
Antecedentes _____	21
Justificación e Importancia _____	27
Alcance del Proyecto _____	30
Objetivos _____	31
General _____	31

	9
Específicos _____	31
Capítulo 2 _____	33
Marco Teórico _____	33
Contaminación del aire _____	33
Contaminantes primarios _____	35
Contaminantes secundarios _____	37
Redes de sensores inalámbricos WSN _____	40
Arquitectura de las redes de sensores inalámbricas _____	42
Internet de las cosas _____	44
Características del IoT _____	46
Categorías de Aplicación del IoT _____	47
Redes LPWAN _____	49
SigFox _____	51
Capítulo 3 _____	61
Materiales y Métodos _____	61
Medición de gases contaminantes _____	61
Muestreador Activo _____	61
Muestreador Pasivo _____	64
Comunicación Inalámbrica _____	65
Módulo Dev Thinxtra SigFox _____	65
Arduino Uno _____	67

	10
Sensores de gases _____	68
Sensor de CO _____	68
Sensor de CO2 _____	69
Sensor de NO2 _____	71
Alimentación y encapsulamiento del dispositivo _____	72
Muestreador activo _____	72
Muestreador pasivo _____	74
Convertidor Step - Down _____	76
Interfaz gráfica para el usuario _____	76
Capítulo 5 _____	78
Desarrollo e Implementación _____	78
Arquitectura del Sistema _____	78
Subsistema Transmisor _____	82
Sistema receptor _____	95
Implementación _____	111
Calibración de sensores _____	111
Frecuencia de Muestreo _____	113
Despliegue de la red de sensores _____	115
Capítulo 5 _____	121
Análisis de Resultados _____	121
Resultados Obtenidos _____	121

	11
Resultados obtenidos en interiores _____	121
Resultados obtenidos en exteriores _____	134
Análisis de Resultados _____	146
Interiores _____	146
Exteriores _____	155
Conclusiones y Recomendaciones _____	164
Referencias _____	168
Anexos _____	175

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Frame de SigFox _____	56
Tabla 2 Descripción de tipos de suscripción _____	57
Tabla 3 Especificaciones del muestreador de aire GILIAN BDX II _____	62
Tabla 4 Especificaciones del servomotor DS3218 _____	64
Tabla 5 Características del Chip WISOL _____	66
Tabla 6 Análisis Comparativo entre MQ7 y 4CO 500 _____	68
Tabla 7 Análisis Comparativo entre MQ135 y MQ811 _____	70
Tabla 8 Características del sensor MQ 131 _____	71
Tabla 9 Características de Batería _____	73
Tabla 10 Características de Batería _____	75
Tabla 11 Características del convertidor LM2596 _____	76
Tabla 12 Periféricos controlados por Arduino _____	88
Tabla 13 Decodificación de los datos _____	96
Tabla 14 Cuerpo del mensaje decodificado _____	96
Tabla 15 Características de los objetos TextView _____	103
Tabla 16 Criterio de altura de la estación de medición _____	118
Tabla 17 Estaciones reconocidas en la toma de mediciones _____	132
Tabla 18 Estaciones reconocidas en la toma de mediciones _____	132
Tabla 19 Estaciones reconocidas en la toma de mediciones _____	133
Tabla 20 Estaciones reconocidas en la toma de mediciones _____	133
Tabla 21 Estaciones reconocidas en la toma de mediciones m. activo _____	144
Tabla 22 Estaciones reconocidas en la toma de mediciones m. pasivo _____	144

Tabla 23 Estaciones reconocidas en la toma de mediciones en m. activo _____	145
Tabla 24 Estaciones reconocidas en la toma de mediciones m. pasivo _____	145
Tabla 25 Tabla comparativa de mediciones en el día 6 de Junio _____	146
Tabla 26 Tabla comparativa de mediciones en el día 7 de Junio _____	147
Tabla 27 Tabla comparativa de mediciones en el día 6 de Junio _____	148
Tabla 28 Tabla comparativa de mediciones en el día 7 de Junio _____	148
Tabla 29 Tabla comparativa de mediciones en el día 6 de Junio _____	149
Tabla 30 Tabla comparativa de mediciones en el día 7 de Junio _____	149
Tabla 31 Tabla comparativa de mediciones en el día 6 de Junio _____	150
Tabla 32 Tabla comparativa de mediciones en el día 7 de Junio _____	150
Tabla 33 Indicadores de calidad de señal _____	151
Tabla 34 Tabla comparativa de SNR del día 6 de Junio _____	152
Tabla 35 Tabla comparativa de SNR del día 7 de Junio _____	152
Tabla 36 Tabla comparativa de estaciones y mensajes recibidos en el día 6 de Junio _____	153
Tabla 37 Tabla comparativa de estaciones y mensajes recibidos en el día 7 de Junio _____	153
Tabla 38 Tabla comparativa de mediciones en el día 11 de Junio _____	155
Tabla 39 Tabla comparativa de mediciones en el día 19 de Junio _____	156
Tabla 40 Tabla comparativa de mediciones en el día 11 de Junio _____	157
Tabla 41 Tabla comparativa de mediciones en el día 19 de Junio _____	157
Tabla 42 Tabla comparativa de mediciones en el día 11 de Junio _____	159
Tabla 43 Tabla comparativa de mediciones en el día 19 de Junio _____	159
Tabla 44 Tabla comparativa de mediciones en el día 11 de Junio _____	160
Tabla 45 Tabla comparativa de mediciones en el día 19 de Junio _____	160

Tabla 46 Tabla comparativa de mediciones en el día 11 de Junio _____	161
Tabla 47 Tabla comparativa de mediciones en el día 19 de Junio _____	161
Tabla 48 Tabla comparativa de mediciones en el día 11 de Junio _____	162
Tabla 49 Tabla comparativa de mediciones en el día 19 de Junio _____	162

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Fuentes, tipos de contaminantes, procesos y efectos generales en contaminación atmosférica _____	38
Figura 2 Equipos para la monitorización de la calidad del aire _____	39
Figura 3 Arquitectura de las redes de sensores inalámbricas _____	43
Figura 4 Elementos de un nodo sensor _____	43
Figura 5 Aplicaciones asociadas el IoT _____	49
Figura 6 Cobertura vs Ancho de banda en tecnologías inalámbricas _____	50
Figura 7 Cobertura mundial de SigFox _____	52
Figura 8 Cobertura de SigFox a nivel nacional _____	53
Figura 9 Ultra Narrow Band usada en SigFox. _____	54
Figura 10 Robustez de la modulación UNB _____	54
Figura 11 Configuraciones de radio SigFox _____	55
Figura 12 Diseño de Seguridad de la red de SigFox _____	58
Figura 13 Arquitectura de SigFox _____	59
Figura 14 Muestreador de Aire BDX II Air Sampler _____	62
Figura 15 Filtro de Microfibra de 3.1µm _____	63
Figura 16 Válvula de 3 vías con toma común _____	63
Figura 17 Distribución de pines del XKit Thinextra _____	65
Figura 18 Diagrama de bloques del chip WISOL _____	66
Figura 19 Distribución de pines del Arduino UNO _____	67
Figura 20 Distribución de pines del módulo MQ 7 _____	69
Figura 21 Distribución de pines MQ 135 _____	71

	16
Figura 22 Distribución de pines del módulo MQ 131 _____	72
Figura 23 Cámara de medición en vista isométrica (muestreador activo) _____	74
Figura 24 Cámara de medición en vista isométrica (muestreador pasivo) _____	75
Figura 25 Esquema del prototipo _____	78
Figura 26 Subsistemas del prototipo (Muestreador activo) _____	80
Figura 27 Subsistemas del prototipo (Muestreador pasivo) _____	81
Figura 28 Curva de sensibilidad sensor MQ 135 _____	82
Figura 29 Sensibilidad respecto a CO ₂ _____	83
Figura 30 Linealización del sensor MQ 135 _____	84
Figura 31 Sensibilidad del módulo MQ 131 _____	85
Figura 32 Linealización del sensor MQ 131 _____	86
Figura 33 Sensibilidad con respecto al CO _____	87
Figura 34 Linealización del sensor MQ 7 _____	88
Figura 35 Conexión de los sensores al Arduino (M. activo y pasivo) _____	89
Figura 36 Conexión de los periféricos de salida al Arduino (M. activo) _____	90
Figura 37 Elección del proveedor _____	91
Figura 38 Ingreso del ID y PAC _____	91
Figura 39 Dispositivo Registrado _____	92
Figura 40 Diagrama de flujo establecido _____	93
Figura 41 Frame de SigFox configurado _____	95
Figura 42 Callback configurado correctamente _____	97
Figura 43 Notificación mediante e-mail _____	98
Figura 44 Callback en el e-mail _____	99

	17
Figura 45 Estructura de base de datos _____	99
Figura 46 Interfaz principal de la aplicación _____	102
Figura 47 Acceso a la base de datos _____	104
Figura 48 Obtención de los datos _____	104
Figura 49 Obtención de la grafica _____	105
Figura 50 Grafica obtenida en simulación _____	106
Figura 51 Respuesta del script _____	107
Figura 52 Graficas de la página web _____	108
Figura 53 Recopilación de datos _____	110
Figura 54 Obtención de la tabla de información _____	111
Figura 55 Calibración del dispositivo _____	112
Figura 56 Inyección de contaminantes conocidos _____	113
Figura 57 Disposición de los elementos. (Muestreador activo) _____	115
Figura 58 Disposición de los elementos. (Muestreador pasivo) _____	116
Figura 59 Disposición de los nodos de medición _____	117
Figura 60 Despliegue de los nodos de medición _____	118
Figura 61 Ubicación de los nodos de medición - despliegue en interiores _____	119
Figura 62 Despliegue de nodos en interiores _____	120
Figura 63 Mediciones de CO ₂ obtenidas en interiores _____	122
Figura 64 Mediciones de CO ₂ obtenidas en interiores _____	123
Figura 65 Mediciones de CO obtenidas en interiores _____	124
Figura 66 Mediciones de CO obtenidas en interiores _____	125
Figura 67 Mediciones de NO ₂ obtenidas en interiores _____	126

	18
Figura 68 Mediciones de NO ₂ obtenidas en interiores _____	127
Figura 69 Mediciones de RSSI obtenidas en interiores _____	128
Figura 70 Mediciones de RSSI obtenidas en interiores _____	129
Figura 71 Mediciones de SNR obtenidas en interiores _____	130
Figura 72 Mediciones de SNR obtenidas en interiores _____	131
Figura 73 Mediciones de CO ₂ obtenidas en exteriores _____	134
Figura 74 Mediciones de CO ₂ obtenidas en exteriores _____	135
Figura 75 Mediciones de CO obtenidas en exteriores _____	136
Figura 76 Mediciones de CO obtenidas en exteriores _____	137
Figura 77 Mediciones de NO ₂ obtenidas en exteriores _____	138
Figura 78 Mediciones de NO ₂ obtenidas en exteriores _____	139
Figura 79 Mediciones de RSSI obtenidas en exteriores _____	140
Figura 80 Mediciones de RSSI obtenidas en exteriores _____	141
Figura 81 Mediciones de SNR obtenidas en exteriores _____	142
Figura 82 Mediciones de SNR obtenidas en exteriores _____	143
Figura 83 Ubicación del despliegue de la red de sensores en interiores _____	155
Figura 84 Ubicación de estación ambiental más cercana al campus universitario _____	158
Figura 85 Ubicación del despliegue de la red de sensores en interiores _____	163

RESUMEN

El uso de los dispositivos tecnológicos ha cambiado la forma en que los individuos interactúan con su entorno, esto se ha introducido dentro de varios campos uno de ellos la educación. Dentro del campo de la educación se ha destacado *Smart University*, básicamente el enfoque principal es la creación de herramientas tecnológicas que contribuyan con el aprendizaje y la enseñanza, sin embargo, también se impulsa el cambio en otros aspectos como la gestión, seguridad, movilidad, medio ambiente, etc. Actualmente para contribuir con el desarrollo de estas herramientas, han surgido nuevos conceptos como: el IoT (del inglés *Internet of Things*), *Big Data* y *Cloud Computing*. El concepto de IoT nace con la idea de generar soluciones por medio de la interconexión de objetos o cosas con acceso a Internet y así estos puedan enviar datos de interés con el objetivo de conocer y manipular el estado del entorno. La expansión y el crecimiento global del IoT hace necesario la utilización de redes LPWAN (del inglés *Low Power Wide Area Network*).

En el presente proyecto se desarrolló una red de sensores compuesta por dos estaciones de monitorización, en las que se aplican dos metodologías distintas para la obtención de las muestras, una estación como muestreador activo y la segunda como muestreador pasivo. En primer lugar, se definen los contaminantes a monitorizar, los cuales comprenden tres contaminantes fundamentales como son Dióxido de Carbono, Monóxido de Carbono y Dióxido de Nitrógeno, así se diseñó la red de sensores sea capaz de integrarse con la red de SigFox, la misma que se utilizó para transmisión de la información obtenida. Se desplegó la red de sensores en el Sur de Quito para el escenario en interiores mientras que en exteriores en el campus Universitario de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, dichos datos se presentan en una aplicación móvil y una página web que indican las emisiones en partes por millón (ppm) de los gases contaminantes. De esta manera se encontró la relación de las variables ambientales con respecto a las metodologías expuestas, así como la incidencia del encapsulamiento de los dispositivos.

Palabras Clave:

- **SIGFOX**
- **CONTAMINACIÓN**
- **INTERNET DE LAS COSAS**
- **SMART UNIVERSITY**

ABSTRACT

The use of technological devices has changed the way in which individuals interact with their environment, this has been introduced within several fields, one of them education. Within the field of education, Smart University has stood out, basically the main focus is the creation of technological tools that contribute to learning and teaching, however, change is also promoted in other aspects such as management, security, mobility, environment etc. Currently to contribute to the development of these tools, new concepts have emerged such as: the IoT (English Internet of Things), Big Data and Cloud Computing. The concept of IoT was born with the idea of generating solutions by means of the interconnection of objects or things with Internet access so that they can send interesting data with the aim of knowing and manipulating the state of the environment. The global expansion and growth of the IoT requires the use of LPWAN (Low Power Wide Area Network) networks.

In the present project, a sensor network consisting of two monitoring stations was developed, in which two different methodologies are applied to obtain the samples, one station as the active sampler and the second as the passive sampler. Firstly, the pollutants to be monitored are defined, which comprise three fundamental pollutants such as Carbon Dioxide, Carbon Monoxide and Nitrogen Dioxide, thus the sensor network was designed to be able to integrate with the SigFox network, the same that was used to transmit the information obtained. The sensor network was deployed in the south of Quito for the indoor scenario while outdoors on the University campus of the University of the Armed Forces - ESPE, these data are presented in a mobile application and a web page that indicates the emissions in parts per million (ppm) of the polluting gases. In this way, the relationship of the environmental variables with respect to the exposed methodologies was found, as well as the incidence of encapsulation of the devices.

Keywords:

- **SIGFOX**
- **POLLUTION**
- **INTERNET OF THINGS**
- **SMART UNIVERSITY**

CAPITULO I

Introducción

1.1 Antecedentes

Desde los inicios de la primera revolución industrial hasta mediados de los años noventa, se hace notable mencionar que en la industria en general no se tenía ninguna preocupación concerniente al medio ambiente ni a los efectos que la contaminación provoca en los seres humanos. El cambio del sistema productivo, basado en inicios en la agricultura y artesanías se transformó en la aplicación de nuevas tecnologías en la forma del trabajo y la creación de nuevos procesos industrializados. La gran producción de operaciones industriales, la fabricación de productos a partir de la quema de combustibles fósiles, el procesamiento de minerales, los procesos de plantas químicas y otras industrias, se convirtieron en las fuentes dominantes de la contaminación del aire de forma que las emisiones de gases contaminantes y sustancias tóxicas aumentaron significativamente (Sons, 2006).

En 1958, la Organización Mundial de la Salud (OMS) fue la primera institución que se enfocó en estudiar acerca de este tema, de manera que se publicaron una serie de reportes técnicos en los cuales se detalla la contaminación del aire, las fuentes contaminantes del aire, los factores que afectan la calidad del aire, los métodos para medir la concentración de contaminantes y los efectos que esta provoca sobre la salud (WHO, 1958). En años posteriores la OMS estima que más de 3 millones de muertes prematuras en diferentes regiones fueron causadas por la exposición a la contaminación del aire, de esta forma se muestra que el problema no afecta solamente a entornos dentro de la naturaleza, sino también al estado de

salud de los grupos sociales ubicados en las diferentes zonas geográficas sobre las cuales los gases contaminantes repercuten.

En 2012, se establece que uno de cada nueve muertes fueron el resultado de la contaminación del aire, sin embargo esta incidencia de muertes se observa más en los ciudadanos de África, Asia o Medio Oriente los cuales respiran niveles mucho más altos de contaminantes que en otras partes del mundo; dentro del Reporte anual de la Calidad del Aire se analiza una visión general del estado de la calidad del aire y se plantea un ranking de ciudades más contaminadas del mundo con respecto al material particulado (PM 2.5), en el cual Nueva Delhi en India y Dhaka en Bangladesh son las dos primeras ciudades que encabezan este ranking con índices de 111.3 y 97.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente, en las ciudades mencionadas la incidencia de esta contaminación se debe principalmente a las emisiones vehiculares, la quema de cultivos, las emisiones industriales y la combustión de carbón. Por otro lado se tiene que solo 9 de las 62 capitales regionales analizadas se encuentran dentro de las pautas fijadas por la OMS las cuales indican que el promedio anual del PM2.5 debe ser inferior a 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

En el año 2015, miembros de la OMS al enfrentarse a esta importante amenaza sobre la salud pública mundial adoptaron la primera resolución de la Asamblea Mundial de la Salud con el objetivo de abordar los efectos adversos de la contaminación del aire para la salud. La resolución WHA 68.8 fue definida en función del riesgo de mortalidad observado, reconociendo que para este año se suscitan alrededor de 4.3 millones de muertes debido a la exposición del aire contaminado en interiores y 3.7 millones de muertes son atribuibles a la contaminación del

aire en exteriores. Dicha exposición al aire contaminado también es un factor de riesgo para enfermedades como cardiopatías isquémicas, accidentes cerebrovasculares, enfermedades pulmonares obstructivas crónicas, el asma y el cáncer, las cuales representan una amenaza considerable para la salud de las generaciones actuales y futuras.

La contaminación del aire se ha convertido en un tópico a considerar, no solamente por la OMS sino también por la Organización de las Naciones Unidas (ONU), la cual en la Asamblea realizada en el año 2015 entabla un comité encargado de combatir los problemas de desarrollo persistentes del mundo en los próximos 15 años, con el fin de buscar un desarrollo sostenible. Se define que la calidad del aire de cada ciudad también es un indicador para el desarrollo urbano sostenible, de esta manera se enfocan en 3 de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), específicamente en el objetivo 11, se detalla que los niveles de contaminación del aire en las ciudades se constituyó como un indicador para el desarrollo urbano sostenible; en el objetivo 7, se hace énfasis en el acceso a energía limpia particularmente combustibles y tecnologías limpias para el hogar y finalmente en el objetivo 3, en el cual se establece garantizar una vida saludable y promover el bienestar para todos y todas en todas las edades.

Así se menciona que este factor afecta tanto en los países desarrollados como en los que se encuentran en vías de desarrollo; en el primer caso debido al alto volumen de la producción industrial y al flujo intenso de los automotores mientras que para el segundo caso ocurre en función del desarrollo no planificado, al uso de las tecnologías obsoletas en la industria de producción, los servicios de transporte, la mala calidad del saneamiento básico y la

falta de planificación en el crecimiento urbanístico. Cada vez con el crecimiento poblacional se hace necesario la demanda de grandes cantidades de energía para satisfacer las necesidades de los habitantes por lo que se necesita el consumo de electricidad y combustibles para el desarrollo de diversas actividades del diario vivir (Ambiente M. d., 2010).

En Ecuador, el problema de la contaminación del aire se hace evidente debido a la gran circulación de la flota vehicular presente en las urbes y a la presencia de industrias manufactureras los cuales son los principales responsables de las emisiones de gases contaminantes. Sin embargo cabe mencionar otros problemas asociados con este tópico a nivel país, como lo son los impactos producidos por la actividad de hidrocarburos, por derrames de petróleo, e incineración de gas natural que emanan los yacimientos en la región Amazónica, de la misma manera las fumigaciones aéreas efectuadas en las plantaciones de banano realizadas en la región Costa y en la frontera Norte (GeoEcuador, 2008).

Las ciudades en las cuales se evidencia más problemas relacionados con la calidad del aire son Quito, Guayaquil y Cuenca, específicamente en Quito la gestión de calidad del aire adquiere cierta importancia; a partir del año 2004, la Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito emprendió con una alternativa denominada Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito con el fin de proveer información oportuna a los ciudadanos y a las diferentes autoridades con respecto a la calidad del ambiente. Esta iniciativa engloba cinco subsistemas, de los cuales los dos primeros comprenden la medición de gases propiamente contaminantes. El primer subsistema denominado Red Automática de Calidad del Aire establece

el control de calidad de aire con un total de ocho estaciones distribuidas a lo largo del distrito, el segundo denominado Red de Monitoreo Pasivo (REMPA) la cual es una red pasiva que mide la concentración de contaminantes en periodos más extensos (días o meses) (Chuquer, y otros, 2018)

En la ciudad de Guayaquil se evidencia que en el año 2003 se realizó un estudio en el que se efectuaron mediciones en 51 puntos de la ciudad, en los que se emplearon equipos portátiles que contaban con 8 parámetros de monitorización como son óxido de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO_2), benceno (C_6H_6), tolueno (C_7H_8), xileno (C_8H_{10}), compuestos orgánicos volátiles (COV), límites de explosividad, material particulado (PM) y ruido. Los resultados que se presentaron muestran que las emisiones de CO, ozono (O_3), C_8H_{10} y COV se encontraron debajo del límite permisible, mientras que las emisiones de SO_2 y ruido sobrepasan los límites establecidos, todo el análisis se basó en el índice ORAQUI el cual se fundamenta en la norma de calidad del aire impuesta por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (UCE, 2004).

En la ciudad de Cuenca las investigaciones planteadas acerca del tema en cuestión han sido bastante puntuales, se han centrado específicamente en el Centro Histórico de la Ciudad, lugar en el cual se plantearon mediciones de COV, CO y dióxido de nitrógeno (NO_2). Los resultados determinaron que en los parámetros analizados se sobrepasa los índices especificados en la norma ecuatoriana de calidad del aire. Por otro lado, se establecieron 20 puntos de monitorización pasivos de NO_2 y O_3 , en los que se registró que 11 de ellos

presentaron valores que superaron los límites máximos establecidos por la OMS. Los estudios mencionados a pesar de servir como una referencia para conocer el estado de la calidad del aire presentan ciertas limitaciones metodológicas por los cortos tiempos de monitorización lo que dificulta la generación de datos constantes en el tiempo (CEA, 2006).

En los últimos años con el crecimiento de la tecnología inalámbrica, se ha propuesto varios estudios que han abordado esta problemática, como (Meneses, 2015) estudio que realizó la implementación de un sistema de monitorización de Dióxido de carbono (CO₂) mediante redes de sensores inalámbricos en el campus universitario de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE con el uso de la tecnología *Zigbee*. En este estudio se plantearon dos análisis, el primero constó del despliegue en exteriores, ubicando dos nodos de monitorización con su respectivo *gateway*, cada uno separado una distancia de 30 metros entre ellos y 80 metros con respecto al *gateway*, además en esta sección del estudio se hace referencia en el impacto de los distintos tipos de climas que pueden suscitarse sobre las mediciones realizadas; el segundo análisis constó del despliegue en interiores con la ubicación de 6 nodos de monitorización y la presencia de varios alumnos dentro del laboratorio. Los resultados presentados por este estudio detallan que en las pruebas en interiores no se obtuvieron valores elevados por lo que se concluye que la calidad del aire es aceptable, en cambio en exteriores las mediciones dependen en cierta parte de la variación del clima.

De forma análoga con respecto a este tópico se planteó en (Acero & Reyes, 2016) las mediciones de tres gases contaminantes como son CO, NO₂ y O₃ mediante el uso de tecnología

3G para la transmisión de los datos en tiempo real, para lo cual se definió una ruta de mediciones partiendo desde la Escuela Politécnica Nacional seguido de varios sectores caracterizados por el alto flujo vehicular, además se consideró un sistema de posicionamiento global (GPS, del inglés *Global Positioning System*) para obtener la ubicación precisa donde se está realizando la medición. Se presentan tres bloques fundamentales: la adquisición y procesamiento de datos se realizó mediante el uso de Arduino Uno y Raspberry Pi, el almacenamiento se lo definió en base de un servidor virtual propietario de la universidad, y la visualización mediante una interfaz que permita observar al usuario los datos recopilados. En los resultados presentados dentro de la ruta establecida se presentan niveles dentro de los límites establecidos por los valores en el Índice Quiteño de Calidad del Aire (IQCA).

De esta manera el estudio de las variables ambientales se hace necesario con el fin de establecer las áreas que son afectadas por la contaminación, el horario de más afluencia o concurrencia de los eventos que la ocasionan además de establecer parámetros que permitan conocer la calidad del aire. Siendo así el tema planteado hace referencia a dos contaminantes primarios como los son CO y NO₂, por otro lado el CO₂ se lo define debido a que es un componente principal en las emisiones de gases contaminantes vehiculares.

1.2 Justificación e Importancia

La contaminación es un cambio perjudicial en las características físicas, químicas o biológicas del aire, la tierra o el agua, que afectan nocivamente la vida humana, las especies naturales, los ecosistemas, además de contribuir con el deterioro de las condiciones de vida del ser humano (Moreira, 2018). Un recurso natural fundamental afectado por la contaminación es el aire, por lo que se ha considerado uno de los principales problemas a combatir en el ámbito

de la preservación del medio ambiente y en la búsqueda del mejoramiento de la calidad de vida de los seres humanos. Las consecuencias en los seres humanos a causa de la exposición a la contaminación del aire son evidentes de modo que se presentan enfermedades relacionadas con el sistema respiratorio, derrame cerebral, problemas cardiovasculares, sin contar con el daño que se ocasiona al medio ambiente.

Con el crecimiento poblacional ha aumentado la incidencia de este problema, de tal manera que se presentan varias fuentes de contaminación como son las emisiones de CO₂ dadas por los automotores, la presencia del sector industrial, la quema de elementos tóxicos, el uso de combustibles sólidos, etc. Al igual que las repercusiones dadas al medio ambiente también el aire contaminado afecta la salud del ser humano de diferentes formas en nuestro organismo, como la irritación de los ojos, trastornos en las membranas conjuntivas, irritación en las vías respiratorias, agravación de las enfermedades bronco - pulmonares, etc (Atilio de la Orden, 2010).

Los efectos que causa la exposición a diferentes gases contaminantes se hacen evidentes en la realidad del Ecuador, en el cual las enfermedades respiratorias se hacen frecuentes, así lo indica en (Estrella, y otros, 2000), estudio que plantea el análisis de tres diferentes grupos poblacionales de Quito específicamente escolares ubicados en zonas con índices de alta y baja circulación vehicular, los resultados presentados en esta investigación indican alta concentración de Carboxi-hemoglobina lo que indica contaminación por CO, a diferencia que el grupo ubicado en una zona rural de baja contaminación el que presentó una

baja incidencia de contraer alguna infección respiratoria. De manera análoga lo analiza (Palacios & Espinoza , 2014) en su estudio el cual arrojó que existe una fuerte incidencia con respecto a las enfermedades respiratorias en niños escolares con un mayor índice de morbilidad en los estudiantes de primaria en las ciudades de Quito y Cuenca.

El tema del proyecto es de gran importancia porque contribuye a la obtención de datos reales de los niveles de contaminación en referencia a las emisiones de los gases contaminantes generados por los automotores que circulan dentro del campus de la ESPE, de esta forma establecer claramente las zonas que están siendo mayormente contaminadas y así llevar un control sobre los causantes o determinar las horas en las que existe mayor contaminación, con esto se puede proporcionar la información obtenida a la comunidad universitaria. Al informar a la comunidad universitaria el nivel de contaminación permite que los estudiantes se vuelvan partícipes activos para la preservación del medio ambiente.

La investigación presentada se apoya en la utilización de nueva tecnología orientada al IoT (del inglés *Internet of Things*) y las redes LPWAN (del inglés *Low Power Wide Area*) que nacen bajo este concepto, específicamente en este estudio se hace referencia a la tecnología SigFox. De esta manera la investigación se centra en la utilización y aprovechamiento de la red de SigFox como proveedor de cobertura para la comunicación de la red de sensores inalámbricos, los que se encargan de la recolección de los parámetros definidos anteriormente; la red mencionada se dispone en función al nodo instalado dentro de las instalaciones del campus universitario. En concordancia con los parámetros anteriormente citados se añade que

el dispositivo diseñado emula la forma de medición de una estación ambiental con un costo y tamaño de implementación reducido.

1.3 Alcance del Proyecto

En el presente proyecto de investigación se implementa un sistema de monitorización de tres contaminantes atmosféricos principales como son CO, CO₂ y NO₂, compuesto por dos estaciones de monitorización que se diferencian por la metodología de obtención en las muestras con el objetivo de obtener una relación entre ambos métodos de medición, ambas se despliegan tanto en exteriores como en interiores; en exteriores se ubican las estaciones de medición en el anillo vial cercano a la biblioteca del campus matriz ESPE, mientras que en interiores se despliega la red en un domicilio ubicado en el Sector Sur de Quito. La red a utilizar es la red de SigFox de acuerdo a la disposición de un nodo presente dentro de las instalaciones del campus universitario.

Cada punto de monitorización contiene tres sensores los cuales son capaces de detectar cada una de las variables expuestas, los valores obtenidos de cada medición son recogidos por el módulo de desarrollo y enviados progresivamente hacia el *Back-end* de SigFox, seguidamente para la recuperación de los datos dentro de la plataforma de SigFox se decodifica la información y se realiza un *Callback* hacia la base de datos creada en un *WebHosting*, con ello se logró el almacenamiento de la información obtenida además de que se añadió información relevante como lo es la relación señal a ruido, la intensidad de la señal, fecha y la hora en la cual ha sido obtenida la medición. Para la presentación de resultados se muestran los índices de contaminación de los tres gases contaminantes en partes por millón (ppm) en una aplicación

móvil y en una página web en las cuales se puede visualizar cada una de las mediciones realizadas.

Con respecto al funcionamiento de uno de los puntos de monitorización se dispuso la validación de las mediciones mediante la inyección de aire puro o aire cero con el objetivo de calibrar mediante comparación directa, además de la inyección de cada contaminante en proporción conocida, de esta manera se diseñó un sistema capaz de emular el procedimiento de obtención de mediciones con el fin de obtener valores cercanos a la realidad. Cabe recalcar que el sistema implementado y desarrollado en este proyecto permite aumentar la capacidad de los dispositivos o nodos de monitorización de manera que se adaptan perfectamente a la red de SigFox.

1.4 Objetivos

1.4.1 General

- Desarrollar una red de sensores que permita la monitorización de los niveles de contaminación mediante tecnología LPWAN.

1.4.2 Específicos

- Diseñar la red de sensores que permita la monitorización de los niveles de contaminación.
- Evaluar el desempeño de la red de sensores conformados por sensores de CO₂, CO y NO₂.
- Integrar la tecnología LPWAN con el diseño de la red de sensores.

- Desplegar el sistema con sensores conectados a la red LPWAN tanto en exteriores como en interiores.
- Medir y analizar el índice de contaminación presente dentro del Campus universitario.

CAPÍTULO II

Marco Teórico

2.1 Contaminación del aire

Indudablemente el ser humano ha estado en contacto con la contaminación del aire, desde los primitivos homínidos que con el descubrimiento del fuego mediante uno de los fenómenos naturales como es el rayo, llegaron a observar los beneficios y las aplicaciones que se le pudo dar en ese entonces al fuego. De esta manera se idearon formas y métodos que permitieran obtener fuego de manera intencionada, en consecuencia, la producción de la combustión se volvía inevitable. Sin embargo, para la época descrita no representaba un problema tan evidente como lo es en la actualidad, que a raíz del crecimiento poblacional específicamente en áreas urbanas y del rápido crecimiento de las industrias de producción ha desencadenado un record de emisiones de gases contaminantes.

En la Norma de Calidad del Aire Ambiente se define a la contaminación del aire como “La presencia de sustancias en la atmósfera, que resultan de actividades humanas o de procesos naturales, presentes en concentración suficiente, por un tiempo suficiente y bajo circunstancias tales que interfieren con el confort, la salud o el bienestar de los seres humanos o del ambiente”, un concepto similar maneja la OMS la cual la define como “la contaminación del ambiente interior o exterior causado por cualquier agente químico, físico o biológico que modifique las características naturales de la atmósfera”.

Entre las principales fuentes de contaminación se tiene:

Quema de combustibles fósiles.- La quema de combustibles fósiles, como el carbón, el petróleo, la gasolina. Las emisiones producidas por los vehículos automotores generan o emanan CO_2 , CO hacia el medio ambiente (Education, 2017).

Agricultura.- Los productos utilizados para el abono y para la eliminación de plagas como el amoníaco y el metano (Education, 2017).

Manufactura.- La industria pesada conduce a la liberación de CO, hidrocarburos y una serie de otros productos químicos, todos los cuales conducen a la disminución en la calidad del aire. De la misma manera las refinerías de petróleo también liberan hidrocarburos que contaminan la atmósfera (Education, 2017).

Minería.- En la actividad minera al extraer distintas sustancias como carbón y diferentes metales emiten sustancias como metano, SO_2 , NO_x y CO (Education, 2017).

Las actividades productivas mencionadas con anterioridad a la par de afectar con el medio ambiente tienen cierta incidencia sobre el estado de salud de las personas que están en contacto con dichas emisiones, a continuación se presentan las enfermedades respiratorias más comunes:

Neumonía.- La exposición al aire contaminado en el hogar duplica el riesgo de neumonía infantil y es responsable del 45% de todas las muertes por neumonía en niños menores de 5 años (World Health Organization, 2020).

Enfermedades pulmonares obstructivas crónicas (EPOC).- Una de cada cuatro muertes prematuras es debido a alguna EPOC, esto se debe a la contaminación presente en el ambiente

interior del hogar. Así mismo se menciona que las mujeres expuestas a altos niveles de humo en el interior del hogar tienen el doble de posibilidad de contraer una EPOC que las mujeres que utilizan combustibles y tecnologías más limpias; en cambio el riesgo de contraer una EPOC en el sexo masculino viene dado a la exposición de ambientes contaminados por emisiones de tabaco (World Health Organization, 2020).

Derrame cerebral.- El 12% de todas las muertes prematuras debido a un derrame cerebral se pueden atribuir a la exposición diaria a la contaminación del aire del hogar que surge de cocinar con combustibles sólidos y queroseno (World Health Organization, 2020).

Cáncer de pulmón.- Aproximadamente el 17% de las muertes prematuras por cáncer de pulmón en adultos son atribuibles a la exposición de gases contaminantes del hogar causados por cocinar con queroseno o combustibles sólidos como la madera o el carbón (World Health Organization, 2020).

Generalmente el aire puro está compuesto de un 78% de Nitrógeno, 21% de Oxígeno y un 1% pequeñas cantidades de la traza de otros gases, no obstante esta composición se altera con la combinación a diferentes gases contaminantes, según la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos se los ha dividido en dos grupos que son descritos a continuación:

2.1.1 Contaminantes primarios – Son aquellos gases que se emiten "directamente" de los procesos, como el consumo de combustibles fósiles, la erupción volcánica y las fábricas. Entre los principales compuestos contaminantes se tiene:

Monóxido de Carbono (CO).- Se forma como un subproducto de procesos de combustión incompletos que involucran fuentes de energía a base de carbono, como la quema de gasolina, carbón o madera. El CO es peligroso para los humanos, una vez inhalado, compite con el oxígeno al adherirse a la hemoglobina en los glóbulos rojos y privar a los órganos vitales como el cerebro, los tejidos del sistema nervioso y el corazón del oxígeno, lo que reduce su capacidad para funcionar correctamente (SEPA, 2020).

Dióxido de Nitrógeno (NO₂).- Es un gas marrón rojizo que tiene un olor desagradable y es venenoso en altas concentraciones. Se forma cuando los combustibles fósiles se queman a altas temperaturas, pero también pueden formarse naturalmente por los rayos. La mayor parte del NO₂ en las zonas urbanas proviene de las emisiones del escape de los vehículos (SEPA, 2020).

Dióxido de Sulfuro (SO₂).- Es un gas incoloro con olor a fósforo quemado, se forma durante la quema de combustibles que contienen azufre. La mayor parte del SO₂ en nuestro aire es causado por la quema de carbón y petróleo para la generación de energía y actividades industriales (SEPA, 2020).

Material Particulado (PM).- Se originan de muchas fuentes diferentes, incluyendo sitios de construcción, escapes de vehículos, sitios industriales, caminos sin pavimentar, y vienen en muchas formas y tamaños, algunos son lo suficientemente grandes como para verse a simple vista mientras que otros solo se pueden ver a través de potentes microscopios. Son pequeñas piezas de materia sólida o líquidas en el aire, y pueden consistir en cientos de diferentes productos químicos, incluidos carbono, azufre, nitrógeno y compuestos metálicos (SEPA, 2020).

Amoniaco (NH₃).- Es un gas incoloro soluble de olor fuerte, la mayor fuente de liberación de amoníaco es la agricultura, incluida la cría intensiva de animales y cultivos, con lo que se deriva

de la descomposición natural de estiércol, de plantas y de animales en descomposición; relacionado con esta actividad se asocia la manufactura del abono usado para las plantaciones (ATSDR, 2004).

2.1.2 Contaminantes secundarios – No son emitidos directamente hacia la atmósfera, se forman cuando los contaminantes primarios interactúan con otros por reacciones químicas.

Ozono (O₃).- Se forma por reacciones químicas entre NO_x y VOC en presencia de la luz solar. Puede causar irritación en el tracto respiratorio y los ojos, causando opresión en el pecho, tos y sibilancias, especialmente entre las personas con problemas respiratorios y cardíacos (Center, 2001).

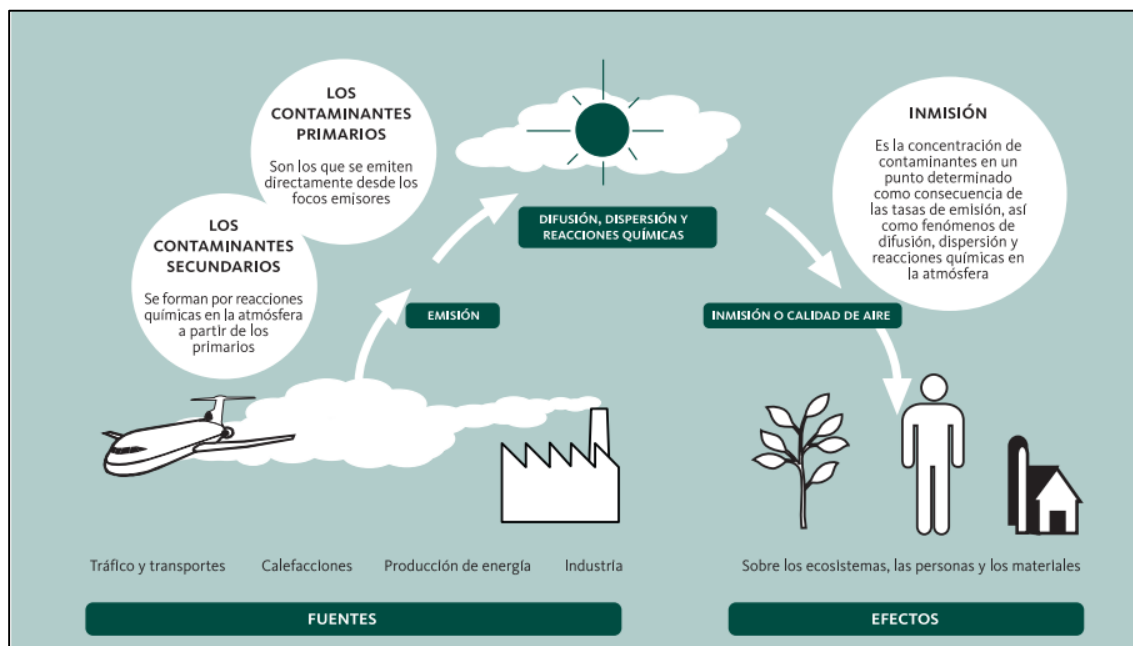
Lluvia ácida.- La lluvia ácida se forma cuando el SO₂ y NO₂ reaccionan en la atmósfera con agua, oxígeno y otros productos químicos para formar diversos compuestos ácidos. Cuando los compuestos caen al suelo, pueden causar daños a las plantas, incluidos los árboles. También pueden aumentar los niveles de acidez de nuestros suelos, ríos, lagos y arroyos, afectando el delicado equilibrio de los ecosistemas que viven en estos entornos. Estos compuestos son transportados en el aire por el viento, hasta que caen al suelo en forma húmeda o seca (SEPA, 2020).

Smog.- Se compone de humo y niebla, tradicionalmente, el smog ha resultado de grandes cantidades de carbón quemado en un área causada por una mezcla de humo y dióxido de azufre. Hoy en día, las emisiones de los vehículos y las emisiones industriales que actúan en la atmósfera por la luz ultravioleta del sol para formar contaminantes secundarios que también se

combinan con las emisiones primarias para formar *smog* fotoquímico (EPA, EL SMOG -¿A Quién Perjudica?, 2000).

Figura 1

Fuentes, tipos de contaminantes, procesos y efectos generales en contaminación atmosférica



Nota. En la Figura 1 se muestra cómo está compuesto el proceso de la contaminación del aire a breves rasgos, donde se muestran las diferentes fuentes de contaminación como lo son la industria, el transporte, la producción de energía, etc. Estas actividades productivas para el ser humano emiten una serie de contaminantes primarios que al entrar con el contacto de la atmósfera producen reacciones y forman los contaminantes secundarios. Así mediante la dispersión y difusión de este aire contaminado causa diferentes efectos sobre las personas y el medio ambiente. Tomado de *Ballester, Boldo, Diaz, Linares, & Querol, 2010.*

Un aspecto importante que se ha considerado tras el impacto de la contaminación del aire es la monitorización, la que tiene como propósito proporcionar y generar la información o

datos necesarios hacia entidades reguladoras como legisladores y planificadores para la toma de decisiones adecuadas en favor de la gestión y el mejoramiento de la calidad del aire (INE, 2015). La forma en la que ha sido manejada la medición de los gases contaminantes para la monitorización muestra la implementación de infraestructura dedicada.

Figura 2

Equipos para la monitorización de la calidad del aire



Nota. Como se observa en la Figura 2, se hace uso de estaciones de monitorización compuestas generalmente de analizadores automáticos, sensores meteorológicos o de gases, monitores en los que se puede observar el estado del equipamiento y como requerimiento necesario se define que el espacio dispuesto este provisto de una fuente de energía capaz de alimentar todo el sistema. Tomado de *Meneses, 2015*.

El equipamiento de las estaciones de monitorización en cuanto se refiere a sensores y equipos de medición dependen de los parámetros que se requieran medir, sin embargo en todas las estaciones ambientales la información recopilada con los distintos sensores son

recibidos por un sistema de adquisición de datos (conocido como *datalogger*) y son enviados al centro de cómputo por medio de un sistema de comunicación remota: Internet, modem, microondas, radio, entre otros (Martinez & Romieu, 1996). Existen alrededor de cinco métodos para la medición de la calidad del aire, sin embargo uno de los métodos asociados con el tema de investigación corresponde a la monitorización mediante sensores remotos que se caracterizan por realizar mediciones integradas de varios parámetros es decir multi-componentes ubicados a lo largo de un lugar geográfico determinado habitualmente superior a 100 metros (Martinez & Romieu, 1996), así la comunicación de las estaciones se lo realiza de forma inalámbrica desde las estaciones remotas hacia el concentrador de datos, de esta manera el proceso descrito conlleva al uso de redes de sensores inalámbricos.

2.2 Redes de sensores inalámbricos WSN

La investigación de las WSN se remonta a los años 1980 cuando la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzado de Defensa (DARPA del inglés *Defense Advanced Research Projects*) llevó a cabo en la investigación de sensores distribuidos (DSN del inglés *Distributed Sensor Network*) para el ejército de Estados Unidos. Aunque los primeros investigadores en redes de sensores tenían en mente la visión de DSN, la tecnología no estaba desarrollada en su totalidad. A pesar del esfuerzo por la implementación de esta red de sensores distribuidos, presentaban un problema potencial, los sensores eran bastante grandes lo que dificultaba el número de aplicaciones y en adición los primeros DSN no estaban asociados a la conectividad inalámbrica.

En 1998 comenzaron nuevas investigaciones correspondientes a las WSN que se centraban específicamente en la tecnología de las redes y el procesamiento de la información en

escenarios dinámicos asignando recursos limitados a cada uno de los nodos de sensores. De la misma forma que la asignación de recursos, el tamaño de los sensores se vuelve un aspecto en el cual se debía trabajar, así se desarrollaron nodos de sensores con un tamaño más reducido y con precios más accesibles, por lo tanto, el uso de estas redes se amplió en diferentes campos. En esta serie de investigaciones DARPA realizó una investigación pionera en la investigación de estas WSN, mediante el lanzamiento de un proyecto llamado SensIT (Kumar & Sheperd, 2001).

Actualmente, los WSN han sido vistos como una de las tecnologías más importantes para el siglo XXI. En China por ejemplo dentro de su investigación estratégica nacional se incluyeron temas concentrados específicamente en el desarrollo, la implementación y diseño de WSN (NI, 2008). Como resultado, la comercialización de WSN se está aceleró y nuevas empresas tecnologías surgieron como *Memsic* y *Dust Networks*. Hoy en día, la automatización industrial es una de las más áreas importantes de las aplicaciones WSN, según *Freedonia Group*, la cuota de mercado mundial de sensores para uso industrial es de 11 mil millones de dólares, mientras que el costo de instalación (principalmente costos de cableado) y el uso es de más de 100 mil millones de dólares. Este alto costo es el principal problema que dificulta el desarrollo de la tecnología de comunicación industrial.

A pesar de que el desarrollo de la idea de WSN fue inspirada para usarse en aplicaciones militares basándose en la idea de vigilancia en lugares conflictivos, en la actualidad las WSN están constituidas como un conjunto de dispositivos independientes conectados inalámbricamente los cuales utilizan una serie de sensores para la monitorización de diferentes

condiciones físicas, así estas redes se han extendido en diferentes campos de aplicación como lo son la monitorización de la industria, la salud, el tráfico, el hogar, el ambiente, etc.

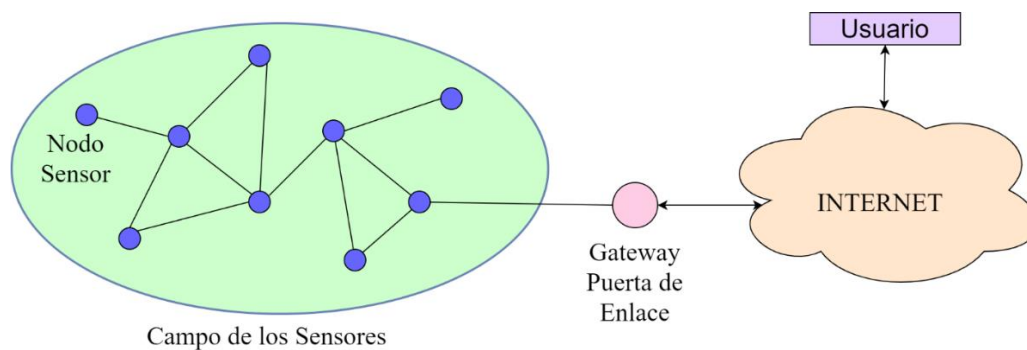
2.2.1 Arquitectura de las redes de sensores inalámbricas

Una WSN generalmente se puede describir como una red de nodos que perciben y controlan cooperativamente entorno, permitiendo la interacción entre personas o computadoras y el entorno circundante (Broring, y otros, 2011). Los WSN en la actualidad, generalmente incluyen nodos sensores, nodos de actuadores, puertas de enlace y clientes con un gran número de nodos de sensores desplegados al azar dentro de o cerca del área de monitorización (campo del sensor) los que forman redes a través de la auto-organización. Los nodos sensores se encargan de obtener los datos del entorno para transmitirlos a otros nodos sensores o para transmitir directamente a la puerta de enlace o *gateway*.

Durante el proceso de transmisión, los datos monitorizados pueden ser manejados por múltiples nodos para llegar al nodo de la puerta de enlace, estableciendo distintos caminos de enrutamiento para finalmente llegar a ser transmitidos a través de Internet o satélite (Krishna, Jangam, & Kumar, 2017). Es el usuario quien administra el WSN con el nodo de gestión de manera que puede establecer tiempos de muestreo y recopilación de los datos monitorizados.

Figura 3

Arquitectura de las redes de sensores inalámbricas



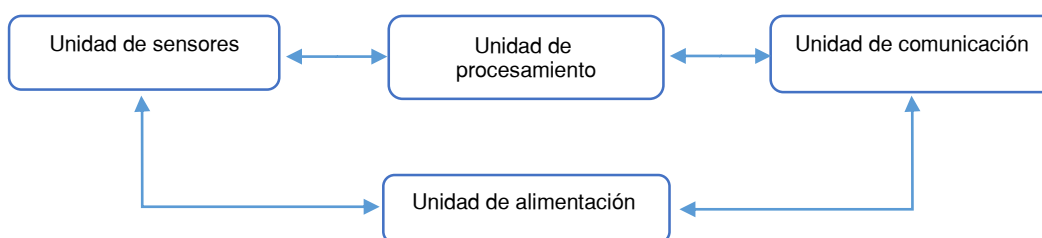
Nota. En la Figura 3 se observan los componentes que definen una red de sensores inalámbricos.

2.2.1.1 Nodo sensor

Una WSN está compuesta por un conjunto de dispositivos pequeños denominados nodos sensores, los cuales están equipados por 4 componentes fundamentales como lo es una unidad de sensores, una unidad de procesamiento, la unidad de comunicación y la unidad de poder.

Figura 4

Elementos de un nodo sensor



Nota. En la Figura 4 se observa la estructura básica de un nodo WSN. Tomado de *Meneses, 2015*.

Unidad de sensores. Toman la información del medio, convierten el fenómeno físico en señales eléctricas las que pueden ser transformadas a una unidad de medida que pueda ser interpretada en función del parámetro medido.

Unidad de procesamiento. Corresponde al microprocesador, el que se encarga de definir todas las tareas o actividades que deberán ejecutarse en un periodo de tiempo.

Unidad de Comunicación. Permite a los nodos sensores enviar o recibir datos, además de establecer la comunicación entre los distintos nodos o directamente con el gateway.

Unidad de poder o alimentación. Establece la energía de todo el sistema, en ocasiones se utilizan baterías, sin embargo, como alternativas se plantean el uso de paneles solares.

2.2.1.2 Gateway o Puerta de Enlace

El *gateway* establece la comunicación entre los nodos sensores y el Internet, funciona como un puente de comunicación es decir intercomunica la red de sensores con una red de datos TCP/IP. Como se ilustra en la Figura 3, el *gateway* concentra a todos los nodos sensores para que así los usuarios remotos pueden recuperar fácilmente los datos de WSN a través de Internet en tiempo real y analizar sus datos recopilados en línea.

2.3 Internet de las cosas

Con el comienzo de una nueva era emergente de la tecnología, en la que el uso de la comunicación inalámbrica y la conectividad se ha convertido en un eje fundamental para el desarrollo de sociedad, se ha plasmado un nuevo enfoque en el cual se busca la convergencia e integración de los dispositivos en el ámbito físico con las personas mediante un entorno virtual, de esta manera se puede obtener un control sobre el medio físico con dispositivos inteligentes

que funcionen ya sea de manera autónoma o de manera dirigida, con el objetivo de facilitar la operatividad de distintos procesos.

El pionero en acuñar el término del IoT (del inglés *Internet of Things*) por primera vez fue el británico Kevin Ashton en el año de 1999 en el *RFID Journal*, en el que se describía que un sistema puede conectar el medio físico con el medio virtual mediante sensores con la utilización de Internet. En la investigación planteada por Ashton se denota el uso de este término para determinar la conexión de etiquetas de identificación por radio frecuencia (RFID del inglés *Radio Frequency Identification*) hacia Internet, basado en esta tecnología se propuso la idea de utilizar RFID para la identificación de los suministros corporativos con el objetivo de contabilizar y llevar a cabo un seguimiento de esta mercancía sin la necesidad de que los seres humanos entren en contacto en el proceso.

A pesar de que el término IoT es relativamente nuevo, la idea de establecer una conexión entre las computadoras y las redes con el objetivo de monitorizar y controlar dispositivos ha existido hace algunas décadas. En (Rose, Eldridge, & Lima, 2015) se menciona que en 1970 dentro del mercado se tenían sistemas disponibles para dar seguimiento de forma remota al consumo eléctrico mediante medidores con el uso de las líneas telefónicas, de la misma forma para el año de 1990 con los avances en la tecnología inalámbrica se propuso la aplicación de esta tecnología apuntando a sectores industriales con el concepto denominado "maquina a máquina" (M2M del inglés *Machine To Machine*) para el control de máquinas manufactureras. No obstante, las primeras aplicaciones del concepto M2M se centraban en redes dedicadas específicamente para el uso con estándares propietarios de la industria y no en redes basadas en el protocolo IP y los estándares de Internet.

2.3.1 Características del IoT

Las características fundamentales de IoT se las postula a continuación:

Interconectividad.- Con respecto al IoT, cualquier cosa puede estar interconectada con la infraestructura global de información y comunicación (Vermesan & Friess, 2014).

Servicios relacionados con los objetos.- IoT es capaz de proporcionar servicios relacionados con las cosas dentro de las restricciones de la información, como la protección de la privacidad y la coherencia entre la relación de los objetos físicos y los entornos virtuales asociados (Vermesan & Friess, 2014).

Heterogeneidad.- Los dispositivos en IoT son heterogéneos y se basan en diferentes plataformas y redes de hardware. Pueden interactuar con otros dispositivos o plataformas de servicio a través de diferentes redes (Vermesan & Friess, 2014).

Cambios dinámicos.- El estado de los dispositivos cambia dinámicamente, ya sea encendido o apagado, conectado o desconectado, así como el contexto de los dispositivos, incluida la ubicación y la velocidad (Vermesan & Friess, 2014).

Gran escala.- El número de dispositivos que pueden administrarse y que se comunican entre sí puede llegar a ser escalable (Vermesan & Friess, 2014).

Otro aspecto a considerar con respecto a la información es la gestión de los datos generados y su interpretación para fines de aplicación, se relaciona directamente con la semántica de datos, así como con el manejo eficiente de la información que maneje la tecnología, la información obtenida o recopilada debe cumplir con las siguientes características:

Seguridad.- Los receptores y transmisores del IoT deben ser diseñados para establecer un protocolo de seguridad. Esto incluye la seguridad de nuestra información personal, asegurando los puntos finales, las redes y los datos (Vermesan & Friess, 2014).

Conectividad.- La conectividad permite la accesibilidad de la red y compatibilidad, específicamente se refiere a la capacidad común de consumir y producir datos (Vermesan & Friess, 2014).

2.3.2 Categorías de Aplicación del IoT

Internet Industrial de las Cosas (IIoT).- La industria ha comenzado a adoptar aplicaciones comerciales de IoT. Este concepto se refiere a la conexión de máquinas con el Internet, las que se encuentran ubicadas en una instalación de producción, estas son capaces de comunicar y compartir información con el objetivo de mejorar la eficiencia, la productividad y el rendimiento. Actualmente en América del Norte, hay más conexiones IoT de consumo que conexiones IIoT, pero esto se prevé que puede cambiar en el futuro, el IIoT tiene el potencial de transformar una variedad de industrias, incluida la fabricación, productos químicos, alimentos y bebidas, automotriz y acero, así mismo la incorporación de IIoT es vista por expertos como La Cuarta Revolución Industrial, o 4IR (Moloney, 2019).

Internet de las Cosas Médicas (IoMT del inglés *Internet of Medical Things*).- El campo de la salud ha comenzado a incorporar IoT, por lo cual se han desarrollado dispositivos como monitores para el corazón y marcapasos que sirven para recopilar y enviar el estado de salud del paciente a través de varias redes hacia los proveedores de atención médica para la monitorización, análisis y configuración remota (Moloney, 2019). A nivel de salud personal, se

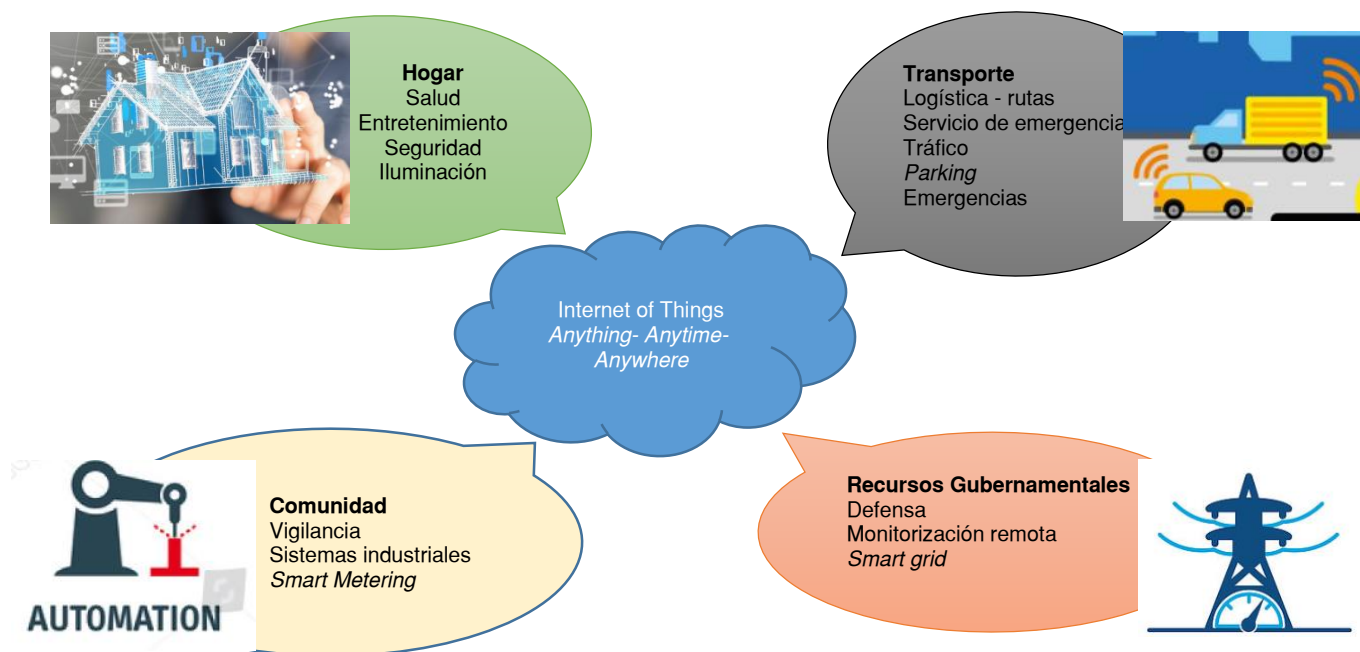
han desarrollado dispositivos de IoT portátiles, como relojes inteligentes los cuales pueden rastrear el estado físico de un usuario, los signos vitales básicos y patrones de sueño.

Smart City.- Dentro de *Smart City* se engloban dispositivos y sistemas en aplicaciones como la gestión de sectores de transporte e infraestructura, la monitorización de variables ambientales, la gestión de recursos básicos, etc. Las empresas de servicios públicos pueden hacer uso del IoT para crear redes y medidores "inteligentes" para electricidad, agua y gas donde los sensores recopilan y comparten datos de uso del cliente, para permitir que el sistema de control central optimice la producción y distribución para satisfacer la demanda en tiempo real. Las ciudades pueden usar IoT enfocado al transporte para lectores de tarifas y rastreadores de los vehículos masivos que interactúan con los usuarios del transporte público. En (Ginther, 2016) se propone la plataforma *Columbus*, la propuesta ganadora de Ohio para el *Smart City Challenge* del Departamento de Transporte en 2016, la cual incorporó infraestructura que interactúa con vehículos (incluidos vehículos autónomos eléctricos), así como un pago común y planificación de viaje sistema a través de múltiples sistemas de tránsito.

Smart Home: Los dispositivos de IoT en productos de consumo utilizados en las casas y edificios se han agrupado bajo el término "*Smart Home*" incluyen electrodomésticos inteligentes, TV inteligente, sistemas inteligentes de entretenimiento, termostatos y bombillas inteligentes, enchufes, cerraduras de puertas, puertas conectadas a la red alarmas y sistemas de seguridad para el hogar. Estos dispositivos IoT para hogares inteligentes pueden conectarse a una sola red y controlarse remotamente a través de Internet.

Figura 5

Aplicaciones asociadas el IoT



Nota. En la Figura 5 se observa una visión esquemática en los campos de aplicación que puede penetrar el IoT como resumen de la categorización descrita, así se plantea al IoT como una herramienta que pueden servir para la obtención de datos, el análisis y la visualización, los cuales pueden ser adquiridos en cualquier tiempo, en cualquier lugar estableciendo una conectividad ubicua presente en todo el tiempo. Tomado de *Koo & Matheus, 2015*.

2.4 Redes LPWAN

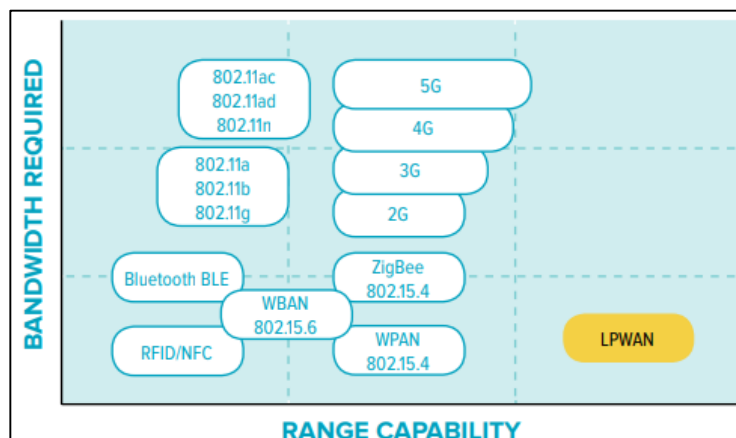
Low Power Wide Area Network (LPWAN) es una de las plataformas de comunicación más prometedoras para aplicaciones a gran escala como ciudades inteligentes, control de iluminación, red inteligente y agricultura de precisión. Debido a sus características específicas, como la baja velocidad de datos y las técnicas de modulación robustas que proporcionan un

rango de comunicación de hasta varios kilómetros de 10 hasta 40 km en zonas rurales y de 1 hasta 5 km en zonas urbanas (Centenaro, Vangelista, & Zorzi, 2016).

Generalmente se usan cuando otras redes inalámbricas como *Bluetooth* y BLE (del inglés *Bluetooth Low Energy*) (y, en menor medida, *WiFi* y *Zigbee*) no se ajustan bien a diferentes escenarios, debido a que hoy en día existe una alta tendencia hacia comunicaciones de largo alcance entre dispositivos, por lo que la tecnología LPWAN es perfecta para conectar dispositivos que necesitan enviar pequeñas cantidades de datos en un rango largo, mientras mantienen una batería de larga duración (es decir, más de 10 años de vida útil de la batería) (Patel & Won, 2017). Algunas aplicaciones de IoT solo necesitan transmitir pequeñas cantidades de información: un sensor de estacionamiento por ejemplo, solo transmite cuando un lugar está ocupado o cuando se encuentra libre. El bajo consumo de energía de dicho dispositivo permite que esa tarea se lleve a cabo con un costo y consumo de batería mínimos.

Figura 6

Cobertura vs Ancho de banda en tecnologías inalámbricas



Nota. Como se observa en la Figura 6 las diferentes tecnologías inalámbricas abordan las necesidades específicas de cada aplicación con cambios en los esquemas de modulación y

frecuencia, lo mismo ocurre con las redes LPWAN, que en función de los requerimientos del IoT como son tener un largo alcance con bajos requisitos de ancho de banda llegaron a ganar interés en la investigación. Tomado de *LinkLabs, 2016*.

Además, se caracterizan por ser altamente eficientes y económicas, con un costo de chipset de radio inferior a 10\$ y un costo operativo de 1 dispositivo por año (Raza, Kulkami, & Sooriyabandara, 2017). Estos aspectos prometedores de LPWAN han impulsado estudios experimentales recientes sobre el rendimiento de LPWAN en ambientes exteriores e interiores. Muchas tecnologías LPWAN han surgido en el ancho de banda de frecuencia con licencia y sin licencia, entre ellas, SigFox, LoRa y NB-IoT son las tecnologías de vanguardia de hoy en día.

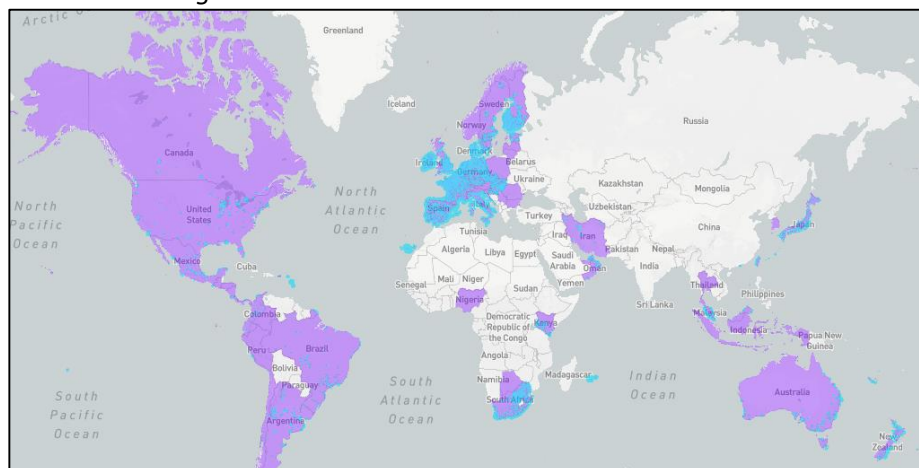
2.4.1 SigFox

SigFox es un operador de red LPWAN que ofrece una solución de conectividad IoT de extremo a extremo basada en sus tecnologías patentadas. SigFox despliega sus estaciones base, equipadas con radios cognitivas definidas por software y las conecta a los servidores finales utilizando una red basada en IP. Los dispositivos finales se conectaron a estas estaciones base mediante la modulación de modulación de desplazamiento de fase binaria (BPSK) en una portadora de banda ISM (del inglés *Industrial Scientific and Medical*) con una banda ultra estrecha de 100 Hz.

2.4.1.1 Cobertura

Figura 7

Cobertura mundial de SigFox

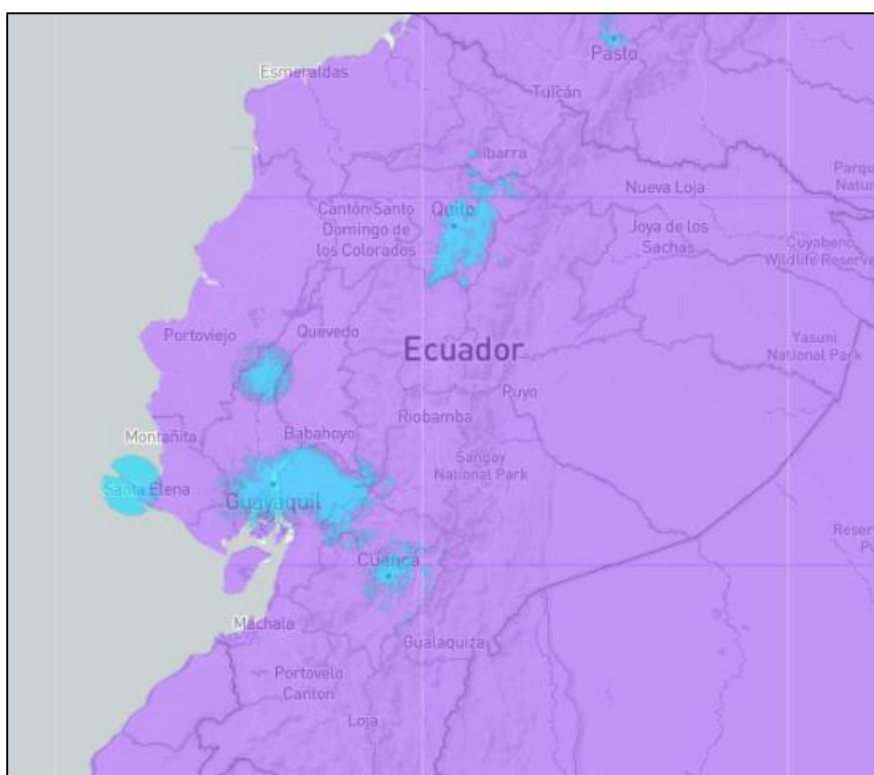


Nota. En la Figura 7 muestran los países que se encuentran con cobertura total en color celeste, mientras que los países sobre los cuales se está desplegando la cobertura son los subrayados en morado. Tomado de *SigFox, 2020*.

La cobertura de red cubre prácticamente todos los países europeos (asegurando una cobertura de casi el 100% en sus territorios) y continúa extendiéndose a un total de 65 países en todo el mundo. El objetivo de la compañía es tener una presencia mundial y están actualmente en la fase de implementación en varios países.

Figura 8

Cobertura de SigFox a nivel nacional



Nota. A nivel Ecuador la cobertura que tiene SigFox se muestra en la Figura 8, en la cual se observa que se tiene una buena cobertura dentro de la capital del Ecuador, Guayaquil, Cuenca, Santa Elena y Balzar. Este es un aspecto fundamental a considerar debido a que nos encontramos en una zona en la cual la cobertura de SigFox se encuentra desplegada y funcionando. Tomado de *Sigfox, 2020*.

2.4.1.2 Velocidad de Transmisión y bandas de operación

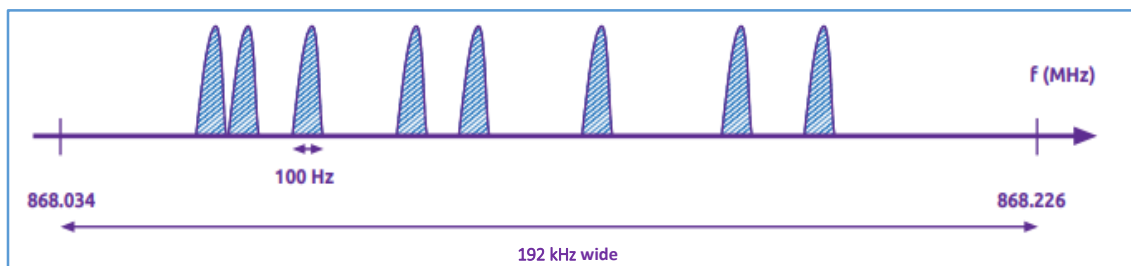
SigFox dirige su red hacia transmisiones de baja velocidad (con tasas de 10 bps a 1 kbps), proporcionando una solución que apunta a satisfacer el bajo consumo requisitos de la IoT.

Utiliza la tecnología UNB (del inglés *Ultra Narrow Band*), que es caracterizado por usar un ancho

de banda muy pequeño, ocupando poco espacio en el rango de frecuencia y uso bajo tasas de velocidad.

Figura 9

Ultra Narrow Band usada en SigFox.

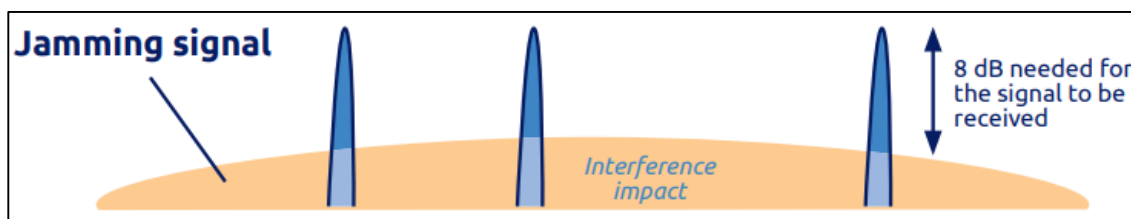


Nota. La tecnología se caracteriza por utilizar 192KHz de la banda disponible para intercambiar mensajes por aire. Tomado de *Sigfox, 2020*.

En comparación a las tecnologías que usan CSS (del inglés *Chirp Spread Spectrum*) presenta una gran ventaja ya que las señales a transmitir podrían compartir el espectro con el ruido o la interferencia produciéndose errores en la transmisión.

Figura 10

Robustez de la modulación UNB



Nota. La Figura 10 muestra una característica de gran importancia presente en la tecnología debido a que provee robustez con respecto a otras señales que puedan causar interferencia, sin embargo, la potencia de la señal debe encontrarse al menos 8 dB encima de la interferencia o ruido para que pueda ser recibida. Tomado de *SigFox, 2020*.

La red SigFox opera en el espectro ISM o frecuencias sin licencia, coexistiendo con otras tecnologías de radio en estas frecuencias, pero sin riesgo de colisión. Las bandas dependen de la ubicación de esta manera se define:

- Europa ocupa bandas entre 868 y 868.2 MHz
- El resto de los países en bandas de 902 MHz y 928 MHz, acoplándose a las regulaciones existentes dentro de cada localidad.

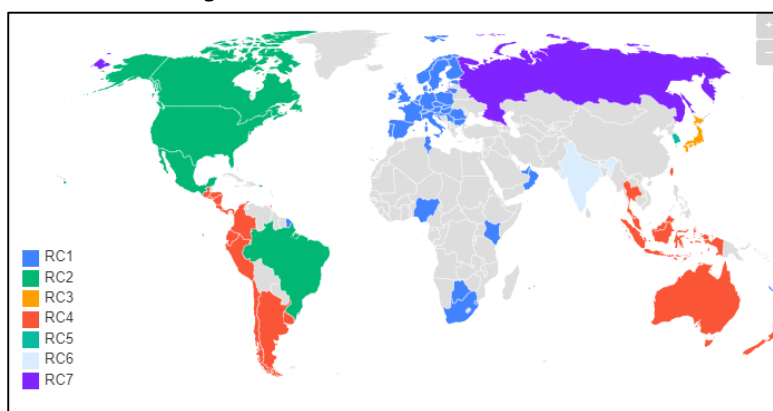
Así mismo se definen 7 zonas de configuraciones de radio como se muestra en la Figura

11. Los países que contienen estas configuraciones se denotan a continuación:

- RC1: Europa
- RC2: Canadá, Brasil, México, USA
- RC3: Japón
- RC4: Latinoamérica
- RC5: Corea del Sur
- RC6: India
- RC7: Rusia

Figura 11

Configuraciones de radio SigFox



Nota. En la Figura 11 se muestra la distribución de zonas de cobertura para los diferentes países.

Tomado de *SigFox, 2020*.

2.4.1.3 Mensajes de la tecnología SigFox

Para cumplir con las exigencias con respecto al costo y autonomía de los objetos remotos o dispositivos finales, se ha diseñado un protocolo de comunicación orientado al envío de mensajes pequeños. Además, se establece que una carga útil de 12 bytes es suficiente para transferir datos del sensor, el estado de un evento como una alerta, coordenadas GPS o incluso datos de la aplicación.

Tabla 1

Frame de SigFox en bits

Preámbulo	Sync	ID	Payload	Autenticación	CRC
19	29	32	0-96	16	16

Nota. El tamaño del mensaje va de 0 a 96 bits (12 bytes máximo), como se muestra en la Tabla 1, en la que se definen los campos que ocuparan los datos a enviar. Tomado de *Gennaro, Lofu, Vitano, Tedeshi, & Boccadoro, 2018*.

SigFox proporciona diferentes tipos de suscripción (número de mensajes de 12 bytes permitidos por día) para diferentes precios, todos los cuales sujetan los dispositivos finales a las regulaciones. El nivel de platino es la mayor cantidad de mensajes que pueden ser enviados para mantener las regulaciones para la banda 868 son 140 mensajes como indica la Tabla 2. SigFox no es una tecnología completamente bidireccional por lo que se define una cantidad mínima de mensajes de enlace descendente de forma asimétrica con respecto a la cantidad de mensajes de subida.

Tabla 2*Descripción de tipos de suscripción*

Esquema	Número de mensajes	Número máximo de bytes (<i>uplink</i>)
Platino	101- 140 mensajes / 4 downlink	16800
Gold	51- 100 mensajes / 2 downlink	1200
Silver	3-50 mensajes / 1 downlink	600
One	1-2 mensajes / sin downlink	24

Nota. En la tabla 2 se muestran la cantidad de mensajes y la distribución de bytes asignados para distintos esquemas. Tomado de Sigfox, SigFox Technical Overview, 2017.

2.4.1.4 Seguridad

La seguridad de la red SigFox provee un sistema basado en cuatro tópicos fundamentales los cuales se describen a continuación:

- La autenticación, la conservación de la integridad y evitar la necesidad de enviar mensajes repetidos bajo la misma red.
- La criptografía basada en AES (del inglés *Advanced Encryption Standard*)
- La encriptación del mensaje como una opción de proporcionar confiabilidad al sistema
- El aislamiento de cada uno de los componentes que se derivan de la composición de la red, con el objetivo de evaluar la red por segmentos.

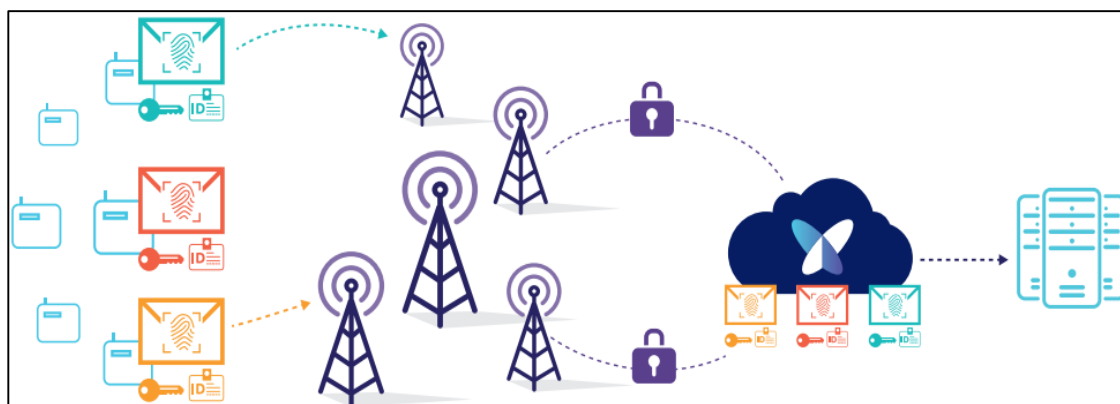
De la misma forma que ocurre con las suscripciones del envío de mensajes, se establecen parámetros que definen diferentes niveles de seguridad, dependiendo del uso que se le va a dar al dispositivo, la sensibilidad y el fabricante o proveedor, con esta premisa se establecen los tres niveles de seguridad que pueden implementarse bajo una red SigFox.

- Nivel medio: Las credenciales de seguridad se almacenan en el dispositivo.
- Nivel alto: Las credenciales de seguridad se almacenan en un área protegida.

- Nivel muy alto: Las credenciales de seguridad se almacenan en un elemento seguro.

Figura 12

Diseño de Seguridad de la red de SigFox



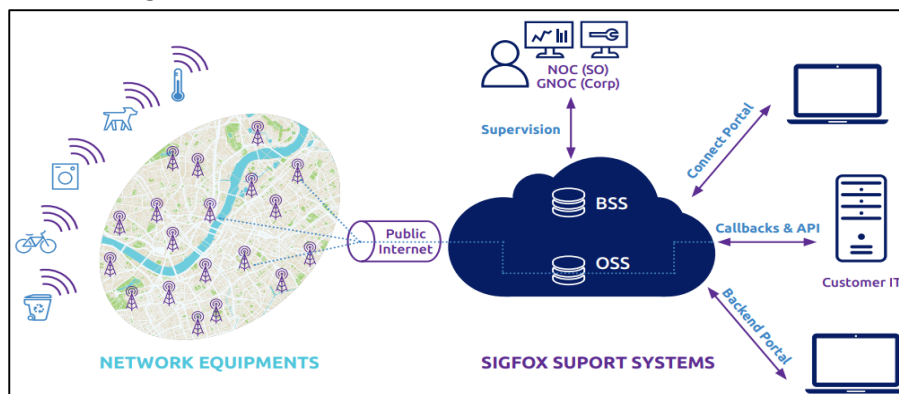
Nota. Como se menciona el aislamiento de cada uno de los componentes que definen la red, en la Figura 12 se muestra la división de las cuatro partes fundamentales, en primer lugar se tienen los dispositivos los que tienen un identificador de dispositivo (ID) y un identificador único denominado PAC (del inglés *Porting Authorization Code*) ambos se relacionan con el registro en la plataforma SigFox, en segundo lugar se menciona la seguridad a nivel de datos mediante la encriptación, en tercer lugar se establece la seguridad a nivel de radio se refiere a la autenticación y comprobación de los datos enviados hacia la nube de SigFox y finalmente se observa la seguridad a nivel de datos cifrados en la nube o *backend*, dentro de este se detalla el ingreso a la plataforma dedicado para el usuario, además de la codificación de los mensajes recibidos y el *hosting* para la información obtenida. Tomado de *Sigfox, SigFox Technical Overview, 2017*.

2.4.1.5 Arquitectura de Red

Una red de SigFox puede manejar alrededor de 1 millón de nodos por estación base, la densidad se define en función del número de mensajes enviados por toda la estructura de red. La estructura de una red de SigFox comienza por la identificación de los nodos, estos son los dispositivos finales a los cuales se conectará el gateway o estación base, todos los nodos que se unen a una estación base formarán una red tipo estrella o topología estrella (Sigfox, 2020). Los datos serán enviados desde los nodos los que se gestionan a través de la red de *backend* de SigFox el cual es el único destino para un paquete, es decir cada paquete que es enviado siempre llegará al *backend* no a ninguna otra plataforma, la función del *backend* es almacenar y enviar un mensaje al cliente después de autenticarlo y verificar que no haya duplicados. El *backend* de SigFox define a donde será apuntado cada mensaje mediante el uso de *callbacks* los cuales se encargarán de determinar cómo se entregarán los mensajes para utilizarlos en distintas aplicaciones.

Figura 13

Arquitectura de SigFox



Nota. En la Figura 13 se define dos partes importantes las cuales son: **Network Equipment** la cual consiste esencialmente en estaciones base a cargo de recibir mensajes de dispositivos y

transferirlos a los sistemas de soporte de SigFox y ***SigFox Support System*** la cual constituye la red central encargada de procesar los mensajes y enviarlos a través de *callbacks* al sistema del cliente. Esta capa proporciona también el punto de entrada a los diferentes actores del sistema (SigFox, operadores de SigFox, canales y clientes finales) para interactuar con el sistema a través de interfaces de atención web o APIs. Esta capa también incluye módulos y características que son esenciales para garantizar la implementación, la operación y la monitorización de la red, como el sistema de soporte comercial para pedidos y facturación, el soporte de planificación de radio. Tomado de *SigFox, 2020*.

CAPÍTULO III

Materiales y Métodos

3.1 Medición de gases contaminantes

Los métodos elegidos para la medición de los gases contaminantes expuestos se definieron con la finalidad de establecer una comparativa entre dos métodos conocidos como son el muestreo activo y el muestreo pasivo, de esta manera se procede a detallar cada uno de los componentes que se utilizan para la implementación de cada uno de ellos.

3.1.1 Muestreador Activo

El muestreador activo se caracteriza por la absorción del aire por medio de un dispositivo mecánico (bomba de aire) con el objetivo de dirigir el aire o la muestra hacia un tubo de recolección de muestras o hacia un medidor. Dentro de los muestreadores activos se pueden encontrar los captadores de gases y partículas que se emplean para la toma de muestras de partículas en suspensión en el aire (Patier, 2005). Los componentes de un captador de pequeño volumen se los definen a continuación:

- Muestreador de aire o bomba gravimétrica.- Se utiliza un contador que permita medir el caudal que ingresa hacia el sistema además de medir el volumen del aire muestreado en litros por minuto (LPM) (Patier, 2005).

Figura 14

Muestreador de Aire BDX II Air Sampler



Nota. El muestreador de aire que se utiliza para el desarrollo del sistema se muestra en la Figura 14. Tomado de *Sensydine, 2020*.

Tabla 3

Especificaciones del muestreador de aire GILIAN BDX II

Característica	Descripción
Rango de flujo	500 – 3000 cc/min
Tiempo de ejecución	10 horas a 2 LPM
Temperatura de funcionamiento	-20 C a 45 C
Humedad de funcionamiento	5-85% RH, sin condensación
Batería	4.8 V, 1.8 Ah
Dimensiones	90 mm (W) x 100 mm (H) x 51 mm (D)
Peso	595 g

Nota. Las características del muestreador se detallan en la Tabla 3. Tomado de *Sensydine, 2020*.

- Filtro para la retención de partículas.- Se usan para impedir que partículas de mayor tamaño ingresen al momento de tomar una muestra, se emplean distintos materiales para usarlos como filtros como papel, microfibras, fibra de vidrio, etc (Patier, 2005).

Figura 15

Filtro de Microfibra de 3.1 μ m



Nota. Para el desarrollo del proyecto se definió el uso de filtros de microfibra con un espectro de filtración de 70 μ m, adaptados para la introducción de mangueras o jeringuillas, como se observa en la Figura 15. Tomado de *Teknorama, 2016*.

- Válvula de tres vías. Se utiliza para direccionar la muestra tomada hacia las diferentes partes del sistema, el direccionamiento del flujo del aire es controlado por un servomotor.

Figura 16

Válvula de 3 vías con toma común



Nota. En la Figura 16 se muestra la composición de esta válvula con una toma común, por la primera vía se absorbe la muestra de aire, por la segunda se realiza la toma de medición y por la tercera sale el aire recolectado después de haber tomado la muestra. Tomado de *Traxco, 2020*.

- Servomotor DS3218. Se usa para realizar el control de la válvula y seleccionar hacia que parte del sistema se direcciona el aire, las características del servomotor se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4*Especificaciones del servomotor DS3218*

Característica	Descripción
Torque	(5V):19kg/cm (6.8V): 21.5kg/cm
Velocidad	0.16sec/60° (5V) 0.14 sec/60° (6.8V)
Voltaje de funcionamiento	4.8 ~ 6.8 Voltios DC
Angulo de rotación	180°
Material de piñones	Cobre y Aluminio
Frecuencia de trabajo	1520µs/333 Hz
Tamaño	40x20x40.5mm
Peso	60g

Nota. En la Tabla 4 se observan las características del servomotor DS3218. Tomado de *Robodigg, 2020*.

3.1.2 Muestreador Pasivo

Un muestreador pasivo se caracteriza por no utilizar ningún sistema de absorción para obtener una muestra, de manera que se omite el uso de un sistema mecánico que fuerce el aire a entrar al sistema (Patier, 2005). Se utiliza este método de muestreo con el objetivo de realizar una comparativa con el método activo a través del manejo de las mismas métricas, el mismo procedimiento de linealización, de calibración y de acondicionamiento para la obtención de medidas, con lo que se establece una diferencia gráfica entre ambos métodos de medición. Para la implementación de este método de muestreo se utilizan los mismos componentes detallados para el muestreador activo, como el módulo de comunicación y el arreglo de sensores.

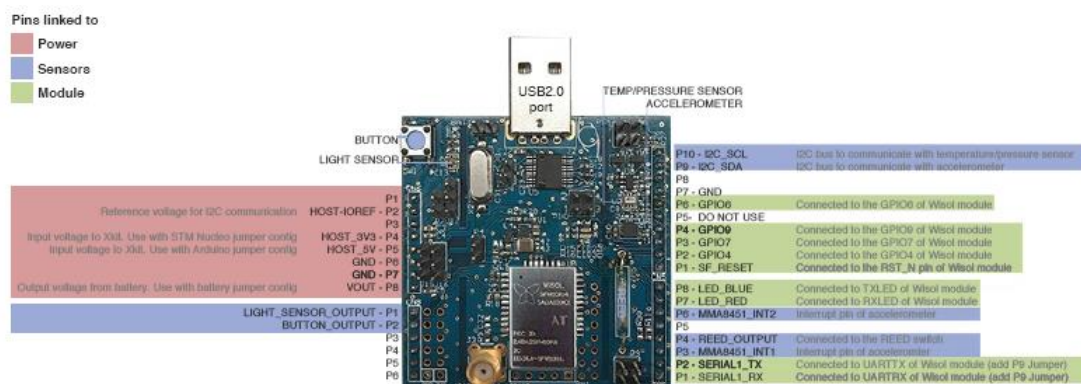
3.2 Comunicación Inalámbrica

3.2.1 Módulo *Dev Thinxtra SigFox*

El módulo consta de un Arduino Uno sobre el cual se monta la tarjeta *XKit*, la cual es capaz de conectarse con la red de SigFox, la misma se caracteriza por ser multiplataforma de forma que es compatible con Arduino, Raspberry Pi, Microchip y STM32 Nucleo. El módulo de desarrollo se define en función de las diferentes zonas detalladas en la sección 2, para la implementación de este proyecto se utiliza una tarjeta en la zona RC4. El módulo presentado se caracteriza por contener un acelerómetro de 3 ejes, un sensor digital de temperatura, presión y luz.

Figura 17

Distribución de pines del XKit Thinxtra



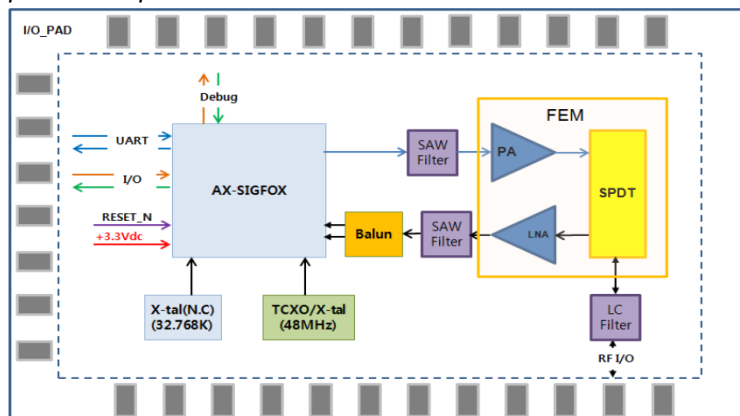
Nota. La Figura 17 muestra la distribución de pines del módulo utilizado para el desarrollo del proyecto. Tomado de *SigFox, 2020*.

El chip que permite la comunicación entre el dispositivo final y las estaciones base está basado en la tecnología WISOL y se denomina *WSSFM10R4AT* chip el cuál es un módulo

miniaturizado adaptado para la zona de Latinoamérica. El módulo tiene una MCU integrada, así como un transceptor RF integrado y es compatible con UART para la comunicación externa.

Figura 18

Diagrama de bloques del chip WISOL



Nota. En la Figura 18 se observa el diagrama de bloques de chip de comunicación en el cual se encuentra representado la comunicación UART entre el chip y el módulo XKit, un cristal de referencia propio de la tecnología SigFox de 48MHz, los periféricos de entrada y salida (GPIO), la alimentación, el reset, un filtro SAW y un filtro LC. Tomado de *LUCIDTRON, 2020*.

Tabla 5

Características del Chip WISOL

Característica	Descripción
Voltaje de entrada	-0.5 a 5.5 V
Temperatura de operación	-30 a +85 C
Corriente de Tx	200 mA
Corriente de Rx	32 mA
Corriente en modo Sleep	2.5 μ A
Frecuencia de TX	920.8 MHz
Frecuencia de RX	922.2 MHz

Característica	Descripción
Potencia de TX	22.5 dBm
Sensibilidad de RX	-129 dBm

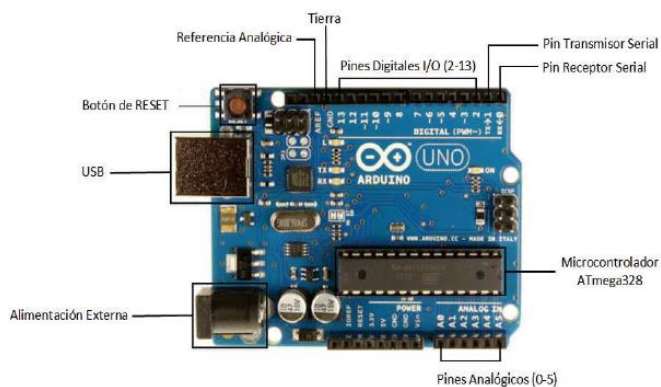
Nota. En la Tabla 5 se muestran las características del chip de comunicación WISOL. Tomado de *LUCIDTRON, 2020*.

3.2.2 Arduino Uno

El Arduino Uno es la base sobre el cual se desarrolla el programa, se caracteriza por contener un micro controlador ATMEGA 328p que cuenta con 14 pines de entrada/salida y con 6 pines analógicos de entrada para la lectura de datos provenientes de sensores (Acero & Reyes, 2016). Está basado sobre una plataforma *open source* para la programación de este módulo se denomina Arduino IDE el cual permite que se ejecuten los programas y se carguen directamente hacia la tarjeta.

Figura 19

Distribución de pines del Arduino UNO



Nota. En la Figura 19 se presenta la distribución y la estructura del Arduino. Tomado de *Acero & Reyes, 2016*,

3.3 Sensores de gases

Los sensores son dispositivos que permiten obtener mediciones de magnitudes físicas o químicas transformando dicha medición en señales eléctricas para poder cuantificarla, en este caso se hace referencia a los sensores de gases ambientales que sirven para el correspondiente análisis (Acero & Reyes, 2016). En la siguiente sección se encuentran detallados los sensores disponibles en el mercado compatibles con el módulo de desarrollo *XKit Thinxtra*, para lo cual se analizan cada una de las características y especificaciones de los sensores.

3.3.1 Sensor de CO

Para la elección del sensor de CO se consideran los sensores MQ 7 y 4CO 500, los cuales se encuentran presentes en el mercado y de los cuales se pueden obtener señales adecuadas para la adaptación con el módulo de desarrollo,

Tabla 6

Análisis Comparativo entre MQ7 y 4CO 500

	MQ 7	4CO 500
Voltaje de Operación	<5.5 v	<3.3 v
Corriente de Operación	180 mA	150 mA
Rango de medición	0 a 4000 ppm	0 a 500 ppm
Precio	\$11	\$45
Tecnología	Por semiconductor	Electroquímico

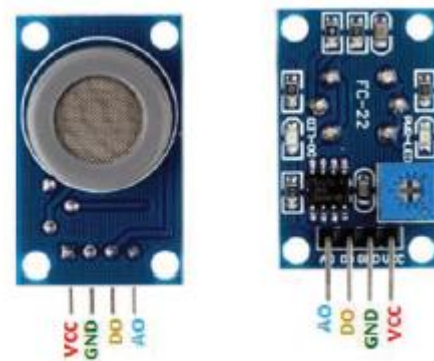
Nota. En la Tabla 6 se muestran las características relevantes de cada uno de los sensores.

Tomado de *Ortiz, 2017*.

Debido a que el rango de medición del sensor MQ 7 es bastante amplio con respecto al sensor 4CO 500, el sensor escogido es el MQ 7.

Figura 20

Distribución de pines del módulo MQ 7



Nota. En la Figura 20 se muestra el diagrama físico de sensor escogido con la distribución de pines. Tomado de *Ortiz, 2017*.

- VCC. Alimentación del módulo 5V
- GND. Tierra
- DO. Salida Digital
- AO. Salida analógica del sensor MQ 7

3.3.2 Sensor de CO₂

De la misma manera para la elección del sensor de CO₂ se toma en consideración el sensor MQ135 y el sensor MQ 81, físicamente ambos presentan la misma configuración con respecto a los pines de salida y al recubrimiento de acero inoxidable presente en la cubierta del sensor.

Tabla 7*Análisis Comparativo entre MQ 135 y MQ 811*

	MQ 135	MQ 811
Voltaje Operativo	De 2.5v a 5v	< 5.5v
Corriente de operación	160mA	200 mA
Disipación de potencia	<900mW	1200 mW
Temperatura de almacenamiento	-20 C a 70 C	-20 C a 50 C
Rango de medición	10 - 10000 ppm	250 - 10000 ppm
Margen de error	±100ppm	±100ppm
Tiempo de respuesta	<10 seg	< 5 seg
Fiabilidad	Alta	Alta
Precio	\$6.50	\$74.80
Disponibilidad	Inmediata	---

Nota. En la Tabla 7 se presentan diferencias técnicas entre los sensores MQ 135 y MQ 811.

Tomado de *Ortiz, 2017*.

Estos parámetros arrojan que el módulo MQ 135 tiene un rango más amplio de medición además de tener un menor consumo de potencia, por lo cual se procedió a escoger dicho sensor. El sensor posee una resistencia que varía en función de la concentración del CO₂ percibida, el rango va desde 30 KΩ y 200 KΩ, así se muestra la distribución de pines en la Figura 21 (Ortiz, 2017).

Figura 21

Distribución de pines MQ 135



Nota. En la Figura 21 se muestra el diagrama físico de sensor escogido con la distribución de pines. Tomado de *Ortiz, 2017*.

- VCC. Alimentación del módulo 5V
- GND. Tierra
- DO. Salida Digital
- AO. Salida Analógica del sensor MQ 135

3.3.3 Sensor de NO₂

En concordancia con la utilización de los sensores de la familia MQ para la variable de medición de NO₂ se determina el uso del sensor MQ131 tal como lo indica (Morales, 2016), este sensor es capaz de detectar gases como NO₂ y O₃.

Tabla 8

Características del sensor MQ 131

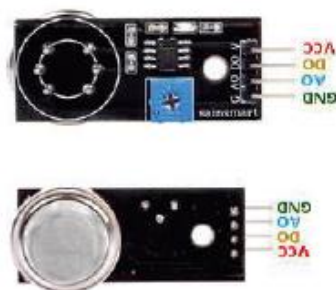
Característica	Descripción
Voltaje de Operación	< 5.5 V
Corriente de Operación	180 mA
Tecnología	Por semiconductor
Rango de Detección	10 partes por billón (ppb) a 1 ppm

Característica	Descripción
Precio	\$ 48

Nota. En la Tabla 8 se muestran las características relevantes del sensor. Tomado de *Morales, 2016.*

Figura 22

Distribución de pines del módulo MQ 131



Nota. En Figura 22 se muestra la distribución de pines del sensor MQ 131. Tomado de *Acero & Reyes, 2016.*

- VCC. Alimentación del módulo 5V
- GND. Tierra
- DO. Salida Digital
- AO. Salida Analógica del sensor MQ131

3.4 Alimentación y encapsulamiento del dispositivo

3.4.1 Muestreador activo

En función a lo definido anteriormente se utiliza una batería de 6V con una capacidad de 7.5 Ah, debido a que el sistema requiere que se mantenga en constante funcionamiento.

Además para el encapsulamiento del dispositivo total se dispone de una caja impermeable de ABS con un grosor de 4 mm lo que permite que los componentes electrónicos y mecánicos no se vean afectados por los cambios ambientales.

Tabla 9

Características de Batería

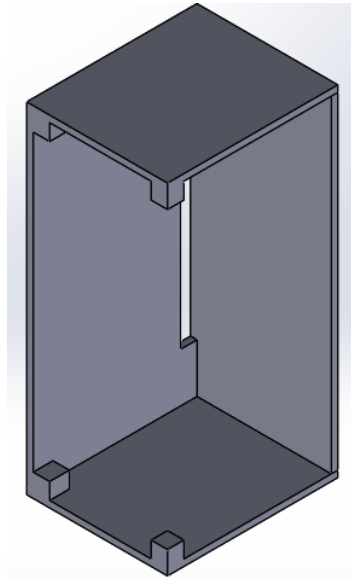
Característica	Descripción
Voltaje nominal	6V
Capacidad	7.5 Ah
Dimensiones	11.5 mm x 6.5 mm x 7.5 mm
Peso	1.1 kg
Tipo de batería	Batería seca

Nota. En la tabla 9 se muestran las características de la batería empleada. Tomado de Yuhasa, 2020.

En adición al encapsulamiento total del dispositivo se dispone del encapsulamiento de los sensores de forma que se proceda con el cálculo de las partes por millón en un volumen conocido, así como lo indica (Vaisala, 2020), de esta manera se establece una cámara de medición en la cual ingresa la muestra tomada e incide sobre los sensores para que la medición se efectúe. El diseño de la cámara de medición se modeló en SolidWorks con unas dimensiones de 6.5mm x 6.4 mm x 3.2 mm, el diseño se lo imprimió con material PLA (ácido poliláctico). El orificio lateral corresponde a la abertura necesaria para el ingreso de los sensores MQ 7, MQ 131 y MQ 135.

Figura 23

Cámara de medición en vista isométrica (muestreador activo)



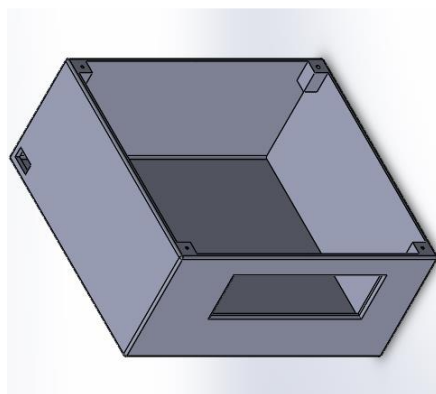
Nota. En la Figura 23 se muestra el diseño de la cámara de medición utilizada para encapsular a los sensores utilizados.

3.4.2 Muestreador pasivo

De forma análoga con el diseño de la cámara de medición se diseña el encapsulamiento del muestreador pasivo, dentro del cual se encapsula el dispositivo de comunicación SigFox, el micro controlador, alimentación del dispositivo y el arreglo de sensores. La estructura se diseñó en Solidworks con unas dimensiones de 11 cm x 10.5 cm x 8 cm además se muestra los orificios necesarios en los cuales se colocan los sensores, se define un grosor de pared de 2mm con el objetivo de resistir a los cambios climáticos e intemperie.

Figura 24

Cámara de medición en vista isométrica (muestreador pasivo)



Nota. En la Figura 24 se muestra el diseño del encapsulamiento del dispositivo para la implementación del dispositivo como muestreador pasivo.

Para la implementación del dispositivo implementando el muestreador pasivo se omite la utilización del servomotor, la cámara de medición, el muestreador de aire y el filtro de partículas, por lo cual se dimensiona una batería acorde con el consumo de los sensores, el micro controlador y el dispositivo de comunicación, se define una batería Lipo de 7.5 V a 2200 mAh.

Tabla 10

Características de Batería

Característica	Descripción
Voltaje nominal	7.5V
Capacidad	2200 mAh
Dimensiones	11.5 mm x 6.5 mm x 7.5 mm
Peso	0.3 kg
Tipo de batería	Batería Lipo

Nota. Las características de la batería seleccionada para el muestreador pasivo se muestran en la Tabla 10. Tomado de *Yuhasa, 2020*.

3.4.3 Convertidor Step - Down

En vista que las fuentes de alimentación para los dos sistemas planteados superan el voltaje de operación de los componentes electrónicos como lo son los sensores, el servomotor, el muestreador de aire, se define el convertidor *step-down* con la finalidad de obtener un valor constante de voltaje de 5V a la entrada de cada uno de estos componentes. El convertidor elegido para la implementación es el LM2596 que a diferencia de los convertidores lineales se caracterizan por su alta eficiencia de conversión superior al 80%, una excelente regulación de línea y un bajo voltaje de rizado.

Tabla 11

Características del convertidor LM2596

Característica	Descripción
Voltaje de entrada	4.5V a 40V DC
Voltaje de salida	1.23V a 37V DC
Corriente máxima de salida	3 A
Eficiencia de conversión	92 %
Potencia de salida	25 W
Ripple de salida	30 mV
Frecuencia de trabajo	15 kHz

Nota. En la Tabla 11 se definen las especificaciones técnicas más relevantes del convertidor.

Tomado de *Electronics, 2020*.

3.5 Interfaz gráfica para el usuario

Para la presentación de los datos hacia el usuario final se ha determinado una interfaz con un diseño amigable y de fácil acceso para el usuario. Con tal premisa se define la utilización y programación de una aplicación móvil en la cual se puedan visualizar los datos recogidos, esta aplicación es capaz de entablar una comunicación directa con los datos recopilados desde la

base de datos hacia la aplicación móvil. La aplicación móvil se la diseñó en Android Studio, el cual es un entorno de desarrollo integrado para la implementación de aplicaciones móviles para Android, las características esenciales de este software se mencionan a continuación (Developers, 2020):

- Un sistema de compilación flexible basado en Gradle
- Un emulador rápido y cargado de funciones
- Un entorno unificado donde puedes desarrollar para todos los dispositivos Android
- Aplicación de cambios para insertar cambios de códigos y recursos a la aplicación en ejecución sin reiniciar la aplicación
- Variedad de marcos de trabajo y herramientas de prueba.

En adición se dispuso la visualización de estos datos mediante una página web, en la cual se la pueda observar detalladamente la información presentada como las gráficas y la recopilación de los datos, manejando en un entorno en el cual no sea indispensable la instalación de un aplicativo en el *smartphone*. El diseño de la página web se basa en tres lenguajes de programación orientados al desarrollo de web como lo son *javascript*, *php* y *html* estos lenguajes se caracterizan por ser multiplataforma y compatibles con cualquier navegador.

CAPÍTULO IV

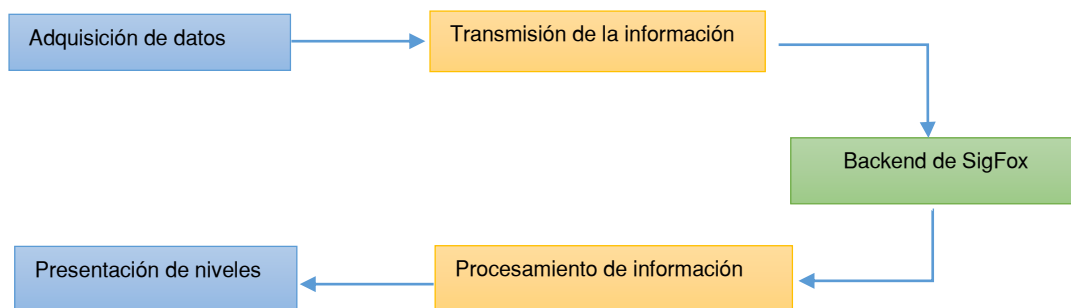
Desarrollo e Implementación

En el presente capítulo se presenta el desarrollo e implementación de la metodología elegida para cada prototipo, de manera que se detallan cada uno de los roles que desempeñan los elementos electrónicos dentro del sistema y la arquitectura del mismo, además del hardware utilizado se muestran las configuraciones y programación realizada en el correspondiente software. Finalmente con los lineamientos planteados y con el respectivo desarrollo se procede con la calibración de los prototipos con los equipos especializados para obtener valores cercanos a la realidad y con la implementación dada tanto en exteriores como en interiores.

4.1 Arquitectura del Sistema

Figura 25

Esquema del prototipo



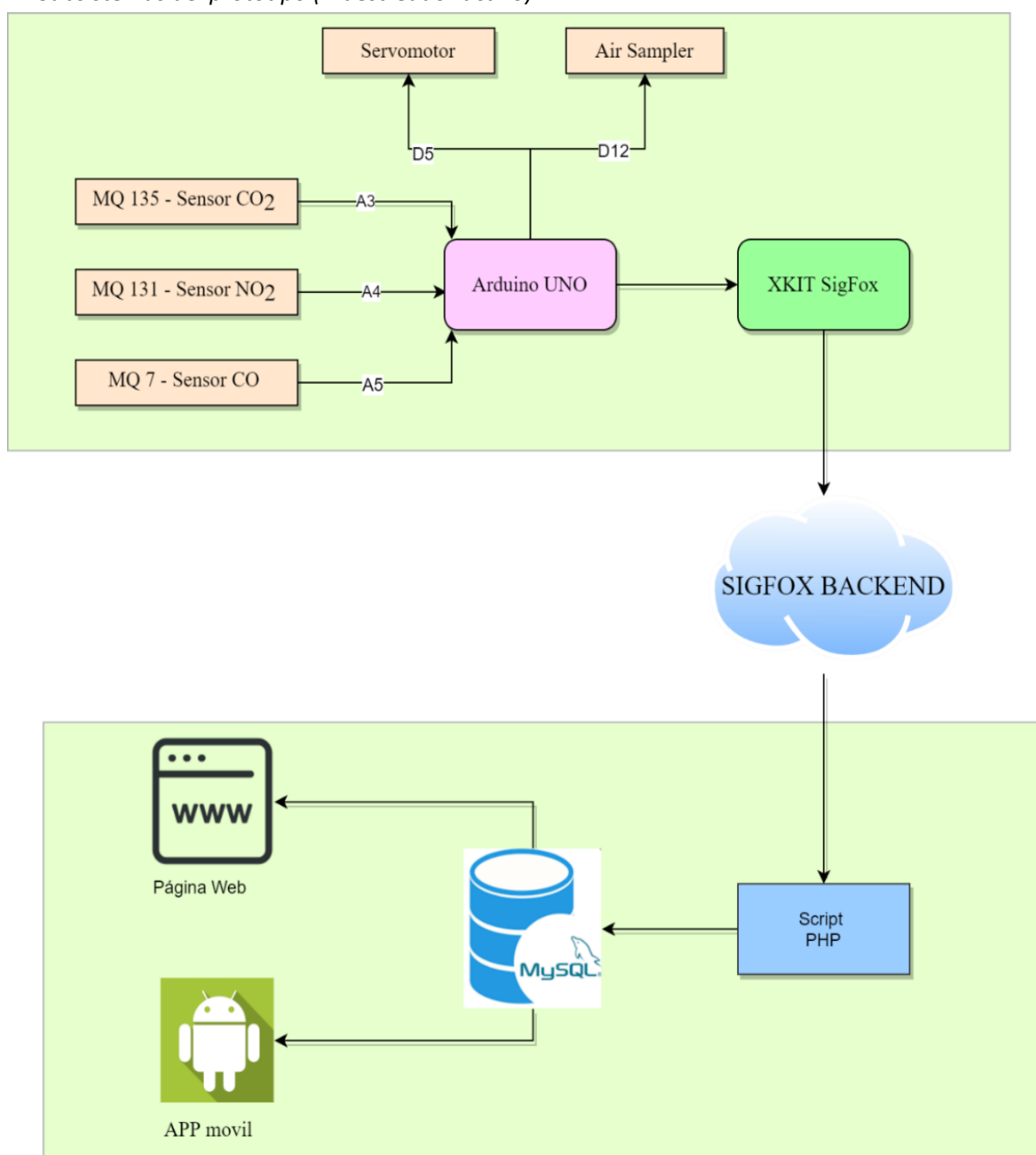
Nota. El esquema del sistema implementado se muestra en la Figura 25, con los respectivos bloques de procedimientos a realizar. En inicios se muestra el bloque de adquisición este se encarga de la obtención de datos del ambiente, dentro de este bloque se encuentran inmersos los sensores de CO, CO₂ y NO₂ y el módulo de Arduino que se encarga de establecer las rutinas de medición, en segunda instancia se muestra el bloque de la transmisión de la información en

este bloque juega un papel fundamental el equipo SigFox el cual se encarga de transmitir la información captada por los sensores. La información enviada del nodo sensor es acogida en el *backend* de SigFox en el cual se encuentra como datos sin decodificar, para la decodificación se hace uso de un *callback* para apuntarlo hacia un servidor gratuito. A partir del procesamiento de la información se valida los datos dentro de una base de datos en la cual se guarda toda la información recopilada, finalmente se tiene el bloque de la presentación de los niveles de contaminación medidos por la estación ambiental, en este se presentan las dos formas de la visualización, la primera mediante una aplicación desarrollada en *Android Studio* y la segunda desarrollada en lenguaje *HTML, php y javascript* orientado a la visualización de los datos en otros dispositivos como laptops y tablets.

Con la premisa anterior se declaran dos subsistemas que se proceden a detallar: el subsistema transmisor y el subsistema receptor, dentro de cada uno de ellos se muestran los componentes físicos electrónicos y componentes de software.

Figura 26

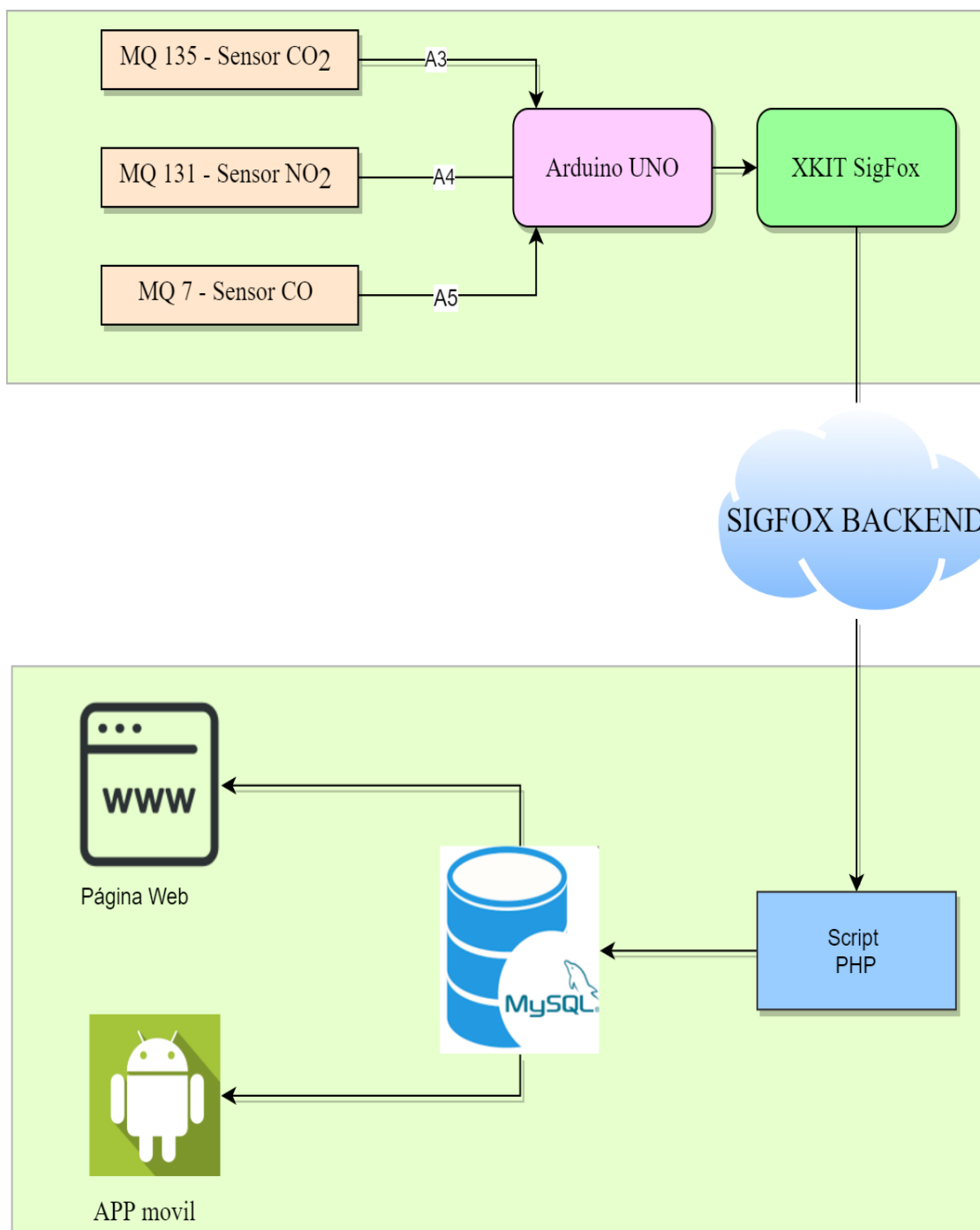
Subsistemas del prototipo (Muestreador activo)



Nota. Subsistemas del prototipo implementado como muestreador activo.

Figura 27

Subsistemas del prototipo (Muestreador pasivo)



Nota. Subsistemas del prototipo implementado como muestreador pasivo.

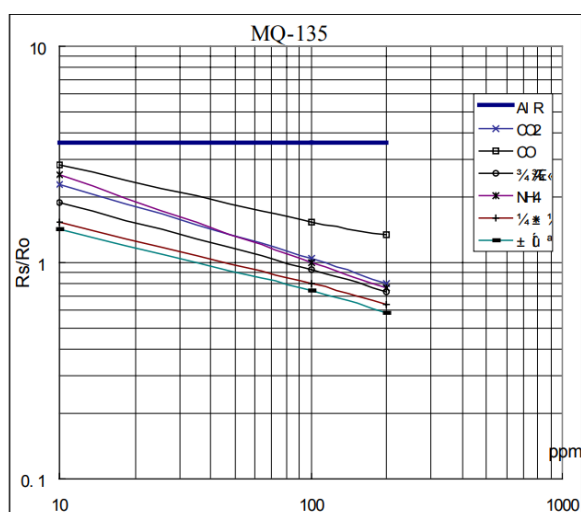
4.1.1 Subsistema Transmisor

4.1.1.1 Sensor de CO₂

Para la utilización de este sensor se procedió con la calibración del mismo, como lo indica en (Milan, 2016).

Figura 28

Curva de sensibilidad sensor MQ 135



Nota. En la Figura 28 se muestra la curva de sensibilidad para los diferentes gases que el sensor puede captar, no obstante para el proceso de linealización del sensor se usa solamente los valores que caracterizan el CO₂. Tomado de *Milan, 2016*.

Se obtienen los valores provenientes de la gráfica mostrada, de manera que se obtenga una función de tal manera que se asemeje a una función potencia $y=ax^b$, en el caso de análisis se plantea:

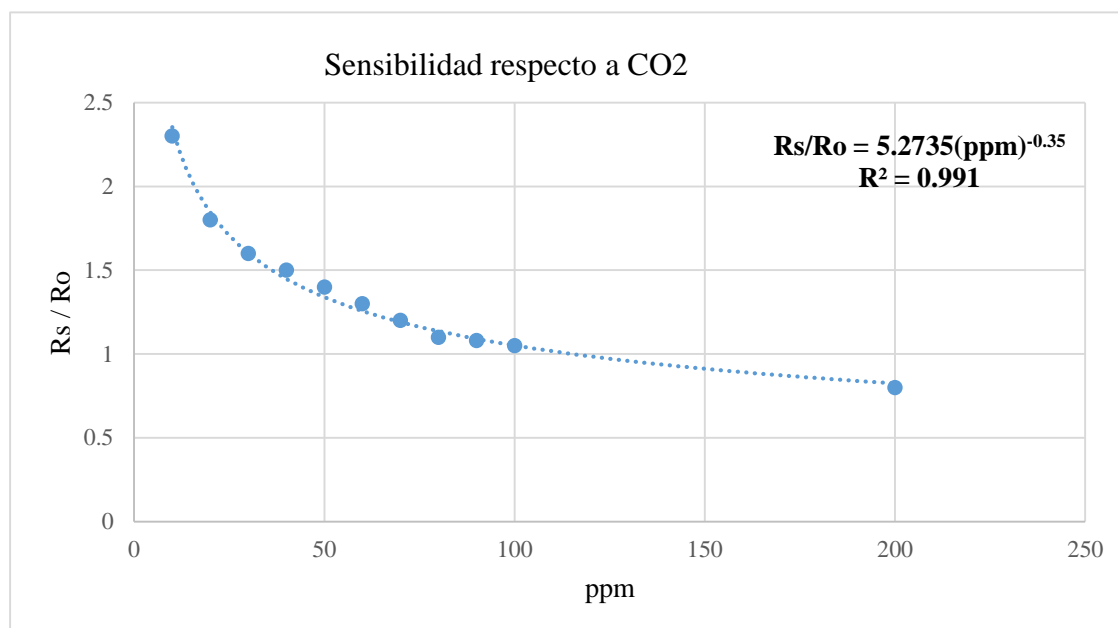
$$\frac{R_s}{R_o} = a (ppm)^b$$

Obteniendo el valor en ppm se obtiene:

$$ppm = \left(\frac{R_s}{R_o} \frac{1}{a} \right)^{\frac{1}{b}}$$

Figura 29

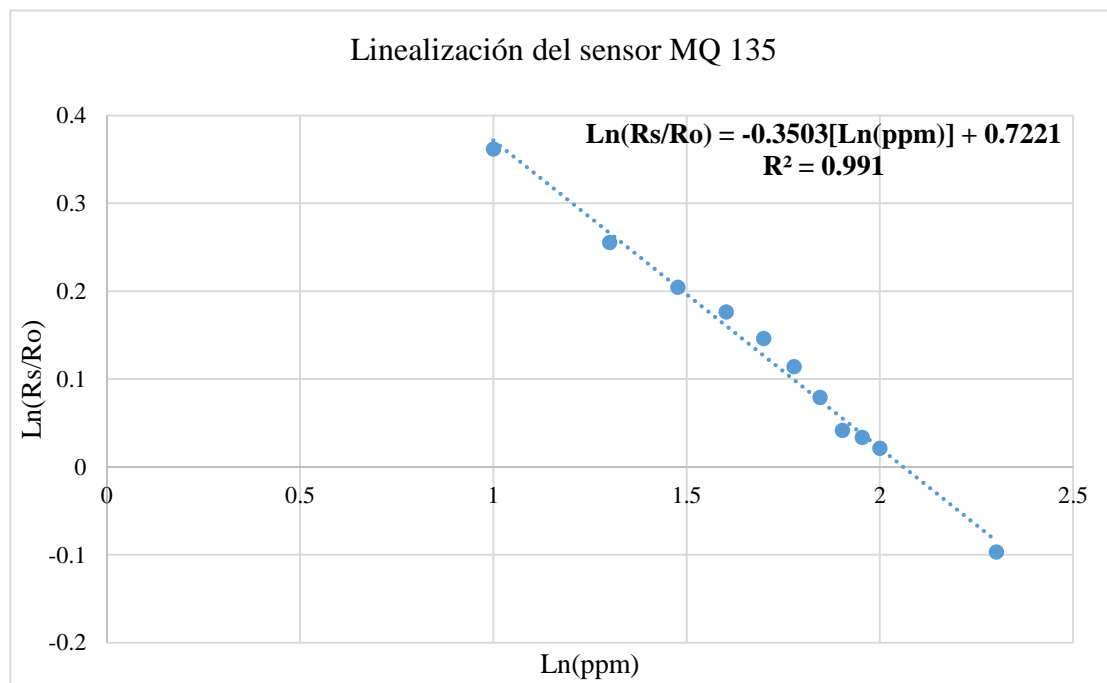
Sensibilidad respecto a CO₂



Nota. En la Figura 29 se determina que $a = 5.2735$ y $b = -0.35$. Para el establecimiento de R_s se verifica en la hoja técnica de los datos que es la resistencia de detección que varía desde 30 k Ω hasta 200 k Ω dependiendo el voltaje de alimentación, y R_o corresponde a una resistencia constante dentro del circuito de acoplamiento que es de 1 k Ω .

Figura 30

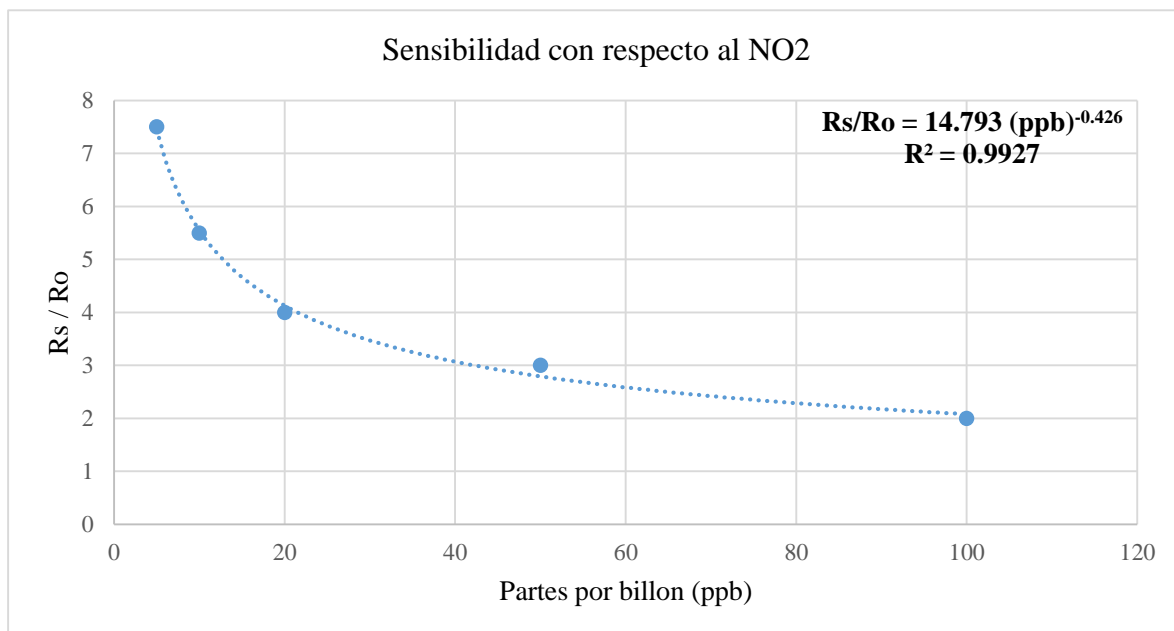
Linealización del sensor MQ 135



Nota. La Figura 30 presenta la linealización del sensor aplicando logaritmos en ambos ejes se obtiene la ecuación $\text{Ln}(R_s/R_o) = -0.3503[\text{Ln}(\text{ppm})] + 0.7221$, esta expresión se utiliza en la programación de Arduino para la transformación del voltaje en valores de ppm.

4.1.1.2 Sensor de NO₂

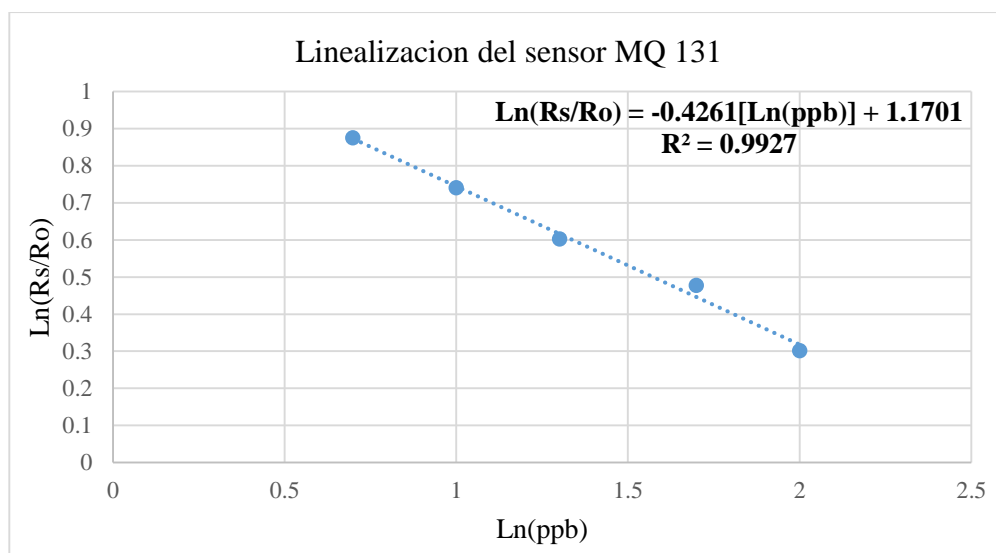
De la misma manera se procede con la obtención de los valores para obtener la sensibilidad del sensor al NO₂ y linealización del mismo para lo cual se obtienen los valores correspondientes dentro de la hoja de características y se valida solamente los datos correspondientes a NO₂, dichos datos se extraen de la hoja de datos en el Anexo 1.

Figura 31*Sensibilidad del módulo MQ 131*

Nota. Debido a la naturaleza del sensor se valida el rango de medición en el orden de partes por billón de manera que después de haberse obtenido la respuesta en ppb se procede con la transformación a ppm. Los coeficientes obtenidos se muestran en la Figura 31 donde $a=14.793$ y $b= -0.47$.

Figura 32

Linealización del sensor MQ 131



Nota. De forma análoga la ecuación característica que proviene de la linealización del sensor se muestra en la Figura 32.

La transformación de ppb a ppm se la realiza como indica (Laboratories, 2020), de manera que al valor obtenido en ppb se aplica la siguiente regla de conversión para obtenerlo en ppm.

$$1 \text{ ppm} = 1000 \text{ ppb}$$

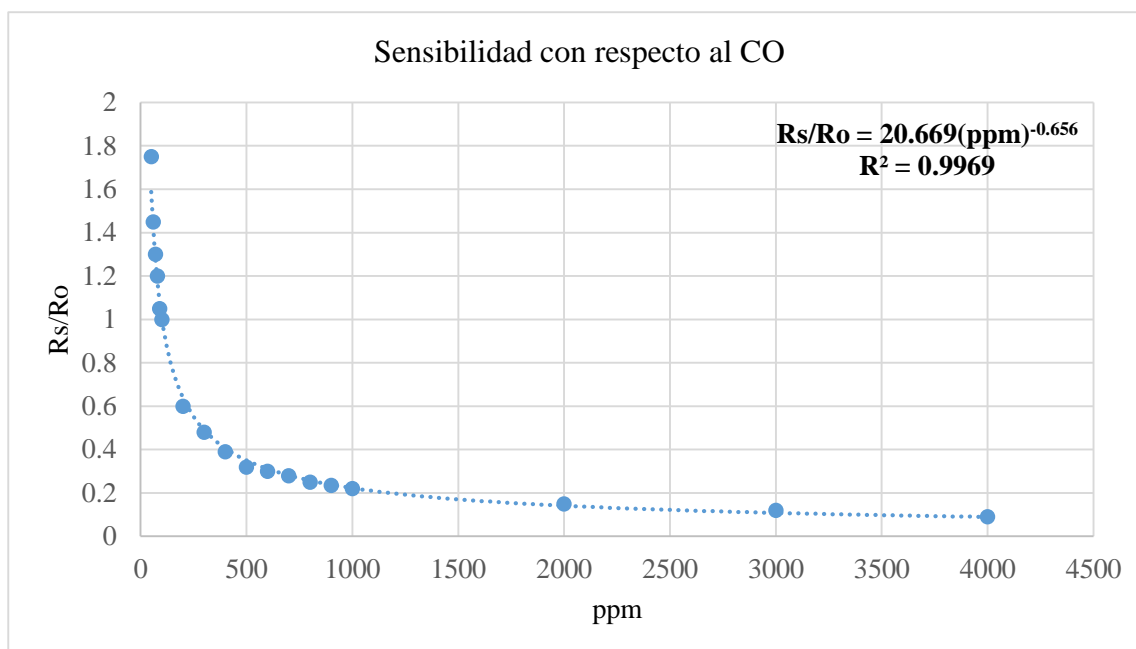
4.1.1.3 Sensor de CO

La salida del sensor viene dada en el pin 4 de la cual se obtiene los valores de voltaje obtenidos, no obstante, para la calibración se tiene una consideración particular la cual

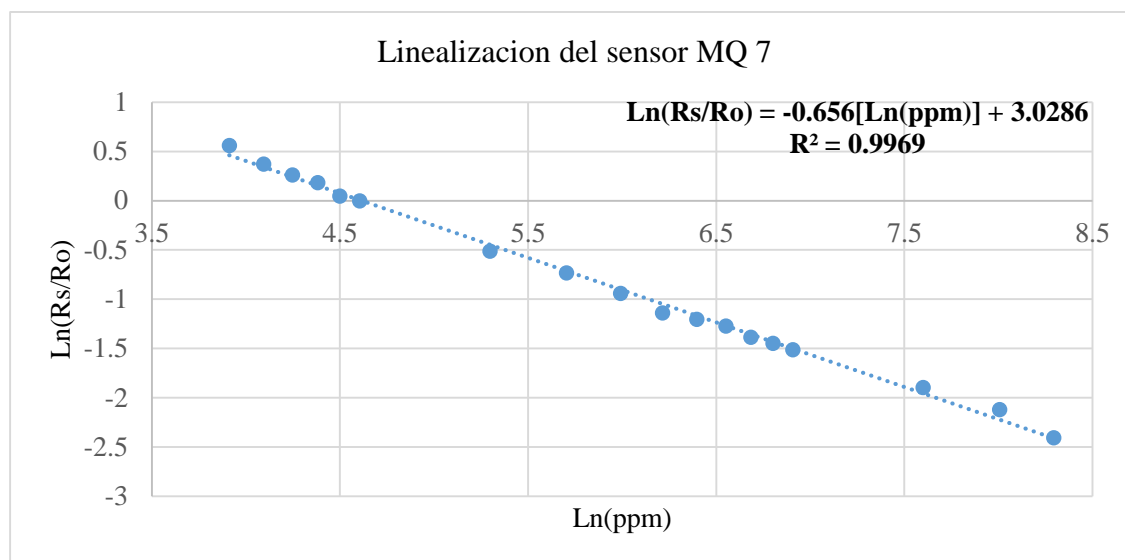
determina un pre-calentamiento que dura alrededor de 24 horas, una vez que el sensor se encuentre atravesada esta etapa puede realizar mediciones cada 150 segundos (2.5 minutos). Con respecto a la linealización del sensor se lo maneja de la misma forma como se trata con los sensores anteriores, asimismo los valores se obtienen de la hoja técnica que se la puede observar en el Anexo 2.

Figura 33

Sensibilidad con respecto al CO



Nota. La ecuación que describe el comportamiento se muestra en (Milan, 2016), así mismo se procede con el cálculo de los coeficientes $a = 20.669$ y $b = -0.656$, en la Figura 33 se muestra solamente el comportamiento del sensor con respecto al CO.

Figura 34*Linealización del sensor MQ 7*

Nota. En la Figura 34 se muestra la linealización del sensor con la obtención de la respectiva ecuación.

4.1.1.4 Arduino UNO

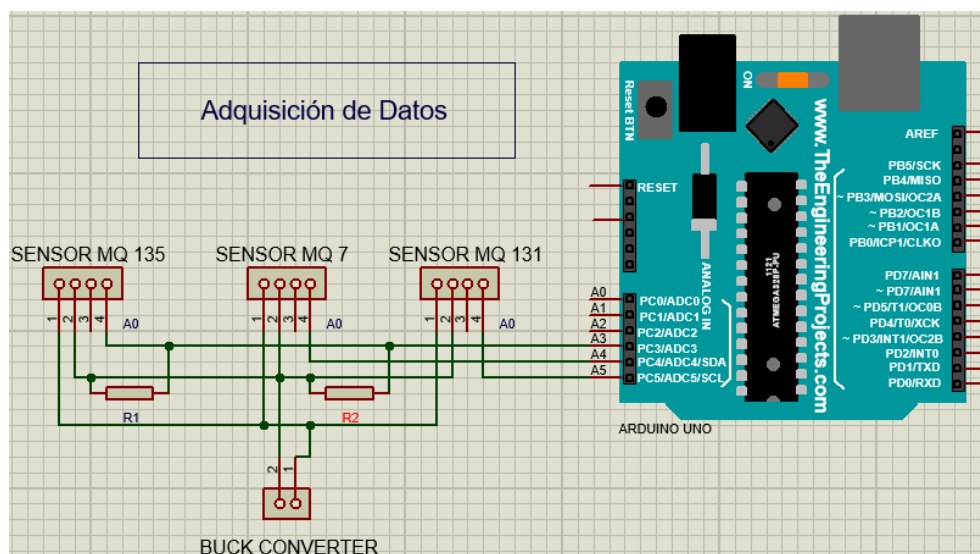
Tabla 12*Periféricos controlados por Arduino*

Muestreador activo	Muestreador pasivo
- Sensor MQ 7	- Sensor MQ 7
- Sensor MQ 135	- Sensor MQ 135
- Sensor MQ 131	- Sensor MQ 131
- Servomotor	
- Muestreador de Aire	

Nota. El Arduino Uno corresponde al micro controlador del prototipo, tiene la función de manejar y controlar los elementos electrónicos mostrados en la Tabla 12.

Figura 35

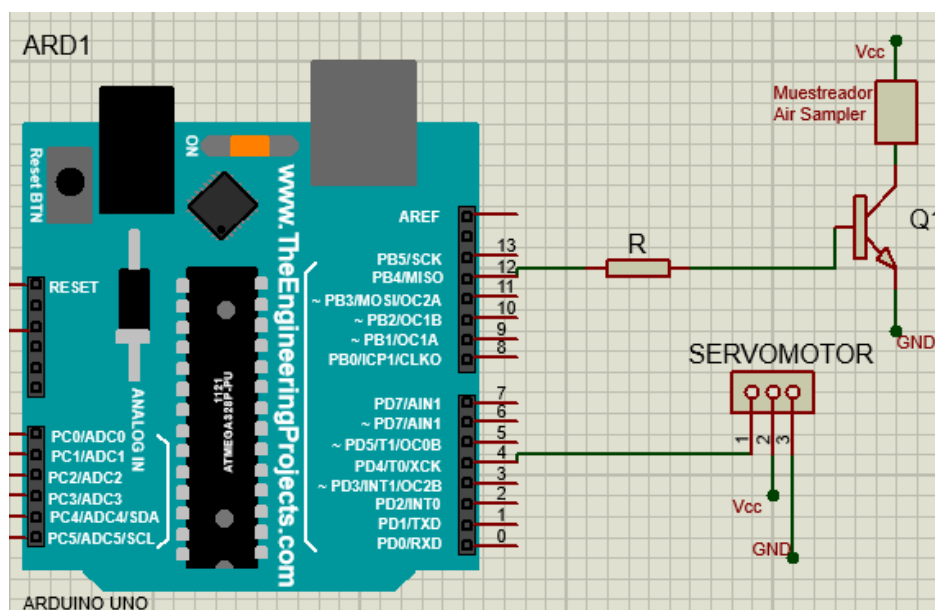
Conexión de los sensores al Arduino (M. activo y pasivo)



Nota. Con las consideraciones anteriores se muestra el diagrama de conexiones que conectan a los periféricos con el Arduino UNO. Las entradas analógicas correspondientes a los sensores se colocan en función de los pines libres en concordancia con el módulo *XKit ThinXtra*, es decir desde el pin A3 hasta el pin A5 como se observa en la Figura 35, R1 y R2 muestran las resistencias de acoplamiento que son de 1kΩ.

Figura 36

Conexión de los periféricos de salida al Arduino (M. activo)



Nota. La alimentación para la adquisición de los datos se la obtiene de un convertor LM2596 configurado para una obtener una salida exacta de 5 V, la salida digital del servomotor se coloca en el pin D4, y el muestreador del aire en el pin D12 estas conexiones se muestran en la Figura 36.

4.1.1.5 Modulo XKit Thinxta

Para la utilización del módulo en primera instancia se realiza el registro a la red de SigFox utilizando los identificadores provenientes del módulo como son el ID y el PAC.

Figura 37

Elección del proveedor

The screenshot shows the 'sigfox buy' interface. At the top right, there is a 'Login with Sigfox Id' button. The main heading is 'Where is your company based?'. Below it, the instruction says 'Choose the country of domiciliation of your company.' A search bar contains the letter 'e'. A dropdown menu is open, showing the following options: Belgium, Costa Rica, Ecuador (highlighted in dark blue), and El Salvador. To the right, a preview card for 'WND Ecuador' is displayed. It features the WND logo, the text 'WND Ecuador', 'Ecuador', and 'Decades of experience rolling out wireless networks'. Below this, it lists the 'WND Ecuador main office' address: 'Urdesa, Báisamos 118 y Calle Única Guayaquil' and the website 'http://www.wndgroup.io'.

Nota. Se ingresa en la página web de SigFox donde se procede a seleccionar el operador del país en este caso WND Ecuador, como se muestra en la Figura 37.

Figura 38

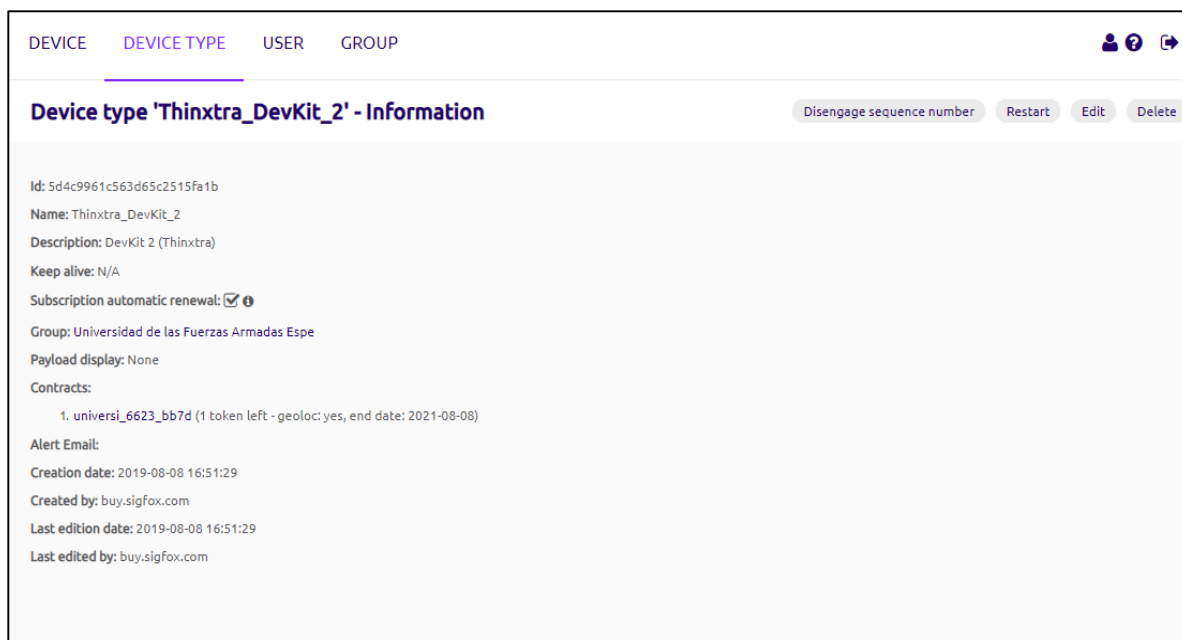
Ingreso del ID y PAC

The screenshot shows the 'Provide your DevKit's details for identification' form. At the top right, there is a 'Login with Sigfox Id' button. The form has two input fields: 'Device ID *' with the value '0041455E' and a note 'Up to 8 numbers and letters (from A to F)'; and 'PAC *' with the value 'F206591AF79D034E' and a note 'Exactly 16 numbers and letters (from A to F)'. To the right of these fields is the 'DevKit available for activation' logo. Below the input fields is the section 'Tell us about your project'. It has a 'Purpose of your project *' dropdown menu with 'Student' selected, and a 'Description *' text area containing 'Realización de varios prototipos'. At the bottom of the form, there are two buttons: '< Back' and 'Next >'.

Nota. En la Figura 38 se muestra el ingreso del ID y el PAC proveniente del dispositivo.

Al activar el Kit se crea una cuenta en el *backend*, dentro de este se puede observar los datos que son enviados desde el módulo *ThinXtra*. Una vez creada la cuenta al ingresar al *backend* de SigFox.

Figura 39

Dispositivo Registrado

The screenshot displays a web interface for managing devices. At the top, there are navigation tabs: 'DEVICE', 'DEVICE TYPE', 'USER', and 'GROUP'. The 'DEVICE TYPE' tab is selected. On the right side, there are icons for user, help, and share. Below the navigation, the title is 'Device type 'Thinextra_DevKit_2' - Information'. To the right of the title are buttons: 'Disengage sequence number', 'Restart', 'Edit', and 'Delete'. The main content area lists the following details:

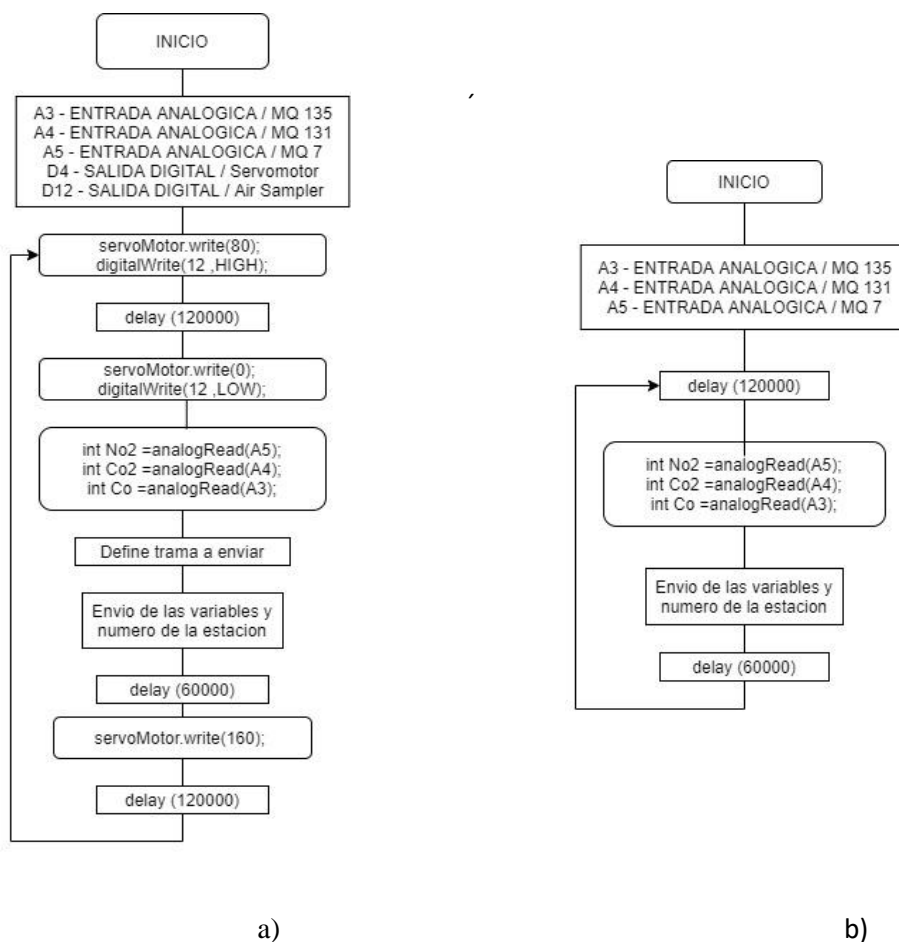
- Id:** 5d4c9961c563d65c2515fa1b
- Name:** Thinextra_DevKit_2
- Description:** DevKit 2 (Thinextra)
- Keep alive:** N/A
- Subscription automatic renewal:** ⓘ
- Group:** Universidad de las Fuerzas Armadas Espe
- Payload display:** None
- Contracts:**
 - 1. universi_6623_bb7d (1 token left - geoloc: yes, end date: 2021-08-08)
- Alert Email:**
- Creation date:** 2019-08-08 16:51:29
- Created by:** buy.sigfox.com
- Last edition date:** 2019-08-08 16:51:29
- Last edited by:** buy.sigfox.com

Nota. En la Figura 39 se muestra las características del dispositivo como el ID, el nombre, el estado de la suscripción, el grupo al cual pertenece, el día del contrato en el cual se activó el dispositivo y el día de finalización.

4.1.1.6 Envío de Datos

Figura 40

Diagrama de flujo establecido



Nota. Para el envío de datos se procede con el establecimiento de las rutinas de emisión de mensajes, en la Figura 40a se establece un diagrama en el que se detalla el procedimiento para realizar una medición como muestreador activo. En primera instancia dentro del programa se declaran los pines a utilizar de forma que se declaran las entradas analógicas y las salidas digitales, cada una de ellas se muestran en el diagrama, luego se procede con la inicialización del sistema de manera que se enciende el muestreador de aire y el servomotor se posiciona a 80 grados es

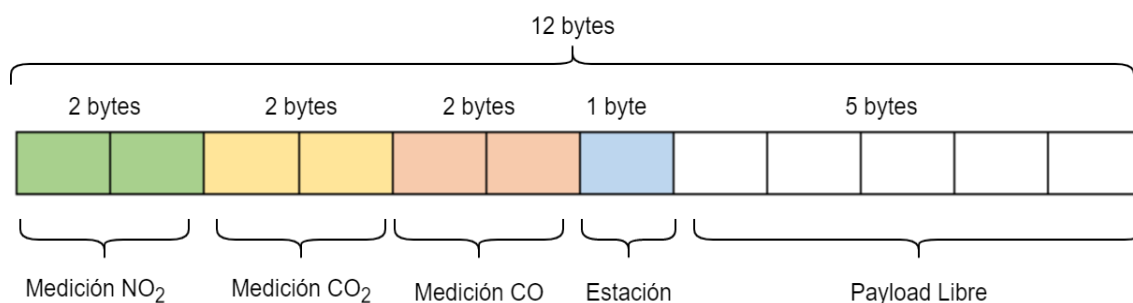
decir se procede a iniciar con la obtención de una muestra de aire, este procedimiento continua por 2 minutos luego de ello el servomotor cambia de posición a 0 grados lo que indica que el aire muestreado ingresara al sistema y el muestreador de aire se detendrá, cuando el aire entra a la cámara de medición se procede con la obtención de las variables ambientales, se declaran las variables en las cuales se guardaran estos datos, después se define la trama para el envío de los mensajes hacia el *backend* de SigFox y seguidamente se envía las 3 variables ambientales y el número de estación. Finalmente se espera un minuto para concluir con el procedimiento con lo que el servomotor llega a la posición de 160 y se mantiene 2 minutos así se asegura que el aire muestreado procede a salir del sistema, preparándose para una nueva medición. En la Figura 40b se muestra el diagrama de flujo del sistema establecido para el muestreador pasivo, en el caso de la programación se omite la declaración y las funciones que controlan el servomotor y la bomba gravimétrica.

4.1.1.6.1 Definición del *frame* de SigFox

SigFox permite una carga útil de 12 bytes para el envío de los datos, para el envío de las 3 variables consideradas se define el uso de 2 bytes para cada variable de manera que en total se tenga 6 bytes a utilizar y para la identificación de la estación se válida el empleo de 1 byte. Con esta declaración se asegura la utilización y el envío de un número que vaya en un rango de 0 a 65536 adecuado para la lectura en partes por millón de los gases contaminantes.

Figura 41

Frame de SigFox configurado



Nota. En la Figura 41 se muestra la distribución planteada de los bytes en la trama de carga útil.

4.1.2 Sistema receptor

4.1.2.1 Configuración del *Callback*

Después de enviar el mensaje al *backend* de SigFox se procede con la decodificación de la información obtenida de manera que dentro de la plataforma de SigFox se encuentra el apartado de *callback* en el cual se desarrolla dicha operación. De la misma forma que en el envío de los datos se valida la generación de las variables *co2*, *no2*, *co* y *sta* que se utilizan para la decodificación de la información, como se muestra en la sección anterior se ocupara 2 bytes para cada variable y 1 byte para la estación, esto transformado en bits representa 16 bits por cada variable y 8 bits para la estación, además se añade el formato en el cual es leída la variable en este caso se ocupa el formato *little-endian* es decir que los datos se lean del valor menos significativo al más significativo.

Tabla 13*Decodificación de los datos*

Decodificación	Parámetro
co2::uint:16:little-endian	Decodificación del CO_2
no2::uint:16:little-endian	Decodificación del NO_2
co::uint:16:little-endian	Decodificación del CO
sta::uint:8:little-endian	Decodificación de la estación

Nota. En la Tabla 13 se muestra los diferentes parámetros utilizados para la configuración del *callback*.

Tabla 14*Cuerpo del mensaje decodificado*

Cuerpo del mensaje	Denominación
co2={customData#co2}	Comando ingresado para el envío del CO_2
no2={customData#no2}	Comando ingresado para el envío del NO_2
co={customData#co}	Comando ingresado para el envío del CO
sta={customData#sta}	Comando ingresado para el envío de la estación
RSSI={rssi}	Comando ingresado para el envío del RSSI (del inglés <i>Received Signal Strength Indicator</i>)
SNR={snr}	Comando ingresado para el envío del SNR (del inglés <i>Signal-to-noise ratio</i>)

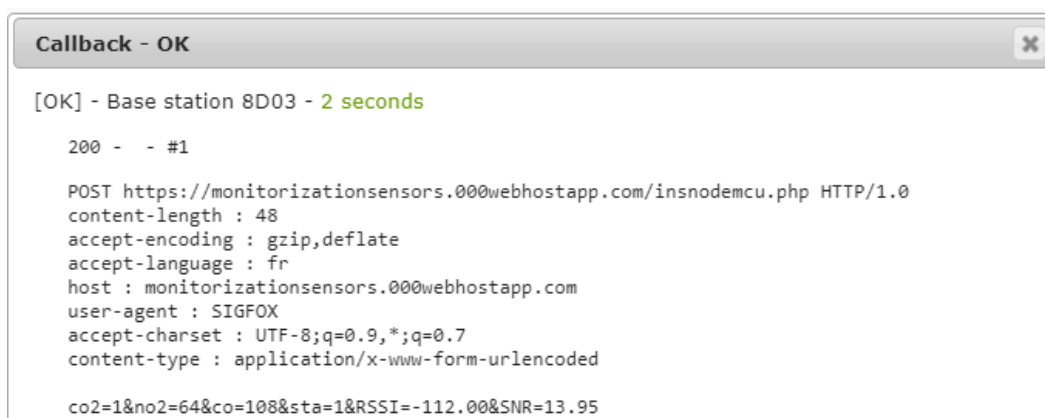
Nota. Con el procedimiento anterior se logra la decodificación de la información, sin embargo para utilizarlo en una aplicación se prepara el cuerpo de datos para enviarlo a una base de datos como se muestra en la Tabla 14, en esta sección se añade la relación señal a ruido y el indicador de la señal recibida.

Finalmente para el envío de todo el contenido mencionado se realiza una petición dentro de un servidor gratuito, con el objetivo de guardar la información dentro de una base de datos,

entonces mediante un método *POST* se apunta hacia la *URL* de la página que se encarga de guardar la información.

Figura 42

Callback configurado correctamente



```
Callback - OK
[OK] - Base station 8D03 - 2 seconds
200 - - #1
POST https://monitorizationsensors.000webhostapp.com/insnodemcu.php HTTP/1.0
content-length : 48
accept-encoding : gzip,deflate
accept-language : fr
host : monitorizationsensors.000webhostapp.com
user-agent : SIGFOX
accept-charset : UTF-8;q=0.9,*;q=0.7
content-type : application/x-www-form-urlencoded
co2=1&no2=64&co=108&sta=1&RSSI=-112.00&SNR=13.95
```

Nota. En la Figura 42 se muestra la respuesta del callback donde se observan las variables declaradas con su respectivo valor.

4.1.2.2 Configuración del *Callback* con notificación *e-mail*

Dentro del *backend* de SigFox se permite la configuración de notificaciones mediante el uso de correo electrónico, con lo cual cuando los datos sean ingresados al *backend*, se direccionen a la bandeja de entrada de un *e-mail* configurado. El objetivo de la configuración de esta notificación es el aprovechamiento de las herramientas que provee la plataforma de SigFox; para generar dichas notificaciones dentro del apartado de *callback* se selecciona el *channel* en la opción *EMAIL*.

Figura 43

Notificación mediante e-mail

Device type Thinxtra_DevKit_1 - Callback edition

Callbacks

Type DATA UPLINK

Channel EMAIL

Recipient

Multiple emails allowed separated by comma, semicolon or new line

Subject syntax: Subject with device {device}
 Message syntax: Message containing time {time}, key1 {var1}, key2 {var2}...
 Available variables: device, time, snr, station, data, rssi, seqNumber, deviceTypeId
 Custom variables: customData#co, customData#co2, customData#no2, customData#sta

Subject

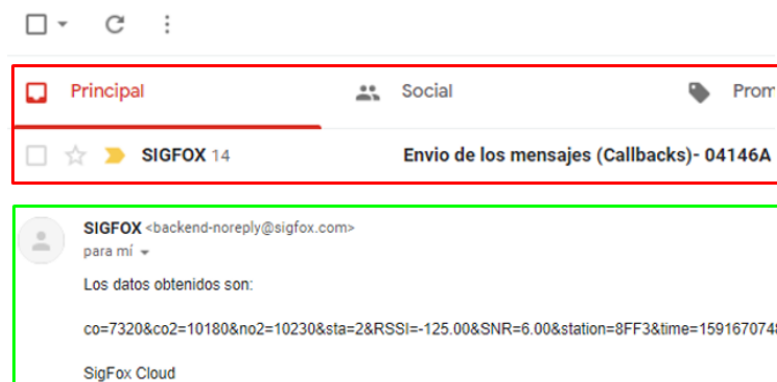
Message

Sigfox Cloud

Nota. Se configura la cuenta de e-mail como se muestra, en adición para la identificación de tales mensajes se añade un *Subject* con el formato indicado en la Figura 43, para lo cual se menciona que dispositivo está enviando dicho mensaje.

Figura 44

Callback en el e-mail



Nota. Finalmente para la verificación del envío de dichos datos hacia el *e-mail* ingresamos al mismo que fue configurado y como se observa en la Figura 44 los mensajes son receptados en la bandeja de entrada del correo electrónico.

4.1.2.3 Esquemático de la base de datos

Figura 45

Estructura de base de datos

Monitorization	
id	uniqueid autoincrement) primary key
estacion	int(11)
co	float(11)
co2	int(11)
no2	float(11)
snr	float
RRSI	int(11)
Fecha	current_timestamp

Nota. La base de datos se crea en un *WebHosting* gratuito y se la denomina como dbiot, después se añade una tabla *monitorization* que se estructura como se muestra en la Figura 45, así mismo se detallan los parámetros de la misma.

- **Id.-** Parámetro definido para obtener el número de valores dentro de la tabla y para el control del número de mensajes guardados en la base de datos.
- **Estación.-** Parámetro definido para obtener el número de estación que envía los datos.
- **CO, CO2, NO2.-** Mediciones en ppm de las estaciones.
- **RSSI.-** El indicador de intensidad de señal recibida de la estación cuando se realizó la medición.
- **SNR.-** Relación señal a ruido del enlace cuando se realizó la medición.
- **Fecha.-** Fecha en mes, día, hora, y segundo en la cual la medición fue llevada a cabo.

4.1.2.4 Extracción de datos

El método *POST* del callback dentro del *backend* de SigFox apunta a la dirección de la página creada dentro del *WebHosting*, en este caso se utiliza una página programada en PHP que se describe a continuación:

```
$servername = "localhost";  
$database = "id10838603_dbiot";  
$username = "username";  
$password = "password";  
$conn = mysqli_connect($servername, $username, $password,  
$database);
```

Se declara las variables que se utilizan como: el nombre del servidor al cual se accederá, el nombre de la base de datos creada y las credenciales proporcionadas por el *WebHosting*. Se utiliza un objeto `mysqli_connect` para establecer la conexión hacia el servidor MySQL y en los parámetros de entrada se utilizan las variables declaradas anteriormente. Con la siguiente

sentencia se hace uso de la excepción en el caso de que la conexión fallara, con el objetivo de obtener el estado de la conexión.

```
if (!$conn) {
    die("Connection failed: " . mysqli_connect_error());
}
```

De esta manera después de conectarse con la base de datos, se crean las mismas variables enviadas en la creación del *backend* para que se almacenen, así mismo como se mencionó en el envío de datos desde el *backend* el método POST se hace recurrente en la programación del script. En adición se define la zona horaria determinada para la obtención del momento en el cual la medición es obtenida.

```
$sta=$_POST['sta'];
$co2=$_POST['co2'];
$no2=$_POST['no2'];
$co=$_POST['co'];
$RSSI=$_POST['RSSI'];
$SNR=$_POST['SNR'];

date_default_timezone_set('America/Guayaquil');
$date = date('Y-m-d H:i:s');
```

Finalmente se crea una estructura para la inserción de los valores respectivos dentro de la tabla en el orden respectivo que indica la cabecera mediante las variables creadas, así mismo se atrapa la excepción en el caso en el que no se ingrese la información en la base de datos y en el caso de que se ingresen correctamente, por ultimo con la sentencia

`mysqli_close($conn)` se cierra la conexión con la base de datos.

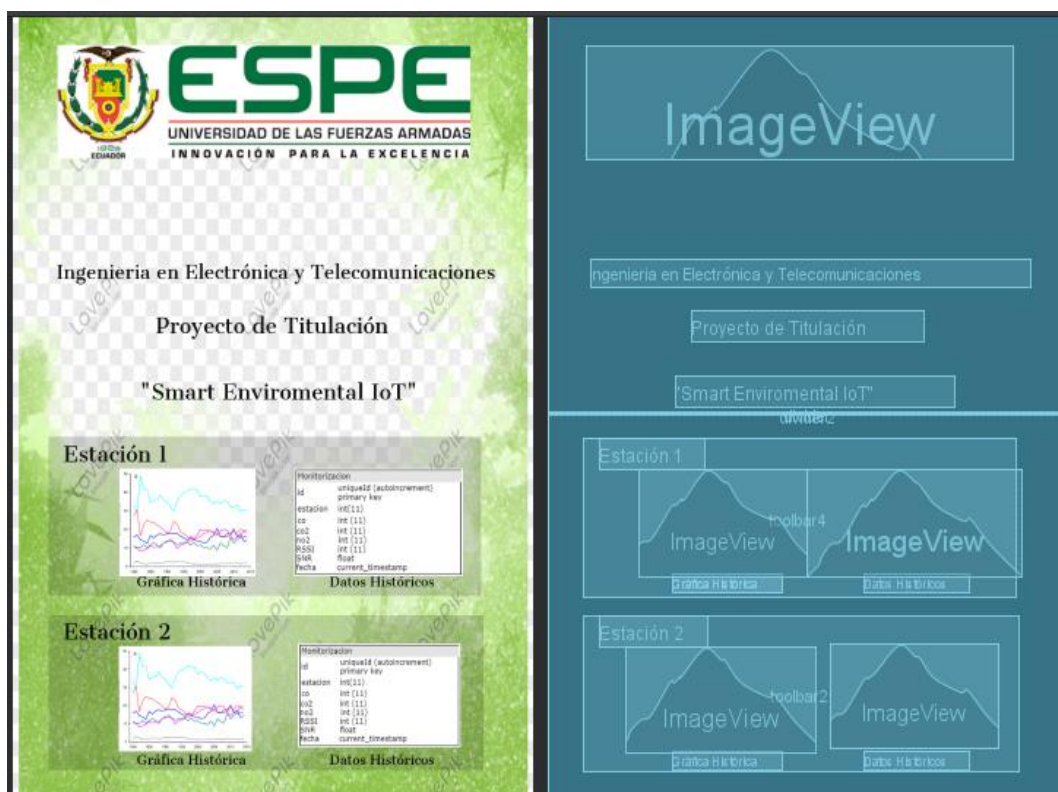
```
$sql = "INSERT INTO monitorization
(estacion,co2,co,no2,RSSI,SNR,fecha) VALUES ($sta,
$co2,$co,$no2,$RSSI,$SNR,'$date')";
if (mysqli_query($conn, $sql)) {
    echo "New record created successfully";
} else {
    echo "Error: " . $sql . "<br>" . mysqli_error($conn);
}
```

4.1.2.5 Programación de la Interfaz

4.1.2.5.1 Aplicación Móvil

Figura 46

Interfaz principal de la aplicación



Nota. La interfaz del usuario que presenta la aplicación móvil se la desarrolla en Android Studio, dicha aplicación se diseña de forma que sea lo más intuitiva para los usuarios, en la Figura 46 se muestra la pantalla inicial de la aplicación, en la que se observa dos bloques divididos dedicados para cada estación. En la parte inferior se muestran dos opciones que detallan las mediciones obtenidas por cada estación, en la gráfica histórica se muestran los puntos de medición obtenidos a través de una línea temporal y en los datos históricos se muestra el reporte de la información en una tabla de datos con cada uno de los ítems determinados en la sección anterior. En la parte

derecha se muestra el esquemático de la aplicación, cada objeto *ImageView* direcciona hacia otra pantalla o *screen* en el que se muestran los datos de interés.

Tabla 15

Características de los objetos TextView

Característica	Definición
android:id="@+id/textView16"	Define el identificador único del objeto
android:layout_width="wrap_content"	Define el ancho del bloque: wrap_content se define en función del contenido
android:layout_height="wrap_content"	Define el largo del bloque: wrap_content se define en función del contenido
android:text="Gráfica Histórica"	Define el texto dentro del objeto
android:textColor="#0E0D0D"	Define el color
android:textSize="10sp"	Define el tamaño
app:fontFamily="@font/cantata_one"	Define la fuente del texto

Nota. En la Tabla 15 se describe cada una de las características que posee el objeto denominado *TextView*

El objeto *ImageView* posee las mismas características o funciones sin embargo para el direccionamiento a otro *screen* de la aplicación se añade la función *android:onClick="onClick"* de forma que cada vez que se requiera ingresar a ella se acceda mediante la invocación de la función. Después de la generación de la interfaz gráfica se procede con la programación de las funciones que generaran las gráficas y la tabla de datos. En primer lugar para el acceso a la información se realiza una petición para el permitir que se extraiga la información de la base de datos, esto se lo realiza mediante un script en php dentro del *Webhosting*, en el cual se declara dicho acceso, en la aplicación se traduce al método ejecutar().

Figura 47

Acceso a la base de datos

```
private void ejecutar(String URL)
public void onResponse(String response) {
    Toast.makeText(getApplicationContext(), "Operacion Exitosa", Toast.LENGTH_SHORT).show();
}StringRequest stringRequest=new StringRequest(Request.Method.POST, URL, new Response.Listener<String>() {
    @Override
}, new Response.ErrorListener() {
    @Override
    public void onErrorResponse(VolleyError error) {
        Toast.makeText(getApplicationContext(),error.toString(), Toast.LENGTH_SHORT).show();
    }
});
```

Nota. En la Figura 47 se muestra el *string URL* corresponde a la dirección donde se encuentra alojado el script, se utiliza una función *onResponse* para establecer dicha conexión y conocer el estado de la misma.

Figura 48

Obtención de los datos

```
private void consulta(String URL){
    JSONArrayRequest jsonArrayRequest=new JSONArrayRequest(URL, (response) - {
        JSONObject jsonObject = null;
        for (int i = 0; i < response.length(); i++) {
            try {
                jsonObject = response.getJSONObject(i);
                ed1.setText(jsonObject.getString( name: "estacion"));
                ed2.setText(jsonObject.getString( name: "co"));
                ed3.setText(jsonObject.getString( name: "co2"));
                ed4.setText(jsonObject.getString( name: "no2"));
                ed5.setText(jsonObject.getString( name: "RSSI"));
                ed5.setText(jsonObject.getString( name: "SNR"));
            } catch (JSONException e) {
                Toast.makeText(getApplicationContext(), e.getMessage(), Toast.LENGTH_SHORT).show();
            }
        }
    }, (error) - {
        Toast.makeText(getApplicationContext(), error.toString(), Toast.LENGTH_SHORT).show();
    });
}
```

Nota. En la Figura 48 se muestra el código utilizado para esta sección.

Después de haber creado la conexión se procede con la obtención de la información proveniente de la base de datos, para lo cual se crea el método consulta en el cual se declara el mismo *URL*, para lo que se realiza una petición con respecto a la obtención de los datos mediante el método *JsonObject.getString* que nos arroja una cadena para lo cual se declaran 6 variables (*ed1,ed2,ed3,ed4,ed5,ed6*) en las cuales se almacenaran los datos que se recogen, en la misma rutina se atrapa la excepción en el caso de error se manifieste con un mensaje de alerta en la pantalla.

Figura 49

Obtención de la grafica

```

List yAxisValues = new ArrayList();
List axisValues = new ArrayList();
Line line = new Line(yAxisValues);
    for(int i = 0; i < axisData.length; i++){
        axisValues.add(i, new AxisValue(i).setLabel(fecha[i]));
    }

    for (int i = 0; i < yAxisData.length; i++){
        yAxisValues.add(new PointValue(i, co2[i]));
    }

    for (int i = 0; i < yAxisData.length; i++){
        yAxisValues.add(new PointValue(i, co[i]));
    }

    for (int i = 0; i < yAxisData.length; i++){
        yAxisValues.add(new PointValue(i, no2[i]));
    }

List lines = new ArrayList();
lines.add(line);
LineChartData data = new LineChartData();
data.setLines(lines);
lineChartView.setLineChartData(data);

```

Nota. En la Figura 49 se muestran las líneas de código para la generación de la gráfica, para lo cual se utiliza la librería *LineChartView*, para hacer referencia al *LineChart* se crea dentro del *MainActivity* un objeto *LineChartView lineChartView = findViewById(R.id.chart)*, a partir de eso se

crean 2 *array list* en los cuales se almacenan los valores del eje x y del eje y, sobre el eje x se encuentra la fecha en la cual se ha tomado la medición con el formato especificado anteriormente, para definir los parámetros que se encuentran en el eje y se valida el *array list* con las 3 variables definidas es decir *co2*, *co* y *no2*.

Finalmente se definen las líneas que se trazan para formar la distribución de las mediciones en la gráfica adición a esto para generar el acceso de la aplicación hacia el Internet se declara la sentencia `<uses-permission android:name="android.permission.INTERNET"/>`.

Figura 50

Grafica obtenida en simulación



Nota. En la Figura 50 se verifica el funcionamiento del código realizado en Android Studio.

4.1.2.5.2 Pagina Web

Para la creación de la página web se crean 3 scripts en los cuales se definen cada uno de las funciones bien definidas, en el primer script se define como se estructura la conexión con la

base de datos y la extracción de datos, en el segundo se define como se grafica dentro de un objeto *Chart*, y finalmente se define la obtención de datos en una tabla recopilatoria con toda la información.

Para la extracción de datos se define un arreglo en el cual se guardara la información, se lo define como *\$datapoints*, se realiza una consulta en la base de datos *monitorization* en cuanto recibe la respuesta a la petición se forma el arreglo con cada uno de los componentes que caracteriza la medición de cada estación, así el siguiente código se utiliza para la extracción de los datos en formato *json*.

```
$data_points = array();
$result = mysqli_query($con, "SELECT * FROM
monitorization");
while ($row = mysqli_fetch_array($result)) {
    $point = array("Estacion" => $row['estacion'], "co2"
=> $row['co2'], "co" => $row['co'], "no2" => $row['no2'], "RSSI"
=> $row['RSSI'], "SNR" => $row['SNR'], "Fecha" => $row['fecha']);
    array_push($data_points, $point);
}
echo json_encode($data_points);
```

Figura 51

Respuesta del script

```
[{"Estacion": "1", "co2": "520", "co": "31", "no2": "3030", "RSSI": "-122", "SNR": "14.91", "Fecha": "2020-02-26 08:16:55"},
{"Estacion": "1", "co2": "670", "co": "33", "no2": "3030", "RSSI": "-120", "SNR": "14.8", "Fecha": "2020-02-26 08:22:51"},
{"Estacion": "1", "co2": "540", "co": "29", "no2": "3000", "RSSI": "-99", "SNR": "24.12", "Fecha": "2020-02-26 08:28:49"},
{"Estacion": "1", "co2": "540", "co": "29", "no2": "3020", "RSSI": "-122", "SNR": "14.53", "Fecha": "2020-02-26 08:34:48"},
{"Estacion": "1", "co2": "550", "co": "33", "no2": "3020", "RSSI": "-120", "SNR": "12.65", "Fecha": "2020-02-26 08:40:46"},
{"Estacion": "1", "co2": "550", "co": "30", "no2": "3030", "RSSI": "-122", "SNR": "11.47", "Fecha": "2020-02-26 08:46:44"},
{"Estacion": "1", "co2": "520", "co": "30", "no2": "3020", "RSSI": "-120", "SNR": "16.88", "Fecha": "2020-02-26 09:14:27"}]
```

Nota. El resultado del código mostrado anteriormente se muestra en la Figura 51.

El siguiente script se ha desarrollado en lenguaje *javascript* para el desarrollo y obtención de las gráficas pertinentes, para lo cual se declara el tiempo de actualización de la gráfica en el inicio y el formato en el cual se grafica el eje X, a través de la función *updateChart* se logra obtener la gráfica, con la variable *.\$getJSON* se obtienen los valores provenientes del

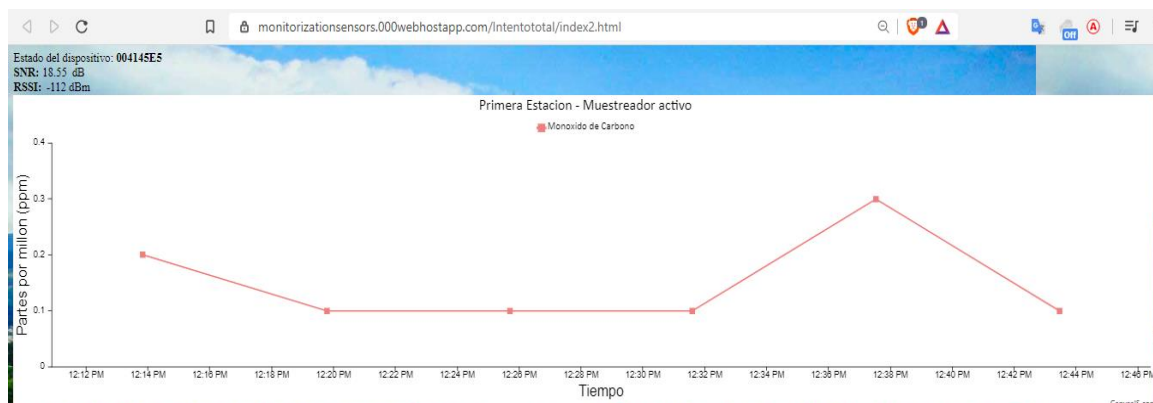
script anterior, en adición se utiliza un ciclo for con la finalidad de buscar dentro de todo el arreglo las variables de interés como la fecha, la medición de *co2* *co* y *no2*. En adición se añaden dos variables que muestran la variable RSSI y SNR.

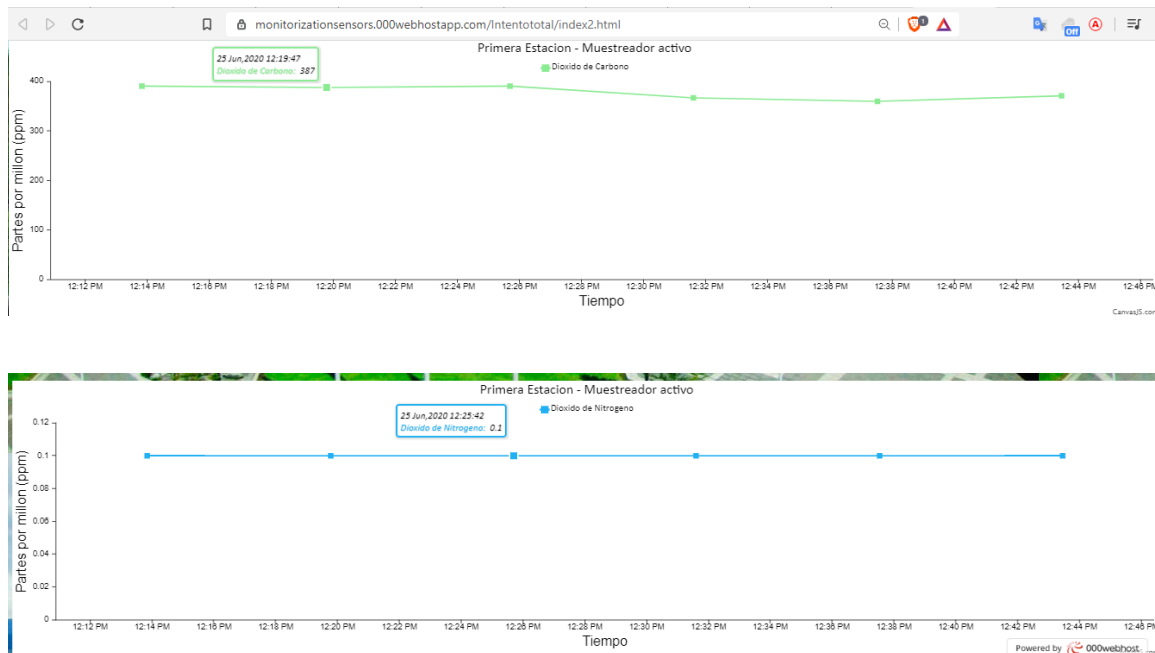
```
var updateInterval = 50000;
    xValueFormatString: "DD MMM, YYYY";
    function updateChart() {
        $.getJSON("data.php", function (result) {
            if (dataLength !== result.length) {
                for (var i = dataLength; i < result.length; i++) {
                    data.push({
                        x: new Date(result[i].Fecha),
                        y: parseInt(result[i].co2)
                    });
                    data2.push({
                        x: new Date(result[i].Fecha),
                        y: parseInt(result[i].co)
                    });
                    data1.push({
                        x: new Date(result[i].Fecha),
                        y: parseInt(result[i].no2)
                    });
                    p= parseInt(result[i].RSSI);
                    u= result[i].SNR;
                    document.getElementById("demo").innerHTML = u;
                    document.getElementById("demo1").innerHTML = p;
                }
            }
        });
    }

```

Figura 52

Graficas de la página web





Nota. Con la implementación del código explicado anteriormente, en la Figura 52 se muestra el resultado final de la interfaz gráfica desarrollada para un entorno web, cabe recalcar que debido a que a pesar de que se maneja la misma magnitud de medición (ppm) se tiene diferentes escalas en cada contaminante medido, es decir se verifica que las mediciones de CO₂ pueden estar en un rango de 350 y 450 ppm según lo indica (Meneses, 2015), de la misma manera para CO según el criterio de (Ambiente M. d., 2010) se debe encontrar en un valor promedio de 0.2 ppm a 10 ppm y con respecto a NO₂ el valor medio debe ser al menos 0.1 ppm.

Figura 53*Recopilación de datos*

```
<?php
$sql="SELECT * from monitorization";
$result=mysqli_query($con,$sql);
while($mostrar=mysqli_fetch_array($result)){
    ?>
    <tr>
        <td><?php echo $mostrar['id'] ?></td>
        <td><?php echo $mostrar['co2'] ?></td>
        <td><?php echo $mostrar['co'] ?></td>
        <td><?php echo $mostrar['no2'] ?></td>
        <td><?php echo $mostrar['RSSI'] ?></td>
        <td><?php echo $mostrar['SNR'] ?></td>
        <td><?php echo $mostrar['fecha'] ?></td>
    </tr>
<?php
}
?>
```

Nota. En adición para la muestra y obtención de los datos en una tabla recopilatoria se utiliza otro script basado en lenguaje *php*, se basa en la misma obtención de datos con la consulta dentro de la base de datos, la variable `$mostrar` define todo el arreglo de dicha consulta en la que se almacenan todas las variables, bajo esta variable para la definición de cada uno de los parámetros medidos se los especifica de la siguiente manera `$mostrar['medición']`, como se muestra en la Figura 53.

Figura 54*Obtención de la tabla de información*

id	CO2 (ppm)	CO (ppm)	NO2 (ppm)	RSSI	SNR	Fecha
1	520	31	3030	-122	14.91	2020-02-26 08:16:55
2	670	33	3030	-120	14.8	2020-02-26 08:22:51
3	540	29	3000	-99	24.12	2020-02-26 08:28:49
4	540	29	3020	-122	14.53	2020-02-26 08:34:48
5	550	33	3020	-120	12.65	2020-02-26 08:40:46

Nota. En la Figura 54 se observa el resultado del código detallado.

4.2 Implementación

4.2.1 Calibración de sensores

En primer lugar se dispuso la calibración de sensores mediante la inyección de aire puro a través de un generador de aire cero, esta calibración se la realizó en los laboratorios del Departamento de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente. Se utiliza calibración por comparación directa, este método se basa en la comparación de los valores proporcionados por el equipo o los valores medidos y los valores proporcionados bajo un patrón (Aranda V, 2004).

Figura 55

Calibración del dispositivo



Nota. En la Figura 55 se muestra la instrumentación utilizada, se identifican dos partes fundamentales, el inyector de aire cero y la estación ambiental, a través de una manguera se inyecta el aire hacia el medidor y se obtienen las medidas correspondientes a una medición en cero, con esto se obtiene el ajuste en cero de todos los sensores.

Adicionalmente a esto se realizaron pruebas con tubos de NO_2 , CO y CO_2 con una concentración en partes por millón conocida.

Figura 56

Inyección de contaminantes conocidos



Nota. En la Figura 56 se muestra la inyección de estos contaminantes sobre la estación de medición, de la misma manera se conecta la salida del tubo de prueba a la entrada de la estación ambiental. Con la obtención de las ecuaciones mostradas en el diseño se aproximó a un modelo experimental que se ajuste a las mediciones en concentraciones conocidas.

4.2.2 Frecuencia de Muestreo

Con el fin de evaluar el impacto de la contaminación atmosférica dado las variables consideradas, se establece la toma de mediciones en un periodo determinado con una frecuencia de muestreo dado. Según la Norma ambiental de la calidad del aire define límites para mediciones de contaminantes en periodos de un año y 24 horas, bajo esta premisa se consideran que se pueden realizar entre 5 y 48 mediciones al día como se postula en los trabajos realizados por (Medina & Ortega, 2013) y (Martinez Garcia & Lopez Serrano, 2013) respectivamente.

Se menciona que el número de mediciones mínimas en un periodo de 24 horas es de 5 mediciones y el recomendable se estima un total de 48 mediciones; con respecto a la tecnología el máximo número de mensajes enviados en un periodo de 24 horas de acuerdo al plan de suscripción obtenido por el dispositivo de SigFox se determina de la siguiente manera:

60 minutos en una hora

24 horas en un día

El tiempo en minutos por día corresponde a 1440 minutos

140 mensajes disponibles al día

$$Tiempo\ de\ muestreo = \frac{1440\ minutos}{140\ mensajes} = 10.28\ aproximando\ 11\ \frac{minutos}{mensaje}$$

Con el uso de la técnica de muestreo puntual como lo señala (Crespo, 2008), se toman muestras individuales en un periodo corto de tiempo entre 1 hora a 5 horas, de esta manera se escoge un periodo de 5 horas y para la obtención de 48 mediciones como lo indica (Martinez Garcia & Lopez Serrano, 2013) se establece el siguiente tiempo de muestreo:

60 minutos en una hora

5 horas en un día

El tiempo en minutos por día corresponde a 1440 minutos

$$Tiempo\ de\ muestreo = \frac{300\ minutos}{48\ mensajes} = 6.25\ \frac{minutos}{mensaje}$$

4.2.3 Despliegue de la red de sensores

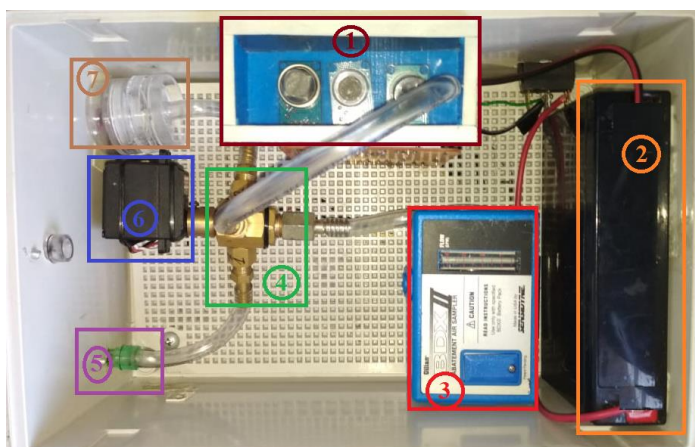
Los escenarios planteados para la medición de niveles de contaminación se han definido de dos maneras de forma que se obtengan mediciones en exteriores y en interiores. Según (Ambiental, 2005) se define una escala de estudio en la implementación en interiores a micro-escala la cual comprende distancias desde algunos metros hasta 100 metros y en media escala en la implementación en exteriores que comprende distancias de 100 metros a 0.5 km.

4.2.3.1 Despliegue en exteriores

El despliegue en exteriores se ha definido ubicar ambas estaciones en el anillo vial de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE en el reductor de velocidad cercano a la Biblioteca Alejandro Segovia. Para la implementación se validó que los componentes se encuentren dentro de una caja herméticamente sellada con el fin de precautelar el funcionamiento del dispositivo.

Figura 57

Disposición de los elementos. (Muestreador activo)



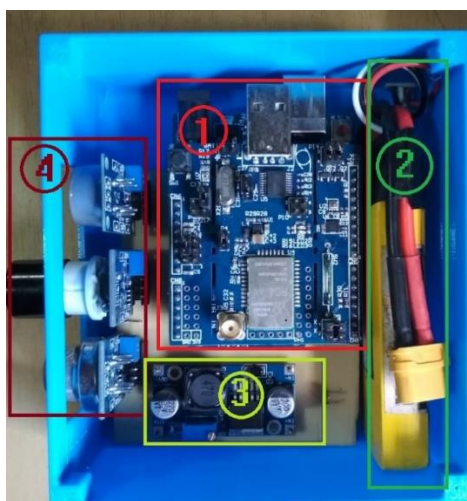
Nota. En la Figura 57 se muestran los elementos que componen el muestreador activo.

Elementos del muestreador activo

1. Cámara de medición y sensores MQ 131, MQ 135, MQ 7
2. Batería de 6V a 7.5Ah
3. Bomba de muestreo de aire
4. Válvula de 4 vías
5. Salida del aire
6. Servomotor de control
7. Entrada del aire y filtro

Figura 58

Disposición de los elementos. (Muestreador pasivo)

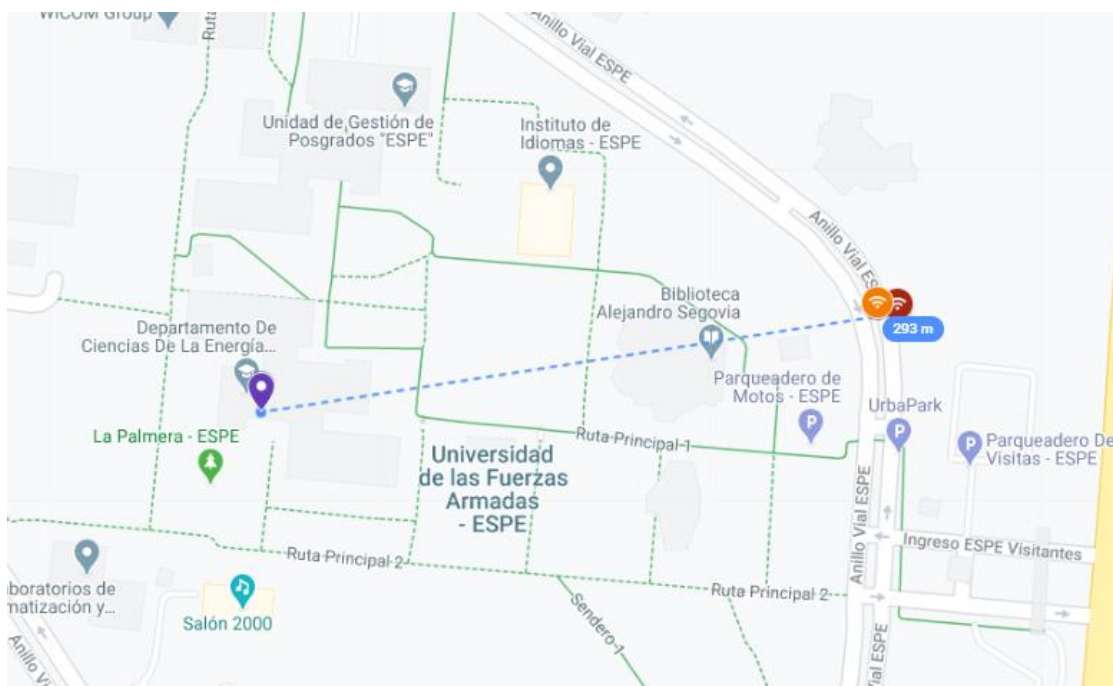


Nota. En la Figura 58 se muestran los elementos que componen el muestreador pasivo.

1. Placa de comunicación SigFox
2. Batería de 7.5 V a 2200Ah
3. Convertidor Step - Down
4. Sensores MQ 131, MQ 135, MQ 7

Figura 59

Disposición de los nodos de medición



Nota. En la Figura 59 se muestra la ubicación de ambas estaciones ambientales tanto como muestreador activo (con icono en color rojo) y muestreador pasivo (con icono en tomate), se visualiza la estación base (con icono en color morado) conocida más cercana que se encuentra en la terraza del bloque central dentro de las inmediaciones de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, en adición se obtiene la distancia de 293m aproximadamente entre la estación base y las estaciones desplegadas. El objetivo de ubicar ambas estaciones en el mismo punto es comprobar si existe diferencia entre ambos métodos de medición.

Figura 60*Despliegue de los nodos de medición*

Nota. En la Figura 60 se muestra el despliegue de los nodos de monitorización en el campus universitario.

Tabla 16*Criterio de altura de la estación de medición*

Altura de la toma de muestra	Tipo de estudio
1.5 a 2.5 m	Estudio epidemiológico o de tráfico vehicular
1.5 a 5 m o hasta 8 m	Estudios de calidad de aire de fuentes fijas
10 m	Determinación de parámetros meteorológicos

Nota. El criterio con respecto a la altura para la toma de muestras se presenta en la Tabla 16, se ha escogido una altura de 1.5m debido al tipo de estudio planteado. Tomado de *Caliba ORG, 2020*.

4.2.3.2 Despliegue en interiores

Debido a la emergencia sanitaria presentada en la fecha de implementación del proyecto en cuestión, se desplegó la red de sensores dentro de un domicilio ubicado en el Sur de Quito. Ambos dispositivos se situaron de tal manera que se vean sometidos al mismo ambiente con el objetivo de analizar la diferencia de valores obtenidos entre ambos dispositivos.

Figura 61

Ubicación de los nodos de medición - despliegue en interiores



Nota. En la Figura 61 se muestra la dirección (en verde) en la cual ambos dispositivos fueron desplegados, con lo cual en adición se pudo obtener datos de calidad de señal recibida en este sector en específico. En este caso debido a que la información de las estaciones base es propietaria SigFox se omite el reconocimiento de este detalle.

Figura 62

Despliegue de nodos en interiores



Nota. En la Figura 62 se muestra como se colocaron las estaciones de medición.

CAPÍTULO V

Análisis de Resultados

5.1 Resultados Obtenidos

Las pruebas se realizaron durante 2 días diferentes, en las cuales se recolectaron las muestras del aire, para lo cual se estableció un tiempo de muestreo de 6.2 minutos durante un periodo de 5 horas con lo que se llega a obtener un total de 48 mediciones recomendadas por (Martinez Garcia & Lopez Serrano, 2013).

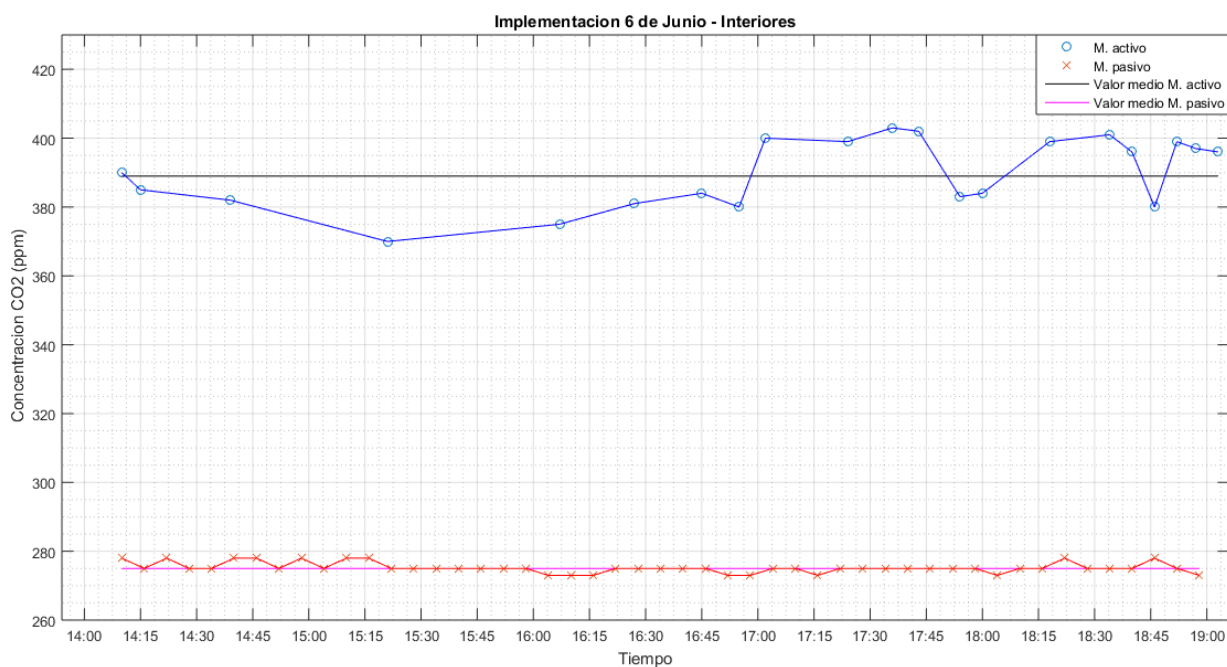
5.1.1 Resultados obtenidos en interiores

Las mediciones planteadas para el análisis en interiores se fijaron en dos horarios, los cuales corresponden de 14:00 a 19:00 en el día 6 de Junio del 2020 y de 9:00 a 14:00 el día 7 de Junio del 2020. De esta manera cada gráfica presentada muestra el valor promedio, el valor máximo, el valor mínimo y la desviación estándar presentada en ese conjunto de datos obtenidos, tal como lo indica (Flores & Maza, 2018). A continuación se presentan las mediciones obtenidas correspondientes a CO_2 , NO_2 , CO , $RSSI$, SNR y a las estaciones asociadas a cada mensaje recibido.

5.1.1.1 CO₂

Día 6 de Junio del 2020

Figura 63

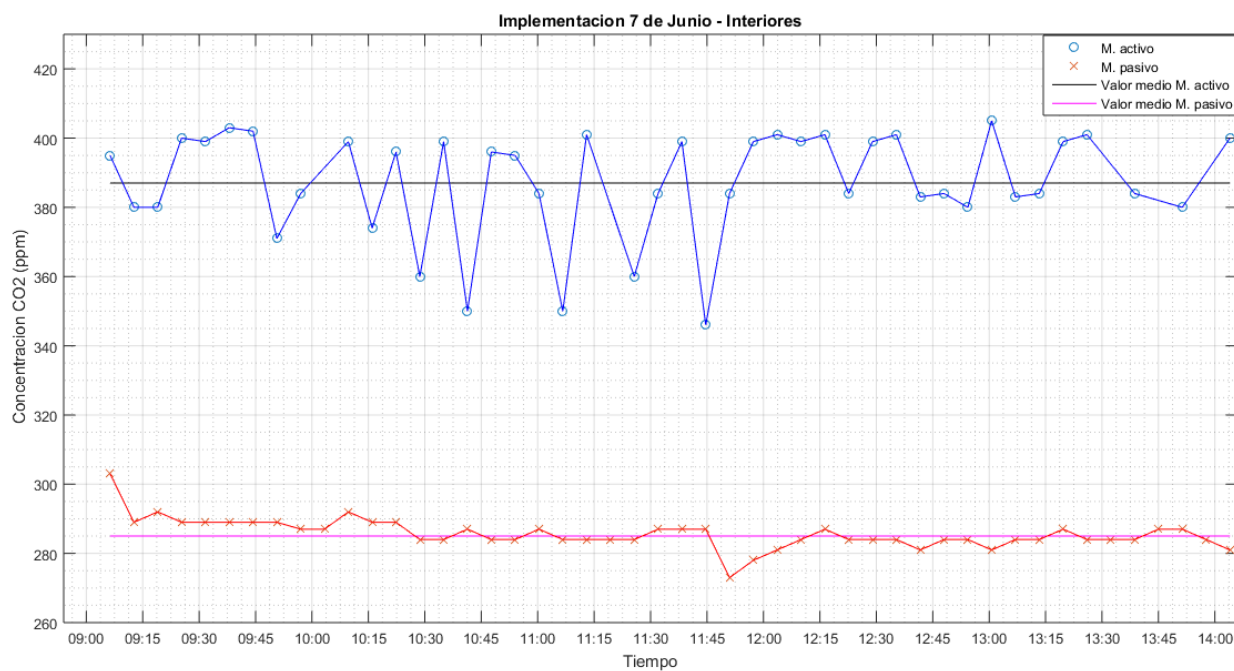
Mediciones de CO₂ obtenidas en interiores

Nota. En la Figura 63 se muestran las mediciones correspondientes a la concentración de CO₂ expresadas en ppm obtenidas del muestreador activo y pasivo colocados en interiores, el día 6 de Junio, en el muestreador activo se observa un valor medio (en color negro) de 389 y las mediciones se encuentran en un rango de 403 ppm como máximo y 370 ppm como mínimo; por otro lado en el muestreador pasivo se observa un valor medio (en color rosado) de 275 ppm y las mediciones se encuentran en un rango de 278 ppm como máximo y 273 ppm como mínimo.

Día 7 de Junio del 2020

Figura 64

Mediciones de CO_2 obtenidas en interiores

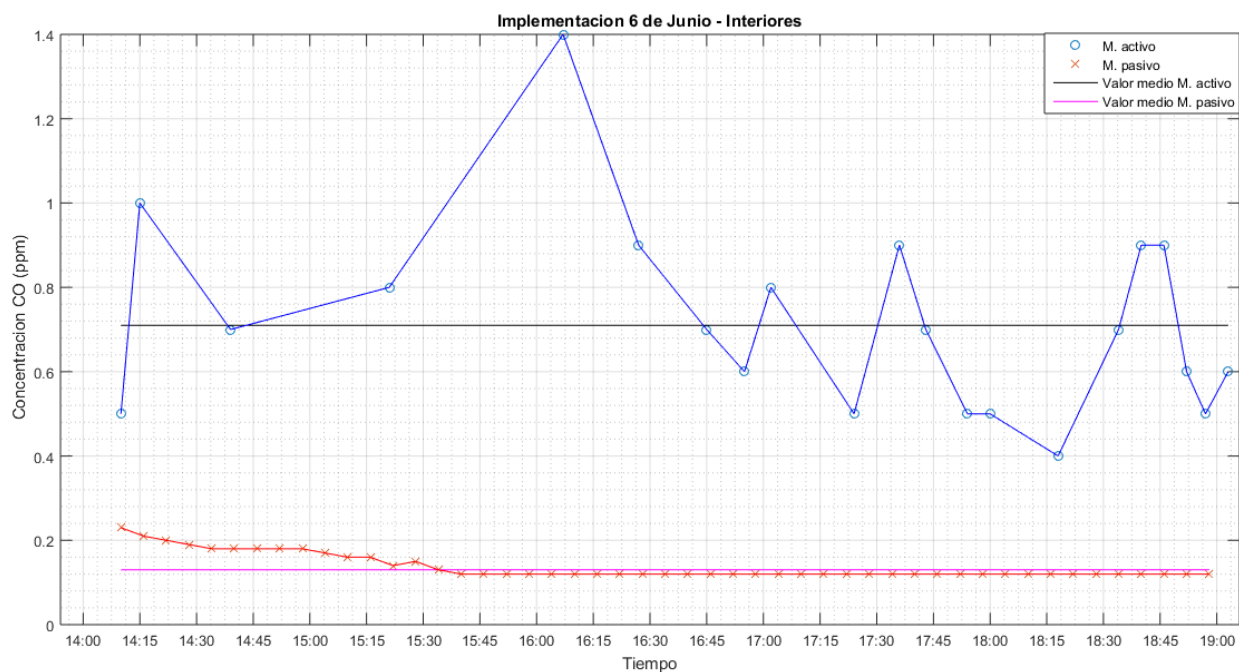


Nota. En la Figura 64 se muestran las mediciones correspondientes a la concentración de CO_2 expresadas en ppm obtenidas del muestreador activo y pasivo colocados en interiores, el día 7 de Junio; en el muestreador activo se observa un valor medio (en color negro) de 387 ppm y las mediciones se encuentran en un rango de 346 ppm como máximo y 405 ppm como mínimo, mientras que en el muestreador pasivo se observa un valor medio (en color rosado) de 285 ppm y las mediciones se encuentran en un rango de 303 ppm como máximo y 273 ppm como mínimo.

5.1.1.2 CO

Día 6 de Junio del 2020

Figura 65

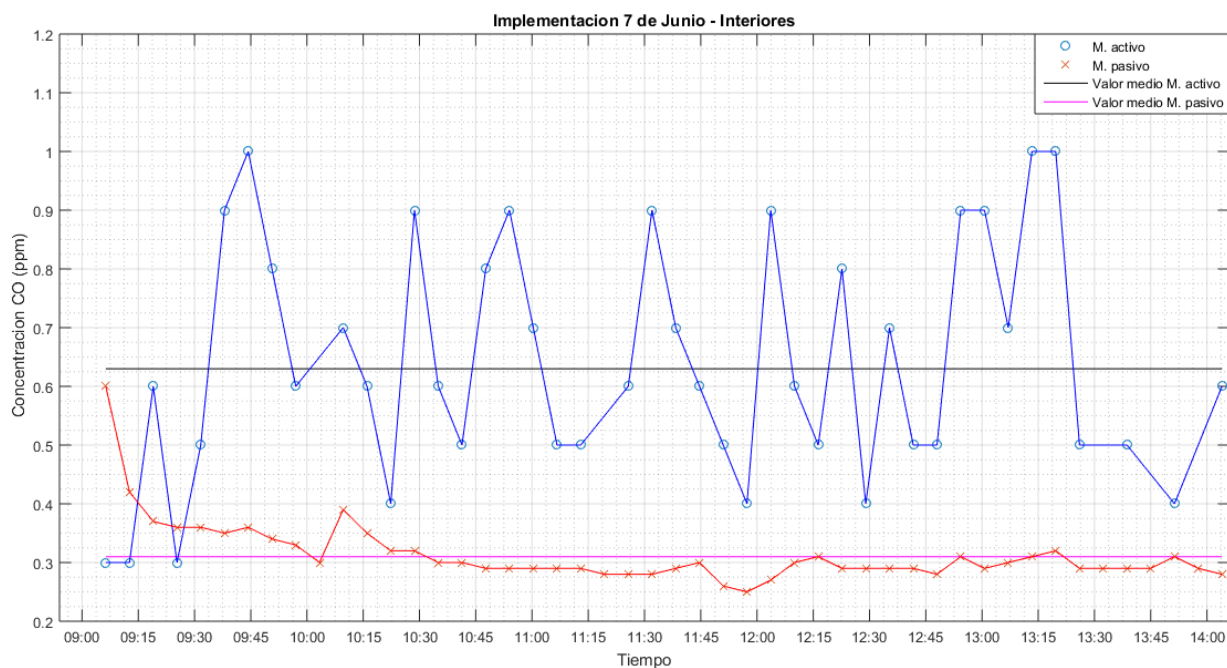
Mediciones de CO obtenidas en interiores

Nota. En la Figura 65 se muestran las mediciones correspondientes a la concentración de CO expresadas en ppm obtenidas del muestreador activo y pasivo colocados en interiores, el día 6 de Junio; en el muestreador activo se observa un valor medio (en color negro) de 0.7 ppm y las mediciones se encuentran en un rango de 1.4 ppm como máximo y 0.4 ppm mientras que el muestreador pasivo se observa un valor medio (en color rosado) de 0.17 ppm y las mediciones se encuentran en un rango de 0.25 ppm como máximo y 0.1 ppm como mínimo.

Día 7 de Junio del 2020

Figura 66

Mediciones de CO obtenidas en interiores



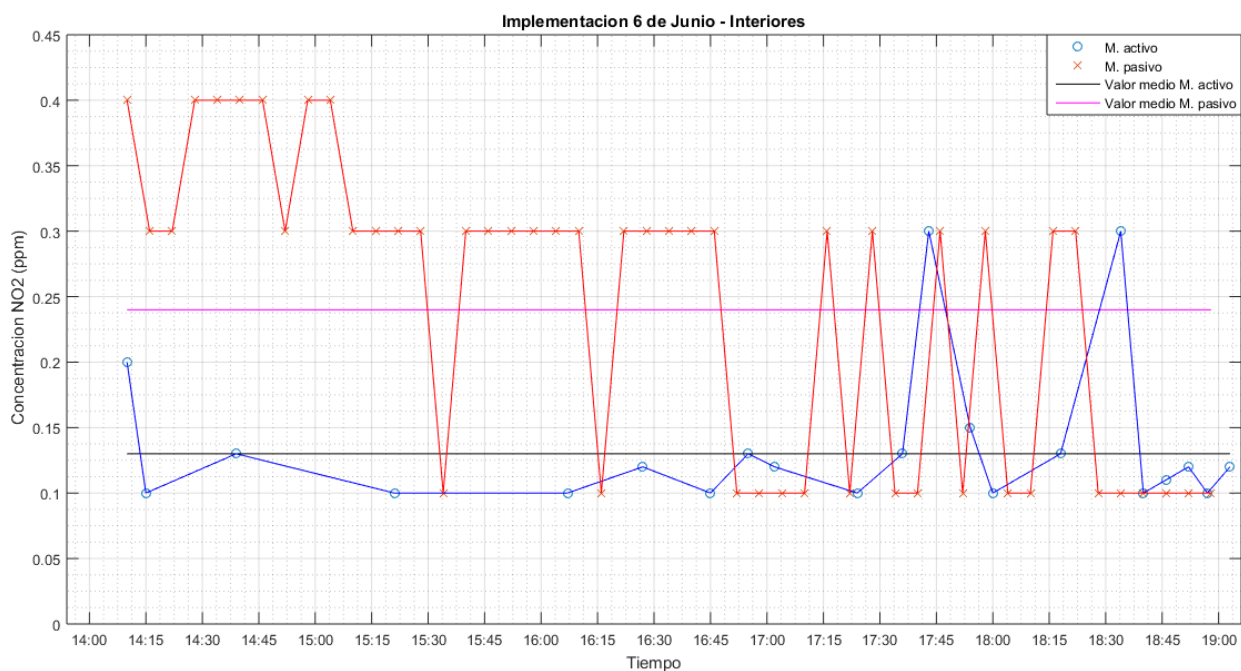
Nota. En la Figura 66 se muestran las mediciones correspondientes a la concentración de CO expresadas en ppm obtenidas del muestreador activo y pasivo colocado en interiores, el día 7 de Junio; para el muestreador activo se observa un valor medio (en color negro) de 0.6 ppm y las mediciones se encuentran en un rango de 1 ppm como máximo y 0.1 ppm como mínimo, mientras para el muestreador pasivo se observa un valor medio (en color rosado) de 0.31 ppm y las mediciones se encuentran en un rango de 0.6 ppm como máximo y 0.25 ppm como mínimo.

5.1.1.3 NO₂

Día 6 de Junio del 2020

Figura 67

Mediciones de NO₂ obtenidas en interiores

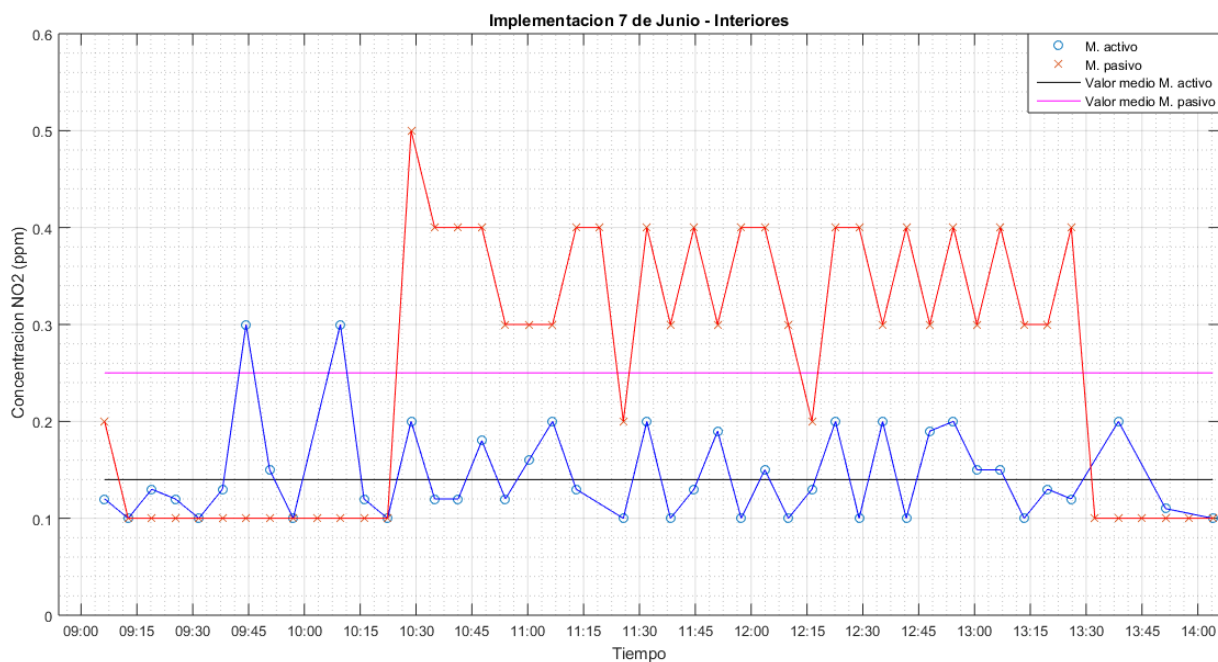


Nota. En la Figura 67 se muestran las mediciones correspondientes a la concentración de NO₂ expresadas en ppm obtenidas del muestreador activo y pasivo colocados en interiores, el día 6 de Junio; para el muestreador activo se observa un valor medio (en color negro) de 0.13 ppm y las mediciones se encuentran en un rango de 0.3 ppm como máximo y 0.1 ppm como mínimo, mientras el muestreador pasivo se observa un valor medio (en color rosado) de 0.24 ppm y las mediciones se encuentran en un rango de 0.4 ppm como máximo y 0.1 ppm como mínimo.

Día 7 de Junio del 2020

Figura 68

Mediciones de NO_2 obtenidas en interiores



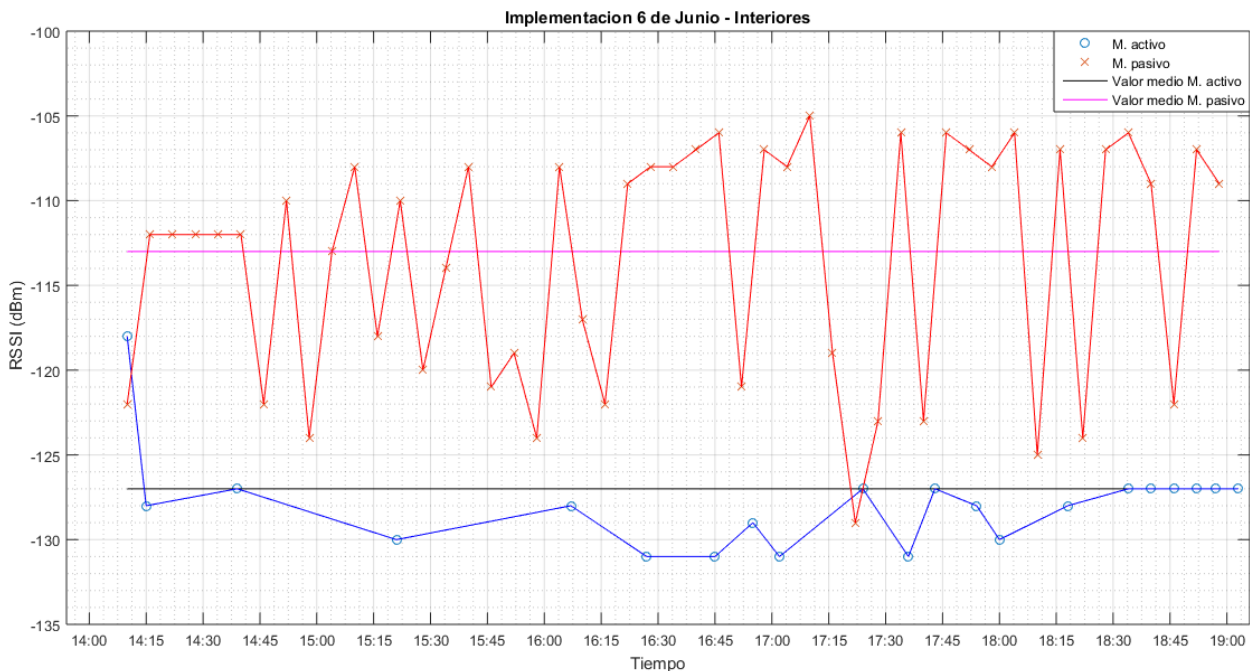
Nota. En la Figura 68 se muestran las mediciones correspondientes a la concentración de NO_2 expresadas en ppm obtenidas del muestreador activo y pasivo colocado en interiores, el día 7 de Junio, para el muestreador activo se observa un valor medio (en color negro) de 0.14 ppm y las mediciones se encuentran en un rango de 0.3 ppm como máximo y 0.1 ppm como mínimo, mientras que el muestreador pasivo se observa un valor medio (en color rosado) de 0.25 ppm y las mediciones se encuentran en un rango de 0.5 ppm como máximo y 0.1 ppm como mínimo.

5.1.1.4 RSSI

Día 6 de Junio del 2020

Figura 69

Mediciones de RSSI obtenidas en interiores

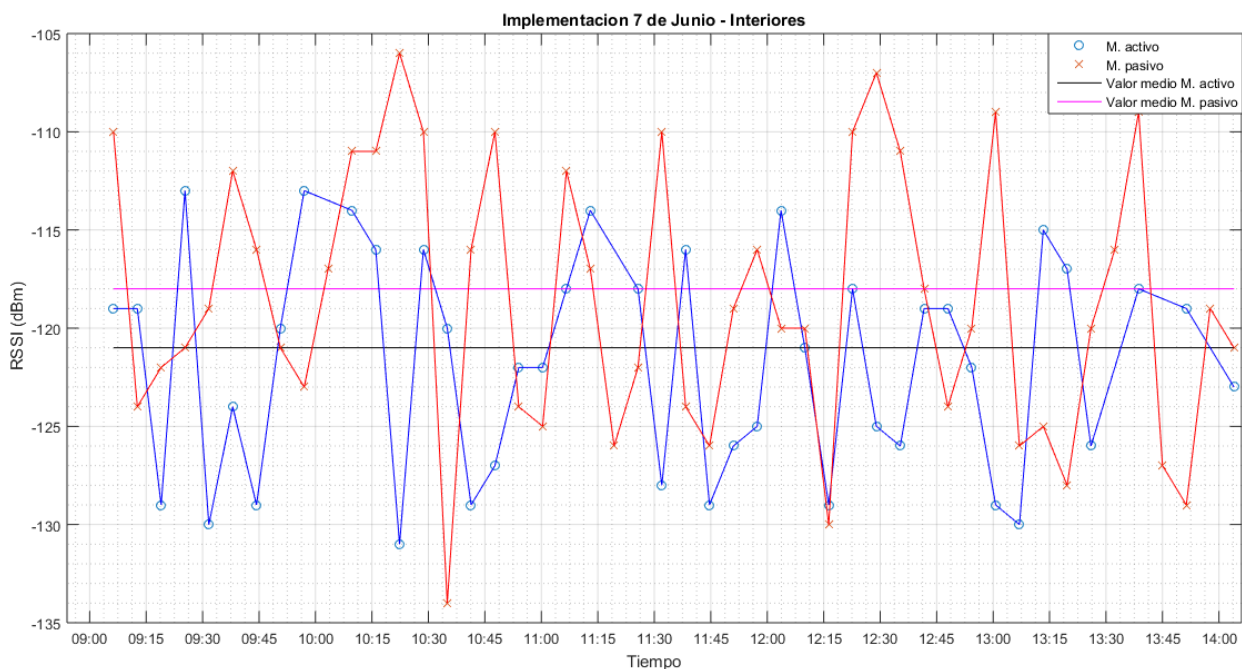


Nota. En la Figura 69 se muestran las mediciones correspondientes al RSSI expresadas en dBm obtenidas del muestreador activo y pasivo colocados en interiores, el día 6 de Junio; para el muestreador activo se observa un valor medio (en color anaranjado) de -129 dBm y las mediciones se encuentran en un rango de -131 dBm como máximo y -126 dBm como mínimo, mientras que para el muestreador pasivo se observa un valor medio (en color rosado) de -114 dBm y las mediciones se encuentran en un rango de -129 dBm como máximo y -105 dBm como mínimo.

Día 7 de Junio del 2020

Figura 70

Mediciones de RSSI obtenidas en interiores



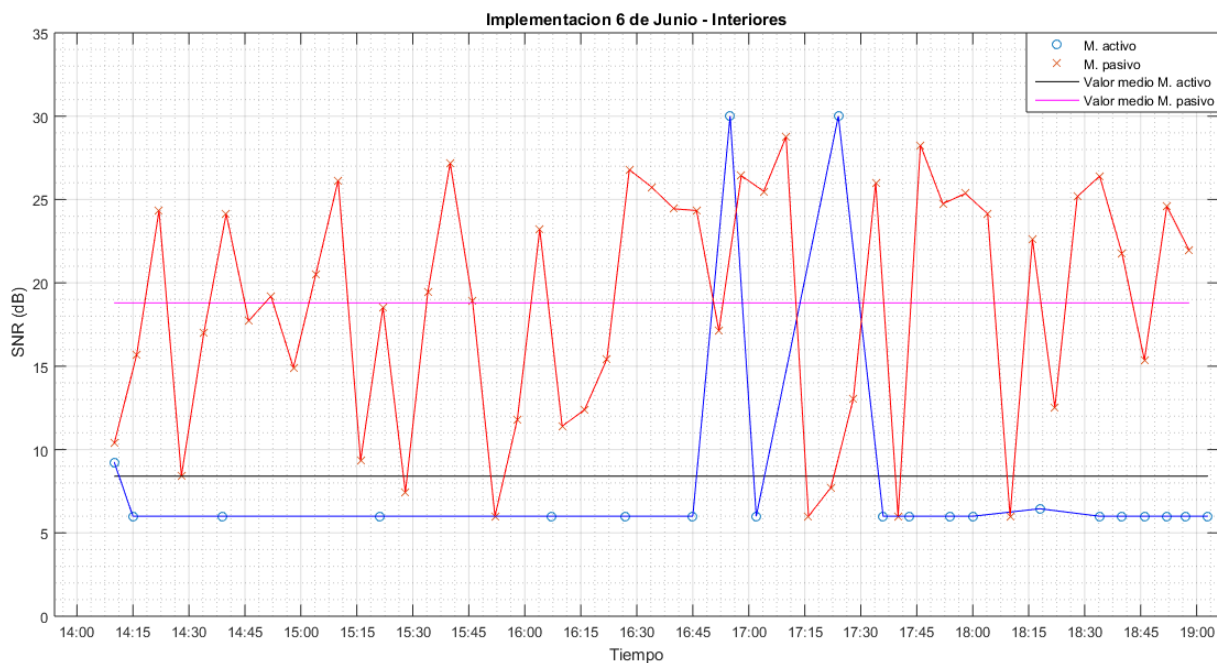
Nota. En la Figura 70 se muestran las mediciones correspondientes al RSSI expresadas en dBm obtenidas del muestreador activo y pasivo colocado en interiores, el día 7 de Junio; para el muestreador activo se observa un valor medio (en color negro) de -122.12 dBm y las mediciones se encuentran en un rango de -130 dBm como máximo y -113 dBm como mínimo, mientras que para el muestreador pasivo, se observa un valor medio (en color anaranjado) de -118 dBm, las mediciones se encuentran en un rango de -106 dBm como máximo y -134 dBm como mínimo.

5.1.1.5 SNR

Día 6 de Junio del 2020

Figura 71

Mediciones de SNR obtenidas en interiores

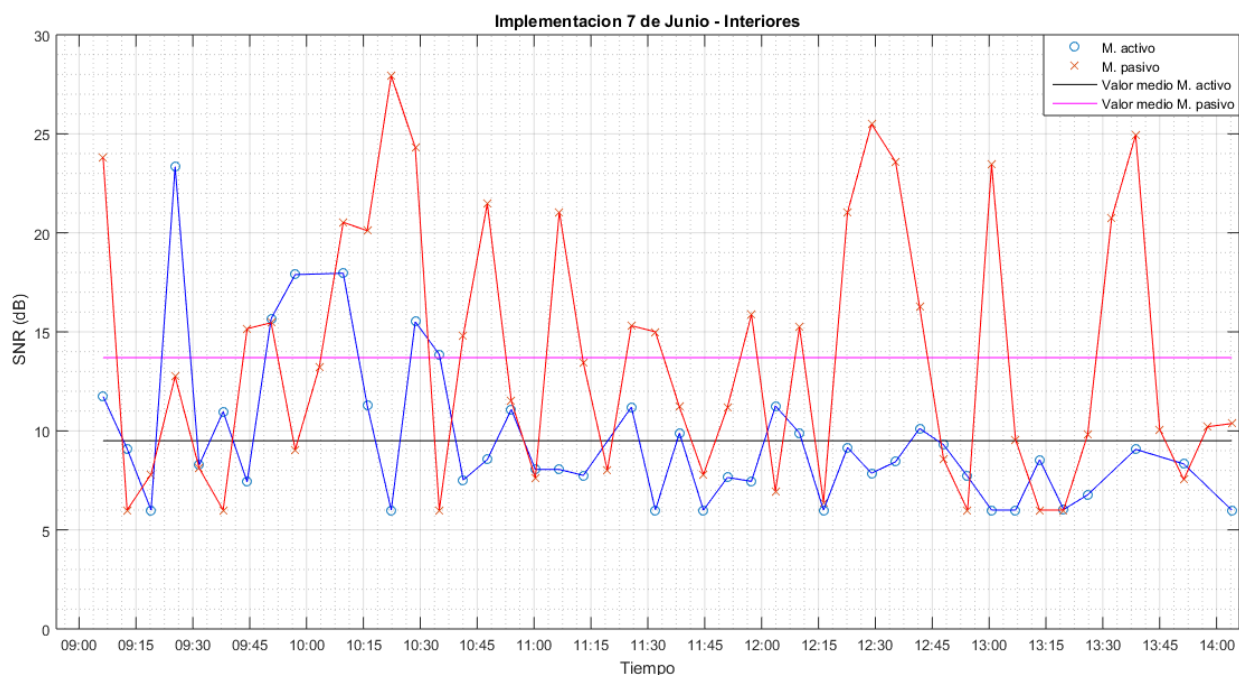


Nota. En la Figura 71 se muestran las mediciones correspondientes al SNR expresadas en dB obtenidas del muestreador activo y pasivo colocado en interiores el día 6 de Junio, para el muestreador activo se observa un valor medio (en color negro) de 8.4 dB y las mediciones se encuentran en un rango de 30 dB como máximo y 6 dB como mínimo, mientras en el muestreador pasivo se observa un valor medio (en color rosado) de 19 dB, las mediciones se encuentran en un rango de 18.76 dB como máximo y 6 dB como mínimo.

Día 7 de Junio del 2020

Figura 72

Mediciones de SNR obtenidas en interiores



Nota. En la Figura 72 se muestran las mediciones correspondientes al SNR expresadas en dB obtenidas del muestreador activo y pasivo colocados en interiores el día 7 de Junio, en el muestreador activo se observa un valor medio (en color negro) de 9.24 dB y las mediciones se encuentran en un rango de 23.24 dB como máximo y 6 dB como mínimo, mientras en el muestreador pasivo se observa un valor medio (en color rosado) de 13.72dB, las mediciones se encuentran en un rango de 27.93 dB como máximo y 6 dB como mínimo.

5.1.1.6 Estación

Día 6 de Junio del 2020 (muestreador activo)

Tabla 17

Estaciones reconocidas en la toma de mediciones

Estación	Número de mensajes
8D03	17
8FF3	5
Total	22

Nota. En la Tabla 17 se observan las estaciones en las cuales se transmitió cada mensaje, en la estación como muestreador activo, en esta tabla se muestra un total de 22 mensajes recibidos, por lo que se obtiene 54.16 % de mensajes perdidos.

Día 6 de Junio del 2020 (muestreador pasivo)

Tabla 18

Estaciones reconocidas en la toma de mediciones

Estación	Número de mensajes
8D03	16
8DE3	13
8FF3	12
8DE5	4
8F40	3
Total	48

Nota. En la Tabla 18 se observan las estaciones en las cuales se transmitió cada mensaje, en la estación como muestreador pasivo, en esta tabla se muestra un total de 48 mensajes recibidos de 5 estaciones diferentes con su respectiva distribución.

Día 7 de Junio del 2020 (muestreador activo)

Tabla 19

Estaciones reconocidas en la toma de mediciones

Estación	Número de mensajes
8D03	27
8DE3	14
79D8	2
8FF3	1
Total	44

Nota. En la Tabla 19 se muestran las estaciones reconocidas por el muestreador activo en la toma de mediciones, se muestra que predomina la estación 8D03 con 27 mensajes mientras que las estaciones 79D8 y 8FF3 muestra 2 y 1 mensaje respectivamente.

Día 7 de Junio del 2020 (muestreador pasivo)

Tabla 20

Estaciones reconocidas en la toma de mediciones

Estación	Número de mensajes
8D03	16
8DE3	13
8FF3	12
8DE5	4
8F40	3
Total	48

Nota. En la Tabla 20 se muestran las estaciones reconocidas por el muestreador pasivo en la toma de mediciones, en este caso en el muestreador pasivo se reconoce una estación adicional 8DE5 que registra 4 mediciones obtenidas de la estación base.

5.2.2 Resultados obtenidos en exteriores

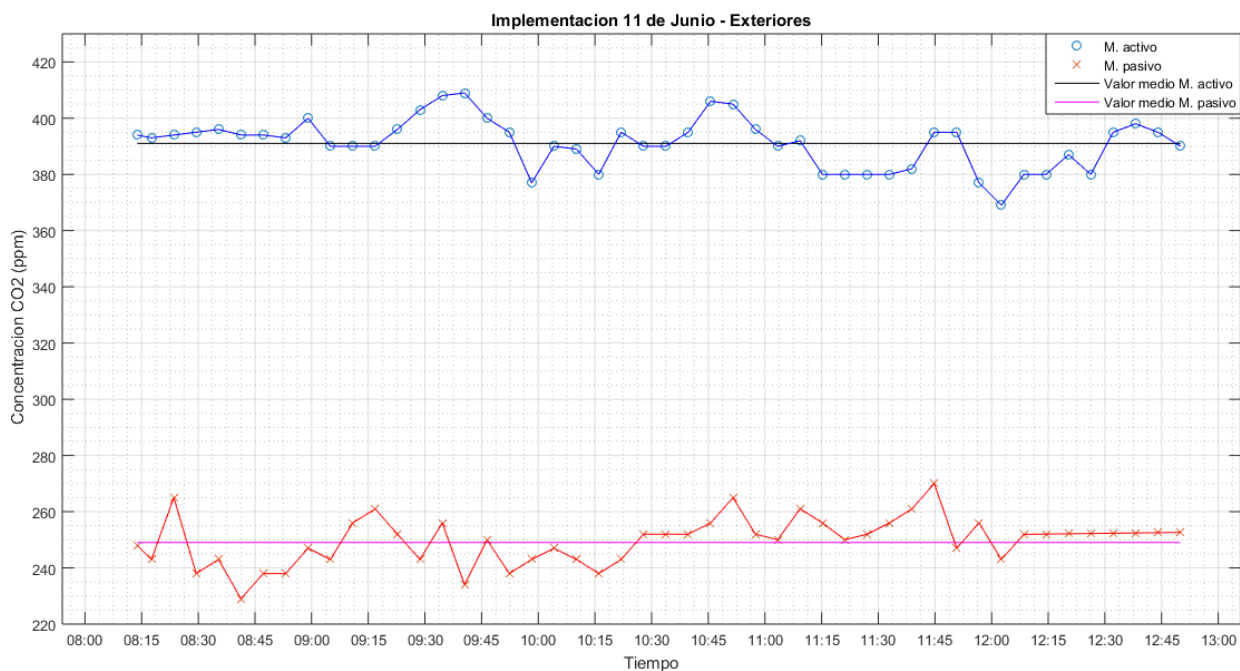
La implementación realizada en exteriores se llevó a cabo en el campus de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, debido a la emergencia sanitaria presentada en el país en las fechas de implementación se solicitó el acceso al campus los días 11 de Junio del 2020 y 19 de Junio de 2020, en un horario de 8:00 a 13:00 y 9:00 a 14:00 respectivamente.

5.2.2.1 CO₂

Día 11 de Junio del 2020

Figura 73

Mediciones de CO₂ obtenidas en exteriores



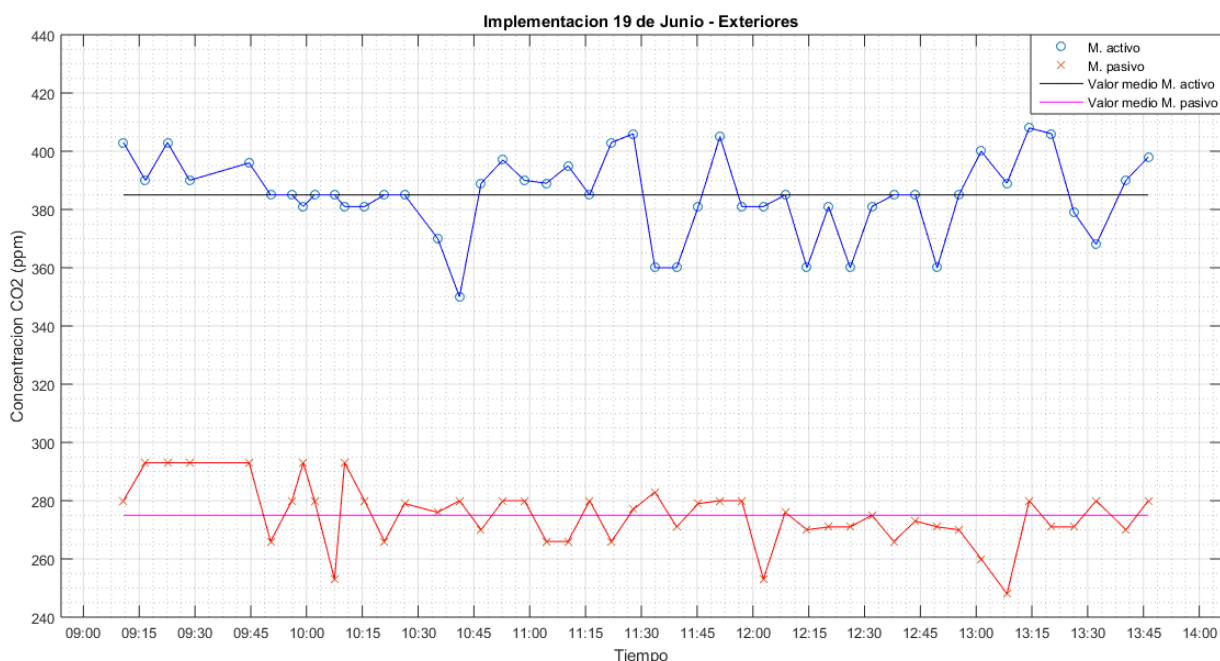
Nota. En la Figura 73 se muestran las mediciones correspondientes a la concentración de CO₂ en ppm obtenidas del muestreador activo y pasivo colocado en exteriores el día 11 de Junio, para el muestreador activo se observa un valor medio (en color negro) de 391 ppm y las mediciones se encuentran en un rango de 409 ppm como máximo y 369 ppm como mínimo, mientras para el

muestreador pasivo se observa un valor medio (en color rosado) de 249 ppm y las mediciones se encuentran en un rango de 270 ppm como máximo y 229 ppm como mínimo.

Día 19 de Junio del 2020

Figura 74

Mediciones de CO₂ obtenidas en exteriores



Nota. En la Figura 74 se muestran las mediciones correspondientes a la concentración de CO₂ en ppm obtenidas del muestreador activo y pasivo colocados en exteriores el día 19 de Junio, para el muestreador activo se observa un valor medio (en color negro) de 385 ppm y las mediciones se encuentran en un rango de 408 ppm como máximo y 350 ppm como mínimo, mientras que el muestreador pasivo se observa un valor medio (en color rosado) de 275 ppm y las mediciones se encuentran en un rango de 293 ppm como máximo y 248 ppm como mínimo.

5.2.2.2 CO

Día 11 de Junio del 2020

Figura 75

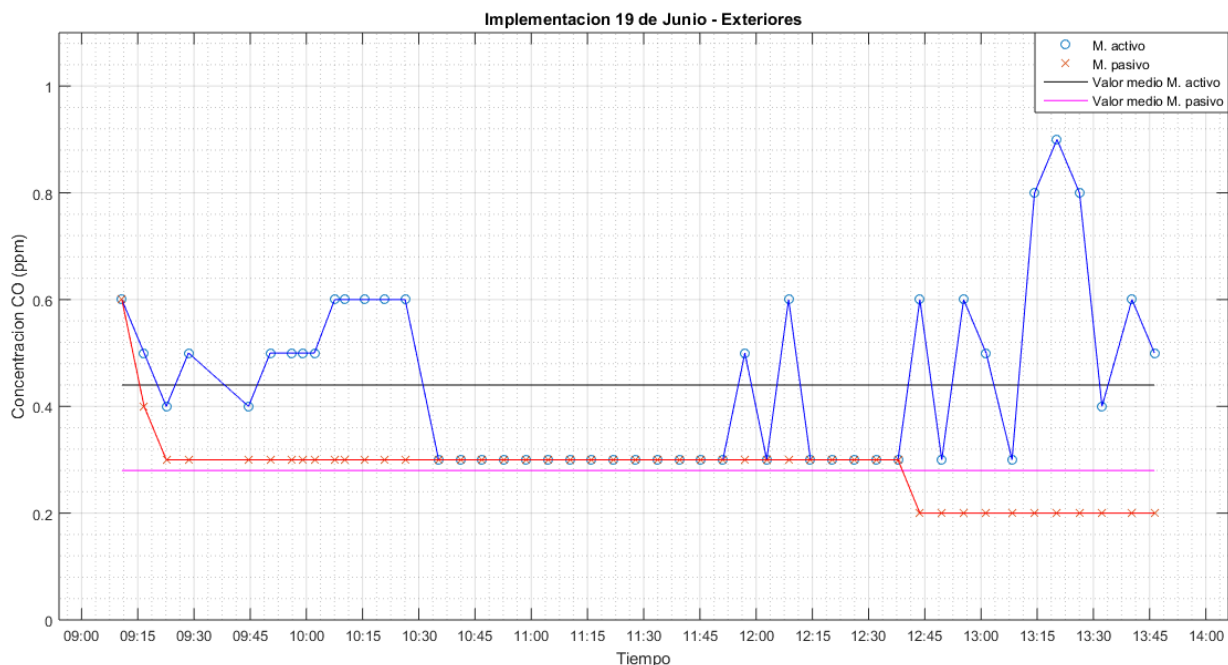
Mediciones de CO obtenidas en exteriores

Nota. En la Figura 75 se muestran las mediciones correspondientes a la concentración de CO en ppm obtenidas del muestreador activo y pasivo colocado en exteriores el día 11 de Junio, para el muestreador activo se observa un valor medio (en color negro) de 0.7 ppm y las mediciones se encuentran en un rango 1.5 ppm como máximo y 0.3 ppm como mínimo, mientras en el muestreador pasivo se observa un valor medio (en color anaranjado) de 0.21 ppm y las mediciones se encuentran en un rango 0.8 ppm como máximo y 0.1 ppm como mínimo.

Día 19 de Junio

Figura 76

Mediciones de CO obtenidas en exteriores



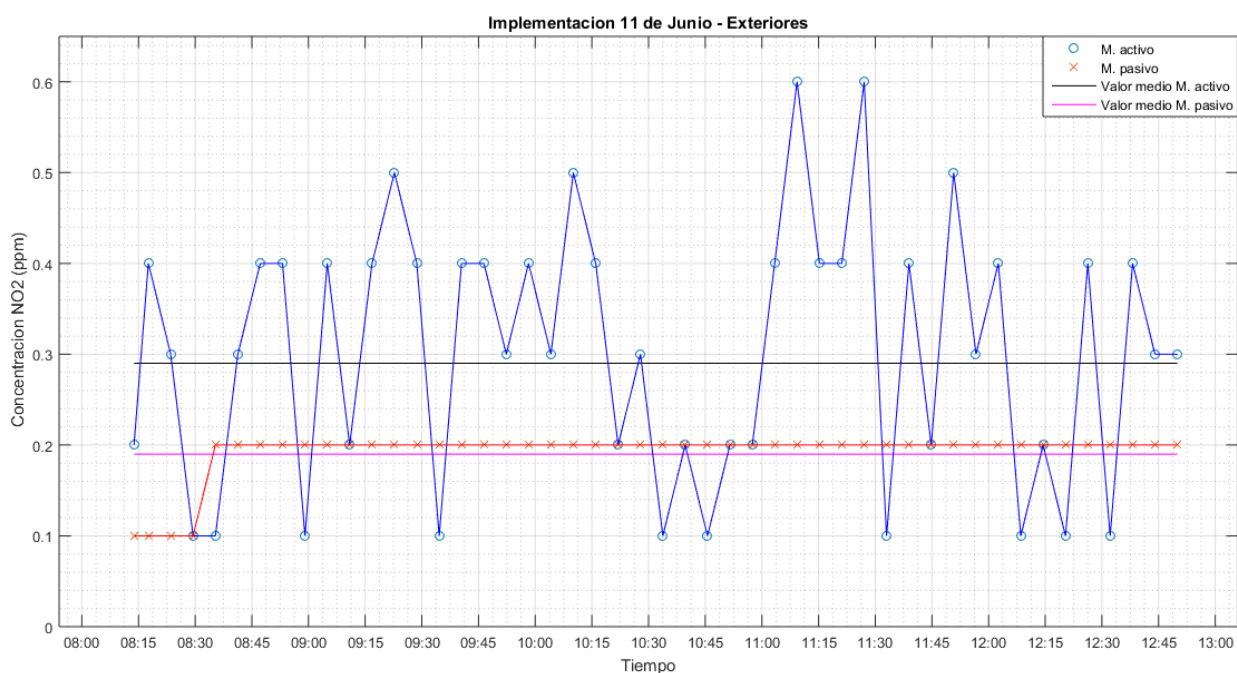
Nota. En la Figura 76 se muestran las mediciones correspondientes a la concentración de CO en ppm obtenidas del muestreador activo y pasivo colocados en exteriores el día 19 de Junio, en el muestreador activo se observa un valor medio (en color negro) de 0.44 ppm y las mediciones se encuentran en un rango 0.9 ppm como máximo y 0.3 ppm como mínimo, mientras que en el muestreador pasivo se observa un valor medio (en color rosado) de 0.28 ppm y las mediciones se encuentran en un rango 0.6 ppm como máximo y 0.2 ppm como mínimo.

5.2.2.3 NO₂

Día 11 de Junio del 2020

Figura 77

Mediciones de NO₂ obtenidas en exteriores

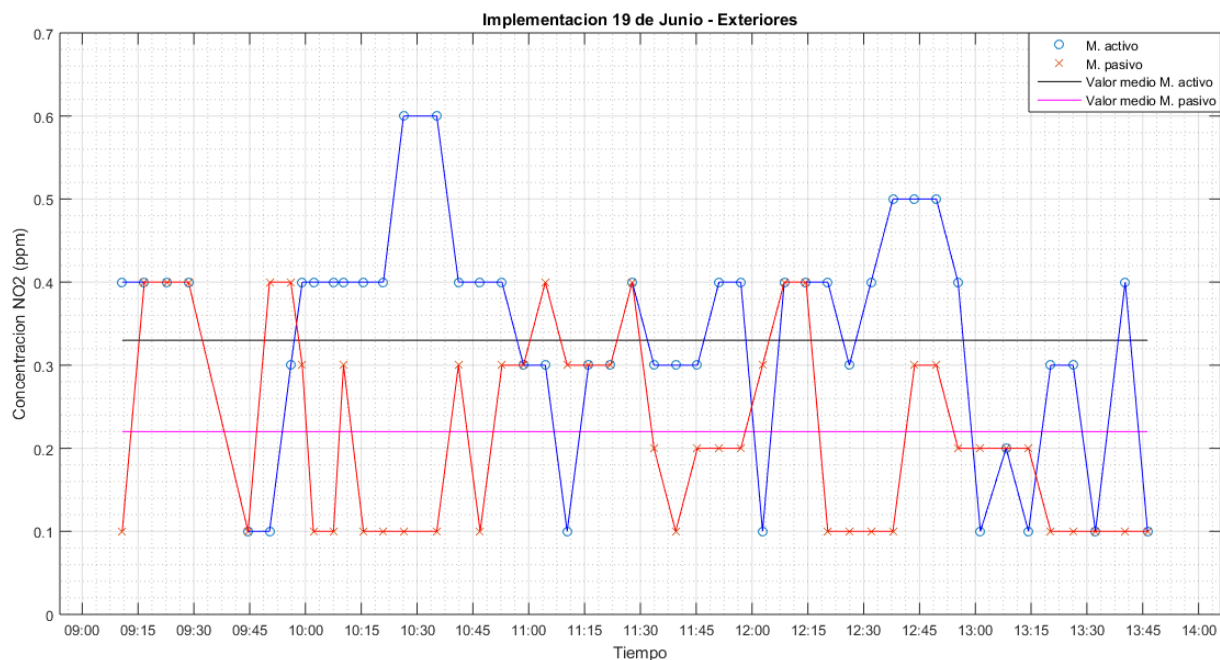


Nota. En la Figura 77 se muestran las mediciones correspondientes a la concentración de NO₂ en ppm obtenidas del muestreador activo y pasivo colocados en exteriores el día 11 de Junio, para el muestreador activo se observa un valor medio (en color negro) de 0.29 ppm y las mediciones se encuentran en un rango 0.6 ppm como máximo y 0.1 ppm como mínimo, mientras que en el muestreador pasivo se observa un valor medio (en color rosado) de 0.19 ppm y las mediciones se encuentran en un rango 0.2 ppm como máximo y 0.1 ppm como mínimo.

Día 19 de Junio del 2020

Figura 78

Mediciones de NO_2 obtenidas en exteriores



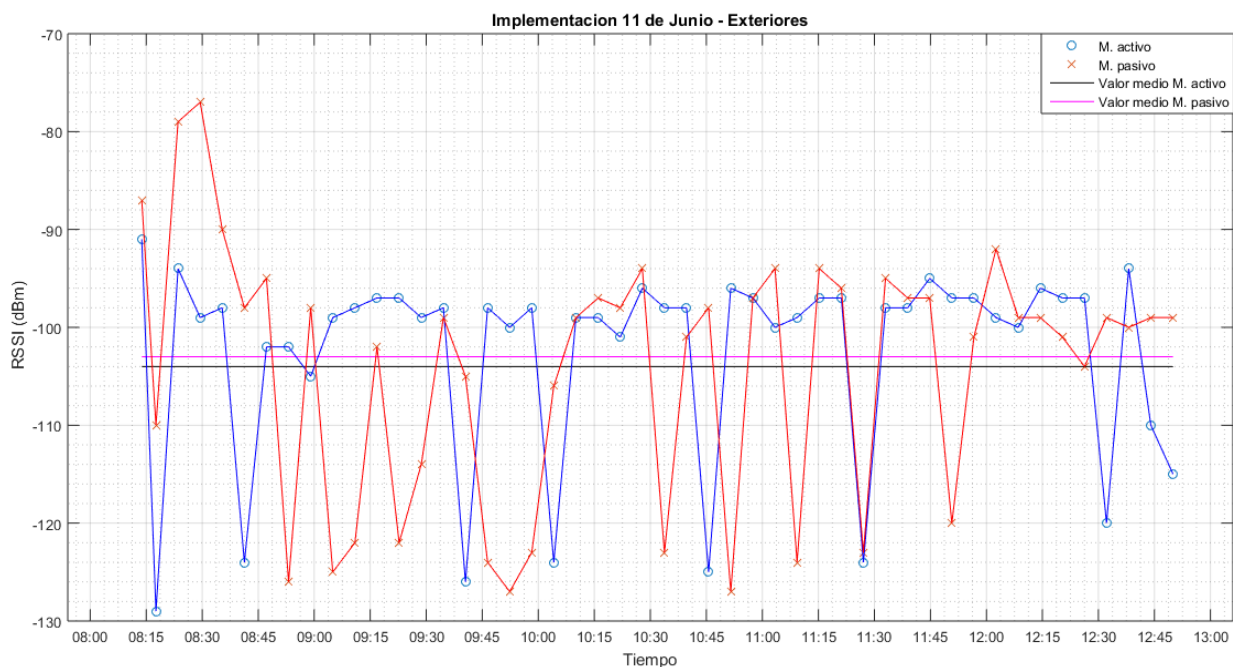
Nota. En la Figura 78 se muestran las mediciones correspondientes a la concentración de NO_2 en ppm obtenidas del muestreador activo y pasivo colocados en exteriores el día 19 de Junio, para el muestreador activo se observa un valor medio (en color negro) de 0.34 ppm y las mediciones se encuentran en un rango 0.6 ppm como máximo y 0.1 ppm, mientras que el muestreador pasivo se observa un valor medio (en color rosado) de 0.21 ppm y las mediciones se encuentran en un rango 0.4 ppm como máximo y 0.1 ppm como mínimo.

5.2.2.4 RSSI

Día 11 de Junio del 2020

Figura 79

Mediciones de RSSI obtenidas en exteriores

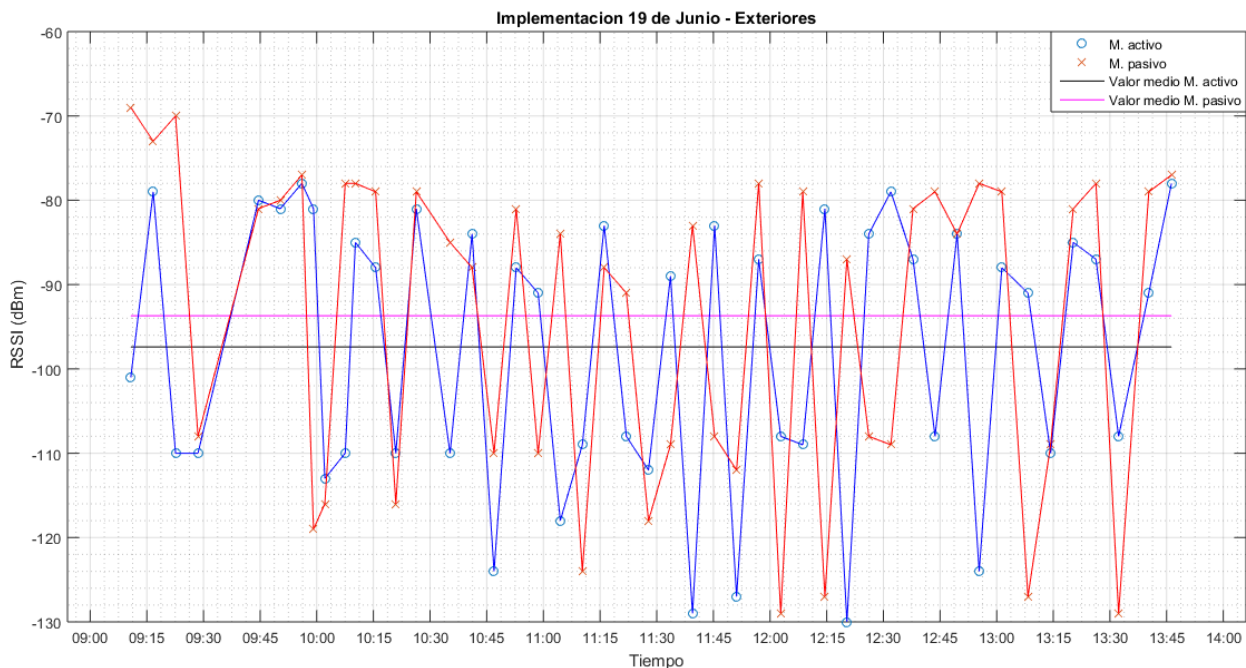


Nota. En la Figura 79 se muestran las mediciones correspondientes a RSSI en dBm obtenidas del muestreador activo y pasivo colocados en exteriores el día 11 de Junio, para el muestreador activo se observa un valor medio (en color negro) de -103 dBm y las mediciones se encuentran en un rango -90 dBm como máximo y -129 dBm como mínimo, mientras que en el muestreador pasivo se observa un valor medio (en color rosado) de -104 dBm y las mediciones se encuentran en un rango -77 dBm como máximo y -127 dBm como mínimo.

Día 19 de Junio del 2020

Figura 80

Mediciones de RSSI obtenidas en exteriores



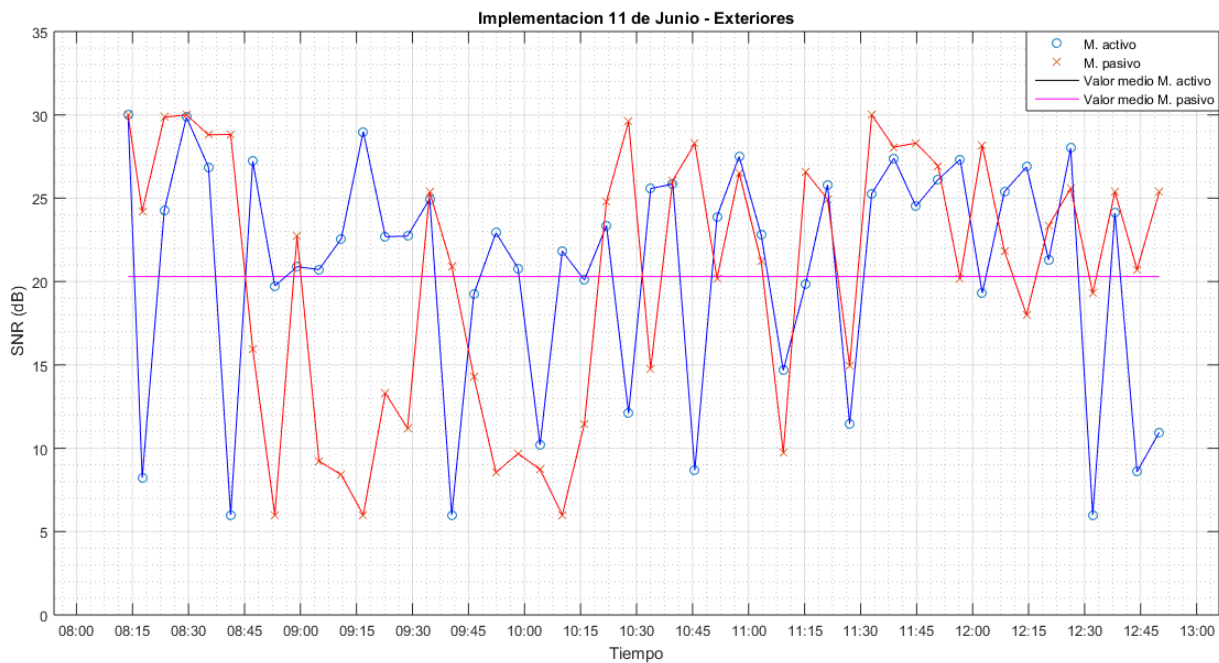
Nota. En la Figura 80 se muestran las mediciones correspondientes a RSSI en dBm obtenidas del muestreador activo y pasivo colocados en exteriores el día 19 de Junio, en el muestreador activo se observa un valor medio (en color negro) de -98.3 dBm y las mediciones se encuentran en un rango -69 dBm como máximo y -129 dBm como mínimo, mientras en el muestreador pasivo se observa un valor medio (en color rosado) de -93.4 dBm y las mediciones se encuentran en un rango -78 dBm como máximo y -130 dBm como mínimo.

5.2.2.5 SNR

Día 11 de Junio del 2020

Figura 81

Mediciones de SNR obtenidas en exteriores

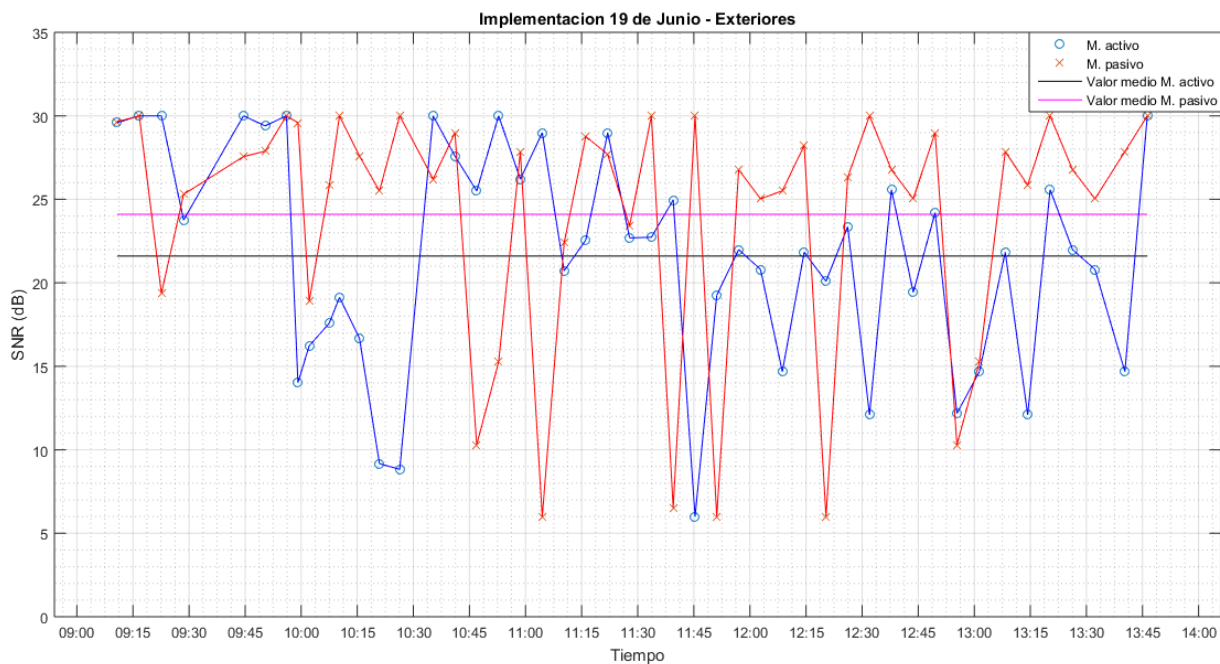


Nota. En la Figura 81 se muestran las mediciones correspondientes a SNR en dB obtenidas del muestreador activo y pasivo colocados en exteriores el día 11 de Junio, para el muestreador activo se observa un valor medio (en color negro) de 20.3 dB y las mediciones se encuentran en un rango 6 dB como mínimo y 30 dB como máximo, mientras que en el muestreador pasivo se observa un valor medio (en color rosado) de 20.36 dB, las mediciones se encuentran en un rango 6 dB como mínimo y 30 dB como máximo.

Día 19 de Junio del 2020

Figura 82

Mediciones de SNR obtenidas en exteriores



Nota. En la Figura 82 se muestra las mediciones correspondientes a SNR en dB obtenidas del muestreador activo y pasivo colocados en exteriores el día 19 de Junio, en el muestreador activo se observa un valor medio (en color negro) de 21.96 dB y las mediciones se encuentran en un rango 6 dB como mínimo y 30dB como máximo, mientras que en el muestreador pasivo se observa un valor medio (en color rosado) de 24.1 dB, las mediciones se encuentran en un rango 6db como mínimo y 30dB como máximo.

5.2.2.6 Estación

Día 11 de Junio (muestreador activo)

Tabla 21

Estaciones reconocidas en la toma de mediciones m. activo

Estación	Número de mediciones
9141	38
913D	6
9133	3
Total	47

Nota. En la Tabla 21 se muestran las estaciones base a las cuales se ha conectado el nodo de monitorización como muestreador activo. En el muestreador activo se verifica que predomina la estación 9141 la que misma que se asume que es la estación base instalada en las instalaciones del campus de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE. En adición se puede observar que se tiene 1 mensaje perdido por lo que se esperaba 48 mediciones, lo que nos arroja un 2.09 % de paquetes perdidos.

Día 11 de Junio (muestreador pasivo)

Tabla 22

Estaciones reconocidas en la toma de mediciones m. pasivo

Estación	Número de mediciones
9141	28
913D	8
9133	7
91D0	5
Total	48

Nota. En la Tabla 22 se muestran las estaciones base a las cuales se han conectado el nodo de medición como muestreador pasivo. De la misma manera se tiene redundancia con la estación

base 9141 la misma que se presenta en Tabla 20. En adición en las mediciones obtenidas en el muestreador pasivo se verifica una estación adicional 91D0 de la cual se obtienen 5 mediciones.

Día 19 de Junio (muestreador activo)

Tabla 23

Estaciones reconocidas en la toma de mediciones en m. activo

Estación	Número de mensajes
9141	31
913D	7
9133	6
8F46	2
Total	46

Nota. En la Tabla 23 se muestra el número de mediciones obtenidas por cada una de las estaciones base, en esta ocasión se registra una pérdida de 2 mensajes arrojando 4.16 % de pérdidas en los mensajes del total de 48 mensajes esperados. En comparación con el día 6 de Junio, en este día la estación base 8F46 aporta con 2 mediciones receptadas desde la misma.

Día 19 de Junio (muestreador pasivo)

Tabla 24

Estaciones reconocidas en la toma de mediciones m. pasivo

Estación	Número de mensajes
9141	24
913D	8
9133	8
8F46	8
Total	48

Nota. En la Tabla 24 se muestra el número de mensajes receptados por cada una de las estaciones base, en este caso el muestreador pasivo no registra ninguna pérdida de mensajes en la implementación por lo que se reciben correctamente 48 mensajes; adicionalmente la estación base presente 8F46 presente en la Tabla 22 se muestra en esta ocasión con 8 mensajes recibidos desde la misma.

5.2 Análisis de Resultados

En la presente subsección se muestra el análisis de las mediciones obtenidas tanto en exteriores como en interiores, de forma que se toma en cuenta las métricas obtenidas de cada método de medición para obtener una diferencia o similitud entre las metodologías planteadas, por otro lado las mediciones que se obtuvieron se comparan con estándares planteados mencionados en estudios relacionados acerca de las variables ambientales, así como la comparación de los valores obtenidos con estaciones de medición cercanas a los prototipos desplegados.

5.2.1 Interiores

5.2.1.1 CO₂

Tabla 25

Tabla comparativa de mediciones en el día 6 de Junio

	Muestreador Pasivo	Muestreador Activo
Rango	273 – 278 ppm	370-403 ppm
\bar{x}	275 ppm	389 ppm
Desviación	1.5	10.03
Coefficiente de Correlación		0.03

Nota. En la Tabla 25 se muestran las métricas utilizadas para realizar una comparación entre ambos métodos de medición.

Tabla 26*Tabla comparativa de mediciones en el día 7 de Junio*

	Muestreador Pasivo	Muestreador Activo
Rango	273 – 303 ppm	346-405 ppm
\bar{x}	285 ppm	387 ppm
Desviación	4.25	14.76
Coefficiente de Correlación	0.03	

Nota. En la Tabla 26 se muestran las métricas utilizadas para realizar una comparación entre ambos métodos de medición.

Según lo establece (Meneses, 2015), el rango en el cual se establecen mediciones confiables de CO₂ están entre 350 y 450 ppm por lo cual en las Tablas 25 y 26 muestran que los valores que incluyen este rango comprende el muestreador activo, así mismo como los valores medios se deben encontrar en este rango. La desviación estándar hallada difiere en ambas tablas por lo que en las muestras obtenidas con el muestreador activo tiende a mostrarse más dispersos con relación al muestreador pasivo. Finalmente, en el coeficiente de correlación de Pearson se utiliza para medir el grado de asociación entre muestras obtenidas con el muestreador pasivo y el muestreador activo, de esta manera se obtiene $\rho = 0.03$ en ambas tablas por lo que se establece que se tiene una relación nula, es decir no representa una relación lineal entre las mediciones obtenidas con el muestreador pasivo y el muestreador activo.

5.2.1.2 CO

Tabla 27

Tabla comparativa de mediciones en el día 6 de Junio

	Muestreador Pasivo	Muestreador Activo
Rango	0.1 – 0.28 ppm	0.4 - 1.4 ppm
\bar{x}	0.17 ppm	0.7 ppm
Desviación	0.05	0.23
Coefficiente de Correlación		0.24

Nota. En la Tabla 27 se muestran las métricas utilizadas para realizar una comparación entre ambos métodos de medición.

Tabla 28

Tabla comparativa de mediciones en el día 7 de Junio

	Muestreador Pasivo	Muestreador Activo
Rango	0.25 – 0.6 ppm	0.1 – 1 ppm
\bar{x}	0.31 ppm	0.61 ppm
Desviación	0.05	0.21
Coefficiente de Correlación		-0.17

Nota. En la Tabla 28 se muestran las métricas utilizadas para realizar una comparación entre ambos métodos de medición.

En las mediciones obtenidas de CO se obtienen diferentes rangos entre las metodologías empleadas, sin embargo en (Mager, 1994) establece un rango para mediciones en interiores de 0.2 a 10 ppm por lo cual en ambas métodos nos encontramos dentro del rango expuesto, la desviación estándar en el muestreador activo tiende a ser mayor por lo que indica que las muestras se encuentran más dispersas con respecto al muestreador pasivo. El coeficiente de

correlación de Pearson en la Tabla 27 muestra $\rho = 0.24$ y en la Tabla 28 muestra $\rho = -0.17$ por lo que indica una correlación débil entre las mediciones obtenidas con el muestreador activo y el muestreador pasivo.

5.2.1.3 NO₂

Tabla 29

Tabla comparativa de mediciones en el día 6 de Junio

	Muestreador Pasivo	Muestreador Activo
Rango	0.1 – 0.4 ppm	0.1-0.3 ppm
\bar{x}	0.24 ppm	0.13 ppm
Desviación	0.11	0.13
Coefficiente de Correlación		-0.12

Nota. En la Tabla 29 se muestran las métricas utilizadas para realizar una comparación entre ambos métodos de medición.

Tabla 30

Tabla comparativa de mediciones en el día 7 de Junio

	Muestreador Pasivo	Muestreador Activo
Rango	0.1 – 0.5 ppm	0.1 – 0.3 ppm
\bar{x}	0.25 ppm	0.14 ppm
Desviación	0.13	0.04
Coefficiente de Correlación		0.18

Nota. En la Tabla 30 se muestran las métricas utilizadas para realizar una comparación entre ambos métodos de medición.

Las mediciones obtenidas comprenden los rangos mostrados en la Tabla 29 y 30 básicamente comprenden valores mínimos iguales sin embargo difieren en el valor máximo, de

esta manera según (EPA, Air Quality Guideline, 2000) establece un valor medio de 0.1 ppm en interiores, por lo cual las mediciones que se encuentran cerca de este valor se obtienen del muestreador activo. En este caso la desviación estándar muestra una mayor dispersión en el muestreador activo en la Tabla 29 mientras que en la Tabla 30 muestra una mayor dispersión en el muestreador pasivo, de esta forma cambia la tendencia a que la desviación estándar sea mayor en el muestreador pasivo. Los coeficientes de Pearson obtenidos $\rho = -0.12$ y $\rho = 0.18$ muestran una correlación débil entre las mediciones del muestreador activo y el muestreador pasivo.

5.2.1.4 RSSI

Tabla 31

Tabla comparativa de mediciones en el día 6 de Junio

	Muestreador Pasivo	Muestreador Activo
Rango	-105 dBm a -129 dBm	-126 dBm a -131 dBm
\bar{x}	-114 dBm	-129 dBm
Desviación	7	1.78

Nota. En la Tabla 31 se muestran las métricas utilizadas para realizar una comparación de la cantidad de señal recibida entre ambos métodos de medición.

Tabla 32

Tabla comparativa de mediciones en el día 7 de Junio

	Muestreador Pasivo	Muestreador Activo
Rango	-106 dBm a -134 dBm	-113 dBm a -130 dBm
\bar{x}	-118 dBm	-122 dBm
Desviación	6.85	5.36

Nota. En la Tabla 32 se muestran las métricas utilizadas para realizar una comparación de la cantidad de señal recibida entre ambos métodos de medición.

La cantidad de señal recibida o RSSI depende del número de estaciones base cercanas que se pueden conectar al nodo de medición, según lo menciona (Sigfox, 2017) en la Tabla 33 se establece la relación del RSSI, el número de estaciones base y el indicador de calidad. En la Tabla 31 el muestreador pasivo con un valor medio de -114 dBm muestra un número de 3 estaciones base con una excelente calidad, mientras que el activo tiene un valor medio de -129 dBm muestra que se puede conectar a alguna estación base con una limitada calidad. En la Tabla 32 el muestreador pasivo con un valor medio de -118 dBm muestra un número de 3 estaciones base y una calidad de señal buena, mientras que el muestreador activo tiene un valor medio de -122 dBm muestra que se puede conectar a 1 o 2 bases con una calidad promedio. Ambos dispositivos se ubicaron en el mismo espacio sin embargo se obtiene diferente indicador de calidad de señal, por lo que la única diferencia radica en el encapsulamiento de los dispositivos.

Tabla 33

Indicadores de calidad de señal

RSSI	Número de estaciones base	Indicador de Calidad
-114 dBm < RSSI	3	Excelente
-127 dBm < RSSI < -114 dBm	3	Bueno
-114 dBm < RSSI	1 o 2	Bueno
-127 dBm < RSSI < -114 dBm	1 o 2	Promedio
RSSI < -127 dBm	Alguna	Limitado

Nota. En la Tabla 33 se muestra el indicador de señal indicado para el diferente número de estaciones base.

5.2.1.5 SNR

Tabla 34

Tabla comparativa de SNR del día 6 de Junio

	Muestreador Pasivo	Muestreador Activo
Rango	6 dB a 30 dB	6 dB a 30 dB
\bar{x}	18.76 dBm	11.12 dB
Desviación	18.76	7.83

Nota. En la Tabla 34 se muestran métricas utilizadas para realizar una comparación de la cantidad de señal recibida entre ambos métodos de medición.

Tabla 35

Tabla comparativa de SNR del día 7 de Junio

	Muestreador Pasivo	Muestreador Activo
Rango	6 dB a 27.93 dB	6 dB a 23.24 dB
\bar{x}	13.72 dBm	9.24 dB
Desviación	6.52	3.67

Nota. En la Tabla 35 se muestran métricas utilizadas para realizar una comparación de la cantidad de señal recibida entre ambos métodos de medición.

A pesar de que en (Sigfox, 2017) se menciona que SNR no es recomendable como un indicador de calidad de señal se lo analiza debido a que es un parámetro entregado por la red de SigFox, como se muestra en la Tabla 34 y 35 los rangos tienden a ser iguales sin embargo el valor medio muestra que se tiene una mejor relación señal ruido en el muestreador pasivo superando al valor medio del muestreador activo, así mismo la desviación tiende a ser mayor en el muestreador pasivo en ambas tablas mencionadas. De esta manera se obtiene que el

muestreador pasivo tiene una mejor relación señal a ruido existente en las pruebas realizadas, en concordancia con lo que se obtuvo en el RSSI a pesar de ubicarse en el mismo lugar y de usar el mismo dispositivo para la conexión a la red de SigFox, la única diferencia física que se observa es el encapsulamiento de los dispositivos.

5.2.1.6 Estaciones

Tabla 36

Tabla comparativa de estaciones y mensajes recibidos en el día 6 de Junio

	Muestreador Pasivo	Muestreador Activo
Estaciones reconocidas	8D03	8D03
	8DE3	8FF3
	79D8	
	8FF3	
	8DE5	
	8F40	
Mensajes recibidos	48	22
Mensajes perdidos	0 %	54.16 %

Nota. En la Tabla 36 se muestran las estaciones y los mensajes obtenidos por el muestreador pasivo y activo.

Tabla 37

Tabla comparativa de estaciones y mensajes recibidos en el día 7 de Junio

	Muestreador Pasivo	Muestreador Activo
Estaciones reconocidas	8D03	8D03
	8DE3	8FF3
	79D8	8DE3
	8FF3	79D8

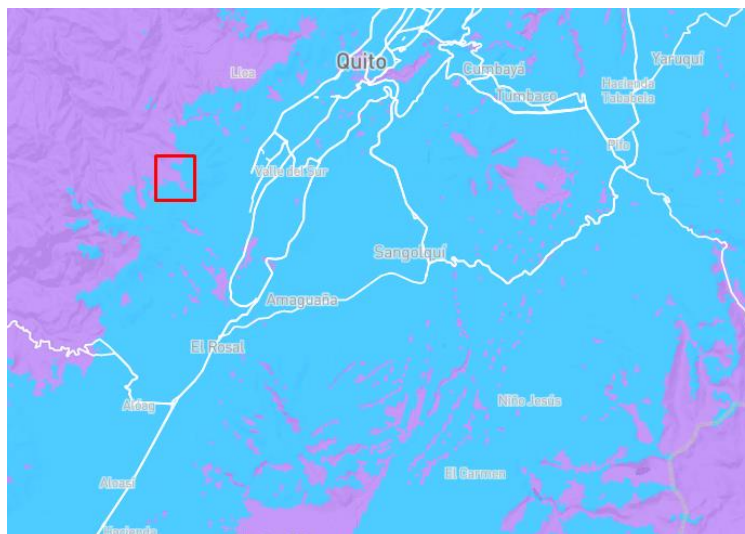
	Muestreador Pasivo	Muestreador Activo
Estaciones reconocidas	8DE5	
	8F40	
Mensajes obtenidos	48	44
Mensajes perdidos	0 %	8.33 %

Nota. En la Tabla 36 se muestran las estaciones y los mensajes obtenidos por el muestreador pasivo y activo.

En la Tabla 36 se muestran 6 estaciones base asociadas al muestreador pasivo, mientras que en el muestreador activo solamente muestran 2 estaciones base asociadas, esta razón repercute en la cantidad de mensajes recibidos por lo que en el muestreador activo se registra una pérdida de mensajes del 54.16 %, de la misma forma en la Tabla 37 en el muestreador pasivo se observan 6 estaciones base asociadas mientras que en el muestreador pasivo se muestran 4, el incremento de estaciones asociadas al muestreador activo representa un incremento de mensajes obtenidos y la reducción de los mensajes perdidos.

Figura 83

Ubicación del despliegue de la red de sensores en interiores



Nota. En la Figura 103 se muestra la ubicación del despliegue de la red de sensores en interiores (en color rojo), este es un aspecto que cabe recalcar ya que se llevó a cabo en una zona límite de cobertura. Tomada de *Sigfox, 2017*.

5.2.2 Exteriores

5.2.2.1 CO₂

Tabla 38

Tabla comparativa de mediciones en el día 11 de Junio

	Muestreador Pasivo	Muestreador Activo
Rango	229 – 270 ppm	369 - 409 ppm
\bar{x}	249.76 ppm	391.26 ppm
Desviación	8.2	8.77
Coefficiente de Correlación		-0.04

Nota. En la Tabla 38 se muestran las métricas utilizadas para realizar una comparación entre ambos métodos de medición.

Tabla 39*Tabla comparativa de mediciones en el día 19 de Junio*

	Muestreador Pasivo	Muestreador Activo
Rango	248 – 393 ppm	350 - 408 ppm
\bar{x}	275 ppm	385 ppm
Desviación	10.3	13.76
Coefficiente de Correlación	0.04	

Nota. En la Tabla 39 se muestran las métricas utilizadas para realizar una comparación entre ambos métodos de medición.

En los ambientes en exteriores se rige un rango igual al que establece (Meneses, 2015), por lo cual en las Tablas 38 y 39 muestran que los valores que incluyen este rango comprende el muestreador activo, de la misma forma los valores medios obtenidos se encuentran cercanos a los valores postulados por el Observatorio de Mauna Loa en Hawaii que es alrededor de 416 ppm, cabe recalcar que no nos encontramos bajo el mismo escenario y condiciones climáticas, la circulación vehicular ni las mismas condiciones pero es una medida de referencia. La desviación estándar hallada difiere en ambas tablas por lo que en las muestras obtenidas con el muestreador activo tiende a mostrarse más dispersos con relación al muestreador pasivo. Finalmente con el coeficiente de correlación de Pearson se obtiene $\rho = -0.04$ y $\rho = 0.04$ en la Tabla 38 y 39 respectivamente por lo que se establece que se tiene una relación nula, es decir no representa una relación lineal entre las mediciones obtenidas con el muestreador pasivo y el muestreador activo.

5.2.2.2 CO

Tabla 40

Tabla comparativa de mediciones en el día 11 de Junio

	Muestreador Pasivo	Muestreador Activo	Estación 'Los Chillos'
Rango	0.1 – 0.8 ppm	0.25 - 1.5 ppm	0.2 – 0.93 ppm
\bar{x}	0.21 ppm	0.7 ppm	0.77 ppm
Desviación	0.15	0.32	0.23
Coefficiente de Correlación		-0.18	-

Nota. En la Tabla 40 se muestran las métricas utilizadas para realizar una comparación entre ambos métodos de medición.

Tabla 41

Tabla comparativa de mediciones en el día 19 de Junio

	Muestreador Pasivo	Muestreador Activo	Estación 'Los Chillos'
Rango	0.2 – 0.6 ppm	0.3 – 0.9 ppm	0.2 - 0.84 ppm
\bar{x}	0.28 ppm	0.44 ppm	0.48 ppm
Desviación	0.06	0.16	0.22
Coefficiente de Correlación		-0.18	-

Nota. En la Tabla 41 se muestran las métricas utilizadas para realizar una comparación entre ambos métodos de medición.

En las mediciones obtenidas de CO se obtienen diferentes rangos entre las metodologías empleadas, no obstante para realizar una comparación entre los resultados obtenidos se usan los datos obtenidos de la estación ambiental más cercana que corresponde a la estación Los Chillos, la media de la estación expuesta en el día 11 de Junio arroja $\bar{x} = 0.44$ ppm con un

máximo de 0.93 ppm y un mínimo de 0.2 ppm, mientras en el día 2 arroja $\bar{x} = 0.48$ ppm con un máximo de 0.84 ppm y un mínimo de 0.2 ppm, por lo que se aceptan las mediciones obtenidas por el muestreador activo por la similitud en el rango y los valores medios además de que los valores medios en el muestreador pasivo resultan inferiores. La desviación estándar en el muestreador activo tiende a ser mayor por lo que indica que las muestras se encuentran más dispersas con respecto al muestreador pasivo. El coeficiente de correlación de Pearson en la Tabla 40 y 41 muestra $\rho = -0.18$ por lo que indica una correlación débil entre las mediciones obtenidas con el muestreador activo y el muestreador pasivo.

Figura 84

Ubicación de estación ambiental más cercana al campus universitario



Nota. En la Figura 84 se muestra la ubicación de la estación ambiental más cercana al campus de la Universidad de las Fuerzas Armadas- ESPE, la estación los Chillos ubicada en la Terraza de Andinatel (Av. Ilaló, Vía a El Tingo). Tomado de *Ambiente S. d., 2020*.

5.2.2.3 NO₂

Tabla 42

Tabla comparativa de mediciones en el día 11 de Junio

	Muestreador Pasivo	Muestreador Activo	Estación 'Los Chillos'
Rango	0.1 – 0.2 ppm	0.1 - 0.6 ppm	0.05 – 0.28 ppm
\bar{x}	0.19 ppm	0.29 ppm	0.1 ppm
Desviación	0.02	0.14	0.2
Coefficiente de Correlación		0.10	-

Nota. En la Tabla 42 se muestran las métricas utilizadas para realizar una comparación entre ambos métodos de medición.

Tabla 43

Tabla comparativa de mediciones en el día 19 de Junio

	Muestreador Pasivo	Muestreador Activo	Estación 'Los Chillos'
Rango	0.1 – 0.4 ppm	0.1 – 0.6 ppm	0.01 – 0.2 ppm
\bar{x}	0.21 ppm	0.33 ppm	0.05 ppm
Desviación	0.11	0.13	0.4
Coefficiente de Correlación		-0.03	-

Nota. En la Tabla 43 se muestran las métricas utilizadas para realizar una comparación entre ambos métodos de medición.

De la misma forma para las mediciones correspondientes a NO₂ las mediciones base se obtuvieron de la estación Los Chillos, en el día 11 de Junio se observa un valor medio de $\bar{x} = 0.1$ ppm y un valor máximo de 0.28 y en el día 19 de Junio se observa un valor medio de $\bar{x} = 0.05$ ppm y un valor máximo de 0.2 ppm en este caso ambos días los rangos se encuentran con una diferencia alrededor de 0.1 ppm, además en el día 19 se observan mediciones inferiores al rango

de medición del sensor. Las desviaciones estándar muestran una dispersión más evidente en el muestreador activo. Finalmente el coeficiente de correlación obtenido $\rho = 0.10$ y $\rho = -0.03$ muestra una correlación débil y una correlación nula respectivamente.

5.2.2.4 RSSI

Tabla 44

Tabla comparativa de mediciones en el día 11 de Junio

	Muestreador Pasivo	Muestreador Activo
Rango	-77 dBm a -127 dBm	-90 dBm a -129 dBm
\bar{x}	-104 dBm	-103 dBm
Desviación	14.20	10.51

Nota. En la Tabla 44 se muestran las métricas utilizadas para realizar una comparación de la cantidad de señal recibida entre ambos métodos de medición.

Tabla 45

Tabla comparativa de mediciones en el día 19 de Junio

	Muestreador Pasivo	Muestreador Activo
Rango	-78 dBm a -130 dBm	-69 dBm a -129 dBm
\bar{x}	-98.33 dBm	-93.66 dBm
Desviación	16.84	18.02

Nota. En la Tabla 45 se muestran las métricas utilizadas para realizar una comparación de la cantidad de señal recibida entre ambos métodos de medición.

Los valores medios obtenidos en las Tablas 44 y 45 muestran claramente una mejor calidad de señal recibida con respecto a las mediciones obtenidas en interiores, con referencia a la Tabla 33 en la que se indica la calidad de señal con relación al número de estaciones en el sitio

en todas las mediciones obtenidas ya sea en el muestreador activo y pasivo se muestra una calidad de señal excelente con 3 posibles estaciones base disponibles.

5.2.2.5 SNR

Tabla 46

Tabla comparativa de mediciones en el día 11 de Junio

	Muestreador Pasivo	Muestreador Activo
Rango	6 dB a 30 dB	6 dB a 30 dB
\bar{x}	20.36 dB	20.33 dB
Desviación	8.6	7.26

Nota. En la Tabla 46 se muestran las métricas utilizadas para realizar una comparación de relación señal ruido entre ambos métodos de medición.

Tabla 47

Tabla comparativa de mediciones en el día 19 de Junio

	Muestreador Pasivo	Muestreador Activo
Rango	6 dB a 30 dB	6 dB a 30 dB
\bar{x}	23.27 dB	21.96 dB
Desviación	6.6	7.71

Nota. En la Tabla 47 se muestran las métricas utilizadas para realizar una comparación de relación señal ruido entre ambos métodos de medición.

Las mediciones de la relación señal a ruido en el día 11 de Junio tienden a ser similares en valor medio, rango y desviación estándar, de la misma manera se muestra en el día 19 de Junio, no obstante los valores medios obtenidos en ambos días de implementación arrojan que la mejor relación señal a ruido obtenida es en el muestreador pasivo.

5.2.2.6 Estaciones

Tabla 48

Tabla comparativa de estaciones y mensajes recibidos en el día 11 de Junio

	Muestreador Pasivo	Muestreador Activo
Estaciones reconocidas	9141	9141
	913D	913D
	9133	9133
	91D0	
Mensajes Obtenidos	48	47
Mensajes perdidos	0 %	2.08 %

Nota. En la Tabla 48 se muestran las estaciones y los mensajes obtenidos por el muestreador pasivo y activo.

Tabla 49

Tabla comparativa de estaciones y mensajes recibidos en el día 19 de Junio

	Muestreador Pasivo	Muestreador Activo
Estaciones reconocidas	9141	9141
	913D	913D
	9133	9133
	8F46	8F46
Mensajes Obtenidos	48	46
Mensajes perdidos	0 %	4.16 %

Nota. En la Tabla 48 se muestran las estaciones y los mensajes obtenidos por el muestreador pasivo y activo.

En la Tablas 47 y 48 se visualizan las estaciones base de las cuales se han recibido mensajes, en el día 11 de Junio se observan 4 estaciones para el muestreador pasivo y 3 para el muestreador activo, en el muestreador activo se observa una pérdida de mensajes de 2.08 %, mientras que en el día 19 de Junio se observa un total de 4.16% mensajes perdidos con la presencia de las mismas estaciones. En la Figura 105 se muestra la cobertura de SigFox, en este caso el despliegue de los nodos de monitorización se situó en una zona con amplia cobertura y esto se manifiesta con la presencia de las 4 estaciones mostradas anteriormente.

Figura 85

Ubicación del despliegue de la red de sensores en interiores



Nota. En la Figura 105 se muestra la ubicación del despliegue de la red de sensores en exteriores (en color rojo). Tomada de *Sigfox*, 2017.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se diseñó una red de sensores compuesta por dos nodos de monitorización enfocados a la obtención de niveles de contaminación mediante mediciones de componentes contaminantes como lo son Dióxido de Carbono, Monóxido de Carbono y Dióxido de Nitrógeno, para lo cual se realizaron pruebas y mediciones tanto en exteriores como en interiores, para lo cual en la transmisión de la información se hizo uso de la tecnología SigFox. Los datos obtenidos se presentan tanto en una aplicación móvil como en una página web para la visualización de los mismos.

La red implementada se evaluó en correspondencia a los parámetros obtenidos de la red de SigFox para cada prototipo, de manera que se obtuvieron las métricas respectivas a la relación señal a ruido y la cantidad de señal recibida en ambos prototipos, arrojando que en el muestreador pasivo se obtiene un mejor RSSI y SNR promedio tanto en interiores como en exteriores, a diferencia del muestreador activo. Dado que se utilizó la misma placa de transmisión de datos en la tecnología SigFox y ambos dispositivos se localizaron en el mismo sitio, se valida que la única diferencia radica en el encapsulamiento del dispositivo ya que el muestreador activo tiene el encapsulamiento con material ABS, y por el muestreador pasivo se tiene el encapsulamiento impreso en material PLA, de esta manera se observa el impacto que tiene el encapsulamiento referente a los dispositivos de transmisión.

Se incorporó la tecnología LPWAN representada por la tecnología SigFox, entre el dispositivo de transmisión denominado *XKIT DEV Thindra* el cual nos proporcionó la conexión hacia el *backend*

de SigFox y la red de sensores conformado por los sensores MQ-7 (sensor de CO), MQ 135 (sensor de CO₂) y MQ 131 (sensor de NO₂) los mismos que se calibraron mediante el uso del método de calibración cero al inyectar aire puro libre de contaminantes y comparación directa con la exposición de diferentes concentraciones referentes a los componentes contaminantes elegidos para la conformación de la red de sensores.

Se desplegó la red de sensores en exteriores con lo que se pudo comprobar una excelente calidad de la señal en el campus de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE mostradas en las Tablas 44 y 45 se evidencia una RSSI de alrededor de -93 dBm y -103 dBm respectivamente, en las Tablas 46 y 47 en las cuales se evidencia un SNR alrededor de los 20 dB y adicional en las Tablas 48 y 49 existencia de múltiples estaciones cercanas al campus universitario, por otro lado en la implementación en interiores realizada en el sector Sur de Quito – Guamani presenta una buena calidad de señal que se muestra en las Tablas 31 y 32, en las cuales se evidencia una diferencia significativa entre las mediciones de ambos muestreadores, no obstante cabe recalcar que al ubicarse el despliegue en interiores en el límite de cobertura presenta una menor calidad de la señal y una menor cantidad de estaciones base en comparación al despliegue en exteriores.

En el despliegue de los sensores en interiores se comprueba la pérdida de mensajes en el muestreador activo de 54.16% el día 6 de Junio del 2020, mientras que en el día 7 de Junio del 2020 con el mismo periodo se tiene una pérdida de 8.33%. En menor ocurrencia se presenta esta perdida en el despliegue en exteriores con una pérdida de 2.08% el día 11 de Junio del 2020

y 4.16% el día 19 de Junio del 2020. Esta pérdida de los mensajes presentado en ambos ambientes se debe al encapsulamiento total del dispositivo ya que el material con el cual está recubierto el muestreador activo es más grueso y el hecho de encapsular toda la tarjeta inalámbrica produce una atenuación en la señal.

Las mediciones obtenidas con el muestreador activo y el muestreador pasivo arrojan coeficientes de correlación de Pearson nulo y débil en las medidas obtenidas de Dióxido de Carbono, Monóxido de Carbono y Dióxido de Nitrógeno ya sea en interiores como en exteriores, con este coeficiente de correlación se valida que la metodología expuesta como muestreador activo muestra que las medidas obtenidas se asemejan a las mediciones de los instrumentos de medición esto se da ya que es un sistema más complejo con el cual se puede realizar una calibración directa con los equipos de medición especializados, por otro lado la carencia de un sistema de absorción en el muestreador pasivo hace que el dispositivo de medición sea menos sensible tras la variación o la presencia de alguno de los contaminantes a medir, por lo que se observa un valor menor con respecto a la desviación estándar.

SigFox es una tecnología enfocada a redes inalámbricas de largo alcance y amplia cobertura dentro del concepto de LPWAN, basándose en un protocolo propietario a nivel físico y lógico lo que permite que el proveedor de red en el país WND Ecuador despliegue las estaciones base, minimizando el costo de implementación de una red física para el desarrollador y para el usuario final. No obstante también permite el uso de Micro- Gateway o estaciones base cuando el sitio de implementación del proyecto carece de cobertura.

Se propone la implementación de una estación de monitorización con el uso de sensores más robustos de un diseño enfocado a la implementación de una estación ambiental fija dentro del campus universitario con la que se puede obtener mediciones en periodos de tiempo mas largos (meses o años). En adición con la obtención de mediciones reales con respecto al ambiente universitario se puede promover la protección de recursos naturales y el cuidado del medio ambiente adicionalmente de fomentar el uso de tecnología orientada al Internet de las cosas.

Se plantea la implementación la tecnología SigFox en diferentes ambientes o escenarios climatológicos y geográficos, de manera que se pueda obtener el impacto de estas variables sobre la tecnología, en adición se puede establecer una diferencia en métricas entre las distintas tecnologías enfocadas el IoT, así como la utilización de una estación base Micro- Gateway que sea propietaria y administrada por los ejecutores del proyecto en los lugares donde no se tenga cobertura.

REFERENCIAS

- Acero, J., & Reyes, D. (2016). *Sistema prototipo para el monitoreo inalámbrico de gases contaminantes del aire desarrollado bajo plataformas de software libre*. QUITO.
- Ambiental, D. G. (2005). *PROTOCOLO DE MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE Y GESTIÓN DE LOS DATOS*.
- Ambiente, M. d. (2010). *Plan Nacional de Calidad del Aire*. Quito.
- Ambiente, S. d. (2020). *Secretaría del Ambiente*. Obtenido el 15 de Abril del 2020 de <http://www.quitoambiente.gob.ec/ambiente/index.php/los-chillos>
- Aranda V, V. R. (2004). *Gestión metrológica. Memorias de curso. MetAs y Metrólogos Asociados*. Mexico.
- Atilio de la Orden, E. (2010). *Contaminación. Facultad de Ciencias Agrarias UNCa.,.*
- ATSDR. (2004). *RESUMEN DE SALUD PÚBLICA AMONIACO*. Atlanta, Georgia.
- Ballester, F., Boldo, E., Diaz, J., Linares, C., & Querol, J. (2010). Observatorio DKV Salud y Medio Ambiente 2010: "*Contaminación Atmosférica y Salud*". España.
- Broring, A., Echterhoff, J., Jirka, S., Simonis, I., Everding, T., Stasch, C., . . . Lemmens, R. (2011). *New generation sensor web enablement. Sensors.,.* Obtenido el 20 de Mayo del 2020 <https://www.mdpi.com/1424-8220/11/3/2652>
- Caliba ORG. (2020). Obtenido el 23 de Marzo del 2020 de Seminario Ambiental de Controles Ambientales:

http://www.caliba.org.ar/actividades_2014_octubre/MUESTREO%20Y%20ANALISIS%20EN%20CALIDAD%20DE%20AIRE.pdf

CEA, (2006). *Contaminación del Aire. Cuenca: Universidad de Cuenca/CEA-Illustre Municipalidad de Cuenca*. Cuenca.

Centenaro, M., Vangelista, A., & Zorzi, M. (2016). *Long Range Communications in unlicensed bands. IEEE Magazine*, 60-67.

Center, G. S. (2001). *The Earth Science Enterprise Series*. Greenbelt, Maryland: Nasa Facts.

Chuquer, D., Ampudia, S., Puertas, C., Bustamante, L., Reina, C., & Ramirez, F. (2018). *Air Pollution at Edge of Street in Quito*,.

Crespo, E. (2008). *Contaminacion Atmosferica, Tecnicas de Muestreo*. EOI: Escuela de Negocios.

Developers. (2020). *Android Studio*. Obtenido el 3 de Mayo del 2020 de <https://developer.android.com/studio/intro?hl=es-419>

Education, C. C. (2017). *What You Need to Know about Air Pollution: Its Importance and Effective Solutions*. Canada.

Electronics, N. (2020). Obtenido el 03 de Marzo del 2020 de Naylamp Electronics: <https://naylampmechatronics.com/conversores-dc-dc/196-convertidor-voltaje-dc-dc-step-down-3a-lm2596.html>

EPA. (2000). *Air Quality Guideline*. United States: WHO.

EPA. (2000). *EL SMOG -¿A Quién Perjudica?* Washington.

- Estrella, R., Estrella, B., Narváez, X., Reyes, M. T., Gutiérrez, M., & Oviedo, J. (2000). *Contaminación ambiental y enfermedades respiratorias en escolares de Quito. Quito, Pichincha, Ecuador.*
- Flores, C., & Maza, J. (2018). *Diseño de una red inalámbrica de Monitoreo de CO2 basado en tecnología Sigfox.* Guayaquil.
- Gennaro, P., Lofu, D., Vitano, D., Tedeshi, P., & Boccadoro, P. (2018). *WaterS: a Sigfox-compliant prototype for water monitoring.*
- GeoEcuador. (2008). *Informe sobre el estado del medio ambiente.*
- Ginther, A. (2016). *Beyond the traffic: The Smart City Challenge.* Smart Columbus.
- INE. (2015). Manual 1. *Principios de medición para la calidad del aire.* Instituto Nacional de Ecología, 21.
- Koo, D., & Matheus, J. (2015). *Towards Sustainable Water Supply: Schematic Development of Big Data Collection Using Internet of Things (IoT).* ScienceDirect, 492.
- Krishna, S., Jangam, P., & Kumar, S. (2017). *Wireless Sensor Networks and Applications.*
Obtenido el 1 Junio del 2020 de Researchgate:
<https://www.researchgate.net/publication/317798885>
- Kumar, S., & Shepered, D. (2001). D. *Sensit: Sensor information technology for the warfi ghter.* 4th International Conference on Information Fusion (FUSION'01), (págs. 1-9).

- Laboratories, A. A. (2020). *American Analytical Laboratories*. Obtenido el 20 de Abril del 2020 de <http://www.american-analytical.com/wp-content/uploads/2013/06/Conversion-Tables1.pdf>
- LinkLabs. (2016). *A comprehensive look at a LPWAN*. LinkLabs, 16.
- LUCIDTRON. (2020). *Wisol Module Dev Kit v4*.
- Mager, J. (1994). *Encyclopedia of Occupational health and safety*. Geneva: International Labour Office.
- Martinez Garcia, E., & Lopez Serrano, F. (2013). *El flujo de co2 del suelo y sus variaciones espaciales y temporales en un monte mixto de pinus pinaster ait. y quercus ilex l. In Congresos-carga final*.
- Martinez, B. A., & Romieu, I. (1996). *Introducción al monitoreo atmosferico*. Departamento del Distrito Federal, México: ECO /GTZ.
- Medina, & Ortega. (2013). *Monitorización y verificación de un almacenamiento geológico de co2*. España.
- Meneses, P. (2015). *Implementación de un sistema de monitorización de co2 mediante redes de sensores inalámbricos en el campus*. Sangolqui.
- Milan, M. (2016). *Diseño e implementacion de un sistema de medida de gases con Arduino*. Zaragoza: Universidad de Zaragoza.
- Moloney, P. (4 de Junio de 2019). Internet of Things (IoT): An Introduction. *Congressit Research Service*.

- Morales, J. (2016). *Control para la navegación pre-programada de trayectorias de un vehículo aéreo no tripulado (uav) aplicado a la supervisión y transmisión en línea de la calidad del aire*. Riobamba: ESPOCH.
- Moreira, A. (2018). *Contaminación del aire en el medio ambiente por las emisiones de gases tóxicos de empresas industriales en Ecuador*. Manabi, Manta.
- NI, L. (2008). China's national research project on wireless sensor networks. *2008 IEEE International Conference on Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing (SUTC'08)*, (pág. 19).
- Ortiz, J. (2017). *Benchmark de selección de sensores para una wsn de recolección de datos para un sistema de alerta temprana de incendios forestales*. Ibarra- Ecuador: UTN.
- Palacios, E., & Espinoza, C. (2014). *Contaminación del aire exterior Cuenca - Ecuador*. Posibles efectos en la salud. *LatinDex*.
- Patel, D., & Won, M. (2017). *Experimental study on low power wide area networks for mobile internet of things*,. *arXiv*, 1-5.
- Patier, R. (2005). *Metodología de evaluación de la calidad del aire*. Madrid España: Real Academia Nacional de Farmacia.
- Raza, U., Kulkarni, P., & Sooriyabandara, M. (2017). *Low Power Area Networks an Overview*. *IEEE*, 855-873.
- Robodigg. (2020). *Robodigg Maker*. Obtenido el 26 de Febrero del 2020 de <https://www.robotdigg.com/product/775/DS3218-Digital-Servo>

- Rose, K., Eldridge, S., & Lima, C. (2015). *El internet de las cosas- Breve Reseña, Internet Society*.
- Sensydine. (2020). *Sensydine*. Obtenido el 12 de Febrero del 2020 de Sensydine:
<http://www.lesman.com/unleashd/catalog/airsampling/Sensidyne-Gilian-BDX-II/Sensidyne-GilianBDXII-man-E.pdf>
- SEPA. (2020). *The Chemistry of Air Pollution*. Escocia.
- Sigfox. (2017). *SigFox Technical Overview*. Obtenido el 22 de Mayo del 2020 de
<https://www.disk91.com/wp-content/uploads/2017/05/4967675830228422064.pdf>
- Sons, W. J. (2006). *Safe Design and Operation of Process Vents and Emission control systems*. En *Appendix I* (pág. 297). New Jersey.
- Teknorama. (2016). *Unidades de Filtracion, Filtros de Jeringa*.
- Traxco. (2020). *Traxco*. Obtenido el 2 de febrero de 2020 de
<https://www.traxco.es/tienda/valvula-tres-vias>
- UCE. (2004). *Informe del proyecto "Estudio de la calidad del aire de la ciudad de Guayaquil"*. Guayaquil.
- Vaisala. (2020). *Nota de Aplicacion - Como medir CO2*. Obtenido el 4 de febrero de 2020 de
<https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/CEN-TIA-Parameter-How-to-measure-CO2-Application-note-B211228ES-A.pdf>
- Vermesan, O., & Friess, P. (2014). *Internet of Things –From Research and Innovation to Market Deployment*. River Publishers.

WHO. (1958). *Air pollution: fifth report of the Expert Committee on Environmental Sanitation.*

Geneva.

World Health Organization. (2020). Obtenido el 17 de enero de 2020 de

<https://www.afro.who.int/health-topics/air-pollution>

Yuhasa. (2020). Obtenido el 10 de enero de 2020 de

http://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos_y_documentos/86290/Yuasa.pdf

Anexos