



Universidad
Nacional
de Loja

Universidad Nacional de Loja
Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales
no Renovables

Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones

**Implementación de una red de sensores para la medición de la calidad de
aire y niveles de ruido en entornos abiertos de la ciudad de Loja.**

**Trabajo de Titulación previo, a la
obtención del Título de Ingeniero en
Electrónica y Telecomunicaciones**

AUTOR:

Milto Ronaldo Obaco Medina

DIRECTOR:

Ing. Franklin Gustavo Jiménez Peralta, Mg. Sc.

Loja – Ecuador

2024

Certificación

Loja, 11 de junio del 2024

Ing. Franklin Gustavo Jiménez Peralta. Mg. Sc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

CERTIFICO:

Que he revisado y orientado todo proceso de la elaboración del Trabajo de Titulación denominado: **Implementación de una red de sensores para la medición de la calidad de aire y niveles de ruido en entornos abiertos de la ciudad de Loja.**, previo a la obtención del título de **Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones**, de la autoría del estudiante **Milto Ronaldo Obaco Medina**, con **cedula de identidad No 1900819929**, una vez que el trabajo cumple con todos los requisitos exigidos por la Universidad Nacional de Loja para el efecto, autorizo a la presentación del mismo para su respectiva sustentación y defensa.

Ing. Franklin Gustavo Jiménez Peralta. Mg. Sc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Autoría

Yo, **Milto Ronaldo Obaco Medina**, declaro ser el autor del presente Trabajo de Titulación y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos de posibles reclamos o acciones legales, por el contenido del mismo. Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja, la publicación de mi Trabajo de Titulación en el Repositorio Institucional - Biblioteca Virtual.

Firma:

Cédula: 1900819929

Fecha: 11 de junio del 2024

Correo: milto.obaco@unl.edu.ec

Teléfono: 0968251743

Carta de autorización por parte del autor, para consulta, reproducción parcial o total, y/o publicación electrónica de texto completo del del Trabajo de Titulación.

Yo, **Milto Ronaldo Obaco Medina**, declaro ser el autor del Trabajo de Titulación denominado: **Implementación de una red de sensores para la medición de la calidad de aire y niveles de ruido en entornos abiertos de la ciudad de Loja.**, como requisito para optar por el título de **Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones**, autorizo al Sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que, con fines académicos, muestre al mundo la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Institucional.

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el Repositorio Institucional, en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia del Trabajo de Titulación que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización suscribo, en la ciudad de Loja, a los ocho días del mes de enero del dos mil veinticuatro.

Firma:

Autor: Milto Ronaldo Obaco Medina

Cédula: 1900819929

Dirección: Ciudadela la Argelia, Loja

Correo electrónico: milto.obaco@unl.edu.ec

Teléfono: 0968251743

DATOS COMPLEMENTARIOS:

Director de Trabajo de Titulación: Ing. Franklin Gustavo Jiménez Peralta, Mg. Sc.

Dedicatoria

Con gratitud en mi corazón y una profunda reverencia, deseo comenzar esta dedicatoria rindiendo homenaje a Dios, fuente inagotable de sabiduría y guía en mi camino.

A mis padres, quienes han sido mis pilares y fuente inagotable de amor, les agradezco por su inquebrantable apoyo desde el principio. Su dedicación y sacrificio han sido invaluable, brindándome la educación y las oportunidades necesarias para llegar hasta aquí.

A mis hermanos, verdaderos compañeros de vida, les agradezco por su inquebrantable apoyo y aliento constante. Su presencia ha sido mi mayor inspiración y consuelo en los momentos de duda.

A mis amigos, quienes han estado a mi lado durante este emocionante viaje académico, les agradezco por su compañía y motivación constante. Su amistad me ha dado fuerza en los momentos más desafiantes, recordándome que no estoy solo en esta travesía.

Milto Ronaldo Obaco Medina

Agradecimientos

Agradezco a Dios, quien ha sido mi guía y fortaleza en cada paso de este viaje académico. Su amor incondicional y sabiduría han iluminado mi camino, dándome la fuerza para superar los desafíos y alcanzar esta meta.

Expreso mi más sincero agradecimiento a la Universidad Nacional de Loja por brindarme la oportunidad de adquirir conocimientos y crecer como profesional. Agradezco a los docentes y personal administrativo por su dedicación y apoyo, que han sido fundamentales para mi formación.

Mi gratitud se extiende al Ing. Franklin Gustavo Jiménez Peralta, mi director de Trabajo de Titulación, por su invaluable orientación, paciencia y compromiso. Su experiencia y sabiduría han sido un faro en este proceso, guiándome hacia la excelencia académica.

Por último, pero no menos importante, agradezco de todo corazón a mis padres, hermanos y familiares, quienes han sido mi mayor inspiración y apoyo inquebrantable. Vuestra confianza, amor y sacrificio han sido la base de mi éxito. Gracias por creer en mí y alentarme en cada paso del camino.

Milto Ronaldo Obaco Medina.

Índice de Contenidos

Portada	i
Certificación	ii
Autoría	iii
Carta de autorización.	iv
Dedicatoria	v
Agradecimientos	vi
Índice de Contenidos	vii
Índice de tablas:	xi
Índice de figuras:	xiii
Índice de anexos:	xvi
1 Título	1
2 Resumen	2
Abstract.....	3
3 Introducción	4
4 Marco Teórico	7
4.1 Contaminantes	7
4.2 Contaminación atmosférica	7
4.2.1 Tipos de contaminantes	7
4.2.2 Material Particulado PM2.5 y PM10.....	7
4.2.3 Ozono O3.....	10
4.2.4 Dióxido de Nitrógeno NO2	12
4.2.5 Dióxido de Azufre SO2	13
4.2.6 Monóxido de carbono CO	15

4.2.7	Directrices de la calidad del aire.....	17
4.3	El ruido	19
4.3.1	Contaminación Acústica.....	19
4.3.2	Clasificación del ruido según sus niveles	20
4.3.3	Consecuencias debidas al ruido.....	22
4.4	Internet of Things (IoT).....	23
4.4.1	Capas de arquitectura IoT.....	24
4.4.2	Plataformas IoT	25
4.4.3	Tipos de plataformas IoT.....	26
4.5	Redes de sensores	28
4.5.1	Sensores	28
4.5.2	Redes inalámbricas de sensores (WSN).....	29
4.5.3	LPWAN (Low Power Wide Area Network)	31
4.6	LoRa (Long Range).....	33
4.6.1	LoRaWAN.....	34
4.6.2	Registro y activación del dispositivo final (nodo).....	35
4.6.3	Seguridad en LoRaWAN.....	37
4.6.4	Topología LoRaWAN	37
5	Metodología.....	39
5.1	Nodo final	39
5.2	Server Gateway.....	40
5.3	Plataforma IoT	40
5.4	Cálculos de potencia.....	41
5.4.1	Zona de Fresnel	43

5.4.2	Distancia	44
5.5	Puntos estratégicos	44
5.5.1	Resultados puntos escogidos	45
5.5.2	Selección de lugares para implementación.....	45
5.5.3	Simulación vista desde XIRIO ONLINE	49
5.6	Placa de desarrollo LoRa.....	53
5.7	Sensores de Gases y Ruido.....	54
5.8	Gateway LoRa Wap LR9 de Mikrotik	56
5.9	Recursos energéticos	57
5.10	Presupuesto.....	58
5.11	Configuración del Gateway	60
5.11.1	Configuración adicional Red privada	65
5.12	Configuración de The Things Networks (TTN).....	68
5.13	Códigos Arduino	72
5.14	Proceso de funcionamiento.....	73
5.14.1	Nodo Final	73
5.15	Decodificador TTN y visualización en plataforma IoT.....	75
5.16	Construcción prototipo	81
5.16.1	Materiales de caja	82
5.16.2	Materiales de circuito.....	82
5.16.3	Herramientas para la construcción.....	83
5.16.4	Resultados de armado	83
5.17	Validación de las variables contaminantes.....	83
5.17.1	Validación variable ruido (dB)	83

5.17.2	Validación variable monóxido de carbono (CO)	88
6	Resultados	95
6.1	Red de sensores inalámbricos (WSN)	95
6.2	Enlace LoRaWAN	96
6.3	Conexión TTN (Gateway) y TS (plataforma IoT).....	96
6.4	Implementación Nodos	98
6.4.1	NODO 1.....	98
6.4.2	NODO 2.....	100
6.5	Desempeño de la red.....	101
6.6	Datos contaminantes.....	105
7	Discusión.....	115
8	Conclusiones.....	119
9	Recomendaciones.....	122
10	Bibliografía.....	124
11	Anexos.....	130

Índice de tablas:

Tabla 1. <i>Niveles recomendados sobre la calidad del aire y metas intermedias</i>	18
Tabla 2. <i>Tiempos promedios para exposición a factores contaminantes vigentes</i>	19
Tabla 3. <i>Clasificación de ruido según sus niveles en ambientes controlados</i>	21
Tabla 4. <i>Plataformas IoT de código abierto</i>	28
Tabla 5. <i>Características de las WSN y sus restricciones.</i>	31
Tabla 6. <i>Características tecnologías líderes de LPWAN</i>	32
Tabla 7. <i>Requisitos reglamentarios de LoRa en Europa y América del Norte</i>	34
Tabla 8. <i>Parámetros del enlace Nodo final – Gateway</i>	44
Tabla 9. <i>Parámetros de calificación mejor lugar</i>	46
Tabla 10. <i>Puntos escogidos Gateway – Nodo Final</i>	48
Tabla 11 <i>Comparativa nivel de potencia simulada y medida software XIRIO</i>	53
Tabla 12. <i>Características Placa de desarrollo CubeCell HTCC AB02S</i>	53
Tabla 13. <i>Sensores para gases y ruido</i>	55
Tabla 14. <i>Puerta de enlace Gateway</i>	56
Tabla 15. <i>Antena Gateway 915 MHz</i>	57
Tabla 16. <i>Dispositivos para la sostenibilidad energética</i>	58
Tabla 17. <i>Presupuesto referencial</i>	59
Tabla 18. <i>Presupuesto Total</i>	60
Tabla 19. <i>Características sonómetro DT-8852</i>	84
Tabla 20. <i>Comparativa sonómetro DT-8852 y sensor Max9814 ambiente controlado</i>	85
Tabla 21. <i>Comparativa sonómetro DT-8852 y sensor Max9814 exteriores</i>	86
Tabla 22. <i>Desviación estándar comportamiento del ruido sobre los sensores</i>	88
Tabla 23. <i>Características medidor AS8700A</i>	89
Tabla 24. <i>Comparativa medidor AS8700A y sensor MQ136</i>	91
Tabla 25. <i>Desviación estándar comportamiento del monóxido de carbono sobre los sensores</i>	93
Tabla 26. <i>Resumen de contaminación sobre sectores valores máximos y mínimos</i>	114
Tabla 27. <i>Datos del enlace Gateway – Nodo Final</i>	130

Tabla 28. <i>Cálculos de propagación lugares estratégicos</i>	132
Tabla 29. <i>Curva CO (MQ136)</i>	160
Tabla 30. <i>Curva SO2 (MQ136)</i>	161
Tabla 31. <i>Curva O3 (MQ131)</i>	162
Tabla 32. <i>Curva NO2 (MQ131)</i>	163
Tabla 33. <i>Curva PM (GP2Y1010F)</i>	163
Tabla 34 <i>Calculo de comportamiento del nodo final vs DT-8852</i>	166
Tabla 35 <i>Calculo de comportamiento del nodo final vs AS8700A</i>	169

Índice de figuras:

Figura 1. <i>Tamaños para partículas más pequeñas a las de un cabello humano</i>	8
Figura 2. <i>Ozono, molécula triatómica encontrada a 20 km de la superficie terrestre</i>	11
Figura 3. <i>Contaminantes primarios y secundarios</i>	14
Figura 4. <i>Efectos del monóxido de carbono, concentración vs exposición</i>	16
Figura 5. <i>Impacto en la salud contaminación en el aire</i>	17
Figura 6. <i>Clasificación del ruido debido a los rangos en decibelios</i>	22
Figura 7. <i>Concepto de plataforma IoT</i>	26
Figura 8. <i>Estructura de una WSN</i>	30
Figura 9. <i>Topología de red LoRaWAN</i>	38
Figura 10. <i>Diagrama de nodo final</i>	39
Figura 11. <i>Diseño de red LoRaWAN</i>	41
Figura 12. <i>Zonas de Fresnel</i>	43
Figura 13. <i>Simulación en Radio Mobile - puntos estratégicos</i>	47
Figura 14. <i>Parámetros de enlace Nodo final – Gateway</i>	48
Figura 15. <i>Configuración inicial nodo final Xirio</i>	50
Figura 16. <i>Configuración Gateway software XIRIO</i>	51
Figura 17. <i>Configuración Nodo Final software XIRIO</i>	52
Figura 18. <i>Vista general radio enlace software XIRIO</i>	52
Figura 19. <i>Placa de desarrollo CubeCell</i>	54
Figura 20. <i>Red inicial creada por el WAP LR9</i>	60
Figura 21. <i>Interfaz de ingreso a las configuraciones del Gateway</i>	61
Figura 22. <i>Configuración red WiFi del Gateway</i>	61
Figura 23. <i>Configuración para ingreso de la interfaz de Mikrotik (Gateway)</i>	62
Figura 24. <i>Reconexión a la red WiFi preconfigurada</i>	63
Figura 25. <i>Interfaz de configuración Mikrotik</i>	63
Figura 26. <i>Agregar un server de enlace a TTN</i>	64
Figura 27. <i>Cambio de estado de los dispositivos LoRa</i>	64
Figura 28. <i>Configuración Gateway – vinculación a TTN</i>	64

Figura 29. <i>Credenciales de acceso Winbox</i>	65
Figura 30. <i>Configuración IP estática Winbox</i>	66
Figura 31. <i>NATEO, salida a internet</i>	66
Figura 32. <i>Servidores DNS, salida a internet</i>	67
Figura 33. <i>Ingreso a la plataforma The Things Network</i>	69
Figura 34. <i>Ingreso de aplicaciones y Gateways a TTN</i>	69
Figura 35. <i>Ingreso datos de registro Gateway WAP LR9</i>	70
Figura 36. <i>Creación de aplicaciones en TTN</i>	70
Figura 37. <i>Configuración de dispositivos finales</i>	71
Figura 38. <i>Configuración de HTCC AB02S en la plataforma de TTN</i>	72
Figura 39. <i>Configuraciones previas al enlace, en el IDE de Arduino</i>	73
Figura 40. <i>Diagrama de flujo de la obtención de variables contaminantes</i>	74
Figura 41. <i>Registro e inicio de sesión en TS</i>	77
Figura 42. <i>Agregación de nuevos canales para nodos finales</i>	77
Figura 43. <i>Parámetros de ingreso para la creación de un nuevo canal</i>	78
Figura 44. <i>ID de identificación del canal en TS</i>	78
Figura 45. <i>Creación de una API key en TTN</i>	79
Figura 46. <i>Configurar plataforma IoT desde TTN</i>	80
Figura 47. <i>Parámetros de conexión entre TTN y TS</i>	80
Figura 48. <i>Vista de los Fields y valores de variables contaminantes</i>	81
Figura 49. <i>Sonómetro DT-8852 y nodo final</i>	86
Figura 50. <i>Comportamiento del DT-8852 vs nodo final</i>	87
Figura 51. <i>Sensor MQ136 y medidor AS8700A, en ambientes de prueba</i>	92
Figura 52. <i>Comportamiento del AS8700A vs nodo final</i>	93
Figura 53. <i>Visualización de datos contaminantes desde TTN</i>	95
Figura 54. <i>Calidad de la señal enlace LoRa RSSI</i>	96
Figura 55. <i>Datos obtenidos mediante la plataforma ThingSpeak</i>	97
Figura 56. <i>Nodo 1 – primera implementación</i>	99
Figura 57. <i>Nodo 1 – segunda implementación</i>	99

Figura 58. <i>Nodo 2 – primera implementación.....</i>	100
Figura 59. <i>Nodo 2 – segunda implementación</i>	101
Figura 60. <i>Niveles de eficiencia muestras de 5 días datos estimados contra datos obtenidos</i>	102
Figura 61. <i>Datos contaminantes en horas pico de los cuatro sectores - Mañana</i>	103
Figura 62. <i>Contaminación ruido Nodo 1 (mayorista 2) – mes 1</i>	105
Figura 63. <i>Contaminación atmosférica Nodo 1 (Mayorista 2) – mes 1</i>	106
Figura 64. <i>Contaminación ruido Nodo 2 (Puerta de la ciudad) – mes 1</i>	108
Figura 65. <i>Contaminación atmosférica Nodo 2 (Puerta de la ciudad) – mes 1</i>	109
Figura 66. <i>Contaminación ruido Nodo 1 (Cabo Minacho) – mes 2</i>	110
Figura 67. <i>Contaminación atmosférica Nodo 1 (Cabo Minacho) – mes 2.....</i>	111
Figura 68. <i>Contaminación ruido Nodo 2 (San Sebastián) – mes 2</i>	112
Figura 69. <i>Contaminación atmosférica Nodo 2 (San Sebastián) – mes 2</i>	113
Figura 70. <i>Esquemático prototipo</i>	150
Figura 71. <i>Diseño PCB prototipo.....</i>	151
Figura 72. <i>Quema de PCB – método del laser</i>	152
Figura 73. <i>Materiales principales para la construcción nodo final.....</i>	153
Figura 74. <i>Diseños en 3D con el software FreeCad para soporte de los sensores.....</i>	153
Figura 75. <i>Impresión de soportes 3D – resultado final.....</i>	155
Figura 76. <i>Nodo Final armado.....</i>	156
Figura 77. <i>Curva de calibración sensor MQ136.....</i>	157
Figura 78. <i>Curva de calibración sensor MQ131</i>	158
Figura 79. <i>Curva de calibración sensor GP2Y1010AU0F.....</i>	159
Figura 80. <i>Herramienta para la obtención de valores en la curva</i>	160
Figura 81. <i>Vista general de la zona de cobertura de la antena</i>	165
Figura 82. <i>Configuración de IP estática sobre caja de telecomunicaciones</i>	165

Índice de anexos:

Anexo 1. Diseño de red	130
Anexo 2. Códigos de implementación en Arduino	134
Anexo 3. Construcción prototipo nodo final	150
Anexo 4. Curvas de calibración	157
Anexo 5. Instalación de antena y equipo Mikrotik (Gateway).....	165
Anexo 6. Cálculo de la desviación estándar para el ruido.....	166
Anexo 7. Cálculo de la desviación estándar para el monóxido de carbono (CO).....	169
Anexo 8. Ficha técnica Sonómetro DT-8852.....	172
Anexo 9. Ficha técnica detector de monóxido de carbono AS8700A	173
Anexo 10. Certificado de traducción del resumen	174

1 Título

Implementación de una red de sensores para la medición de la calidad de aire y niveles de ruido en entornos abiertos de la ciudad de Loja.

2 Resumen

El presente Trabajo de Titulación aborda la contaminación acústica y atmosférica, temas considerados prioritarios por la Organización Mundial de la Salud. Se realiza una investigación bibliográfica que abarca el estudio de gases como CO, SO₂, O₃, NO₂ y MP, así como la comunicación inalámbrica, enfocándose en tecnologías LPWAN, específicamente LoRa (Long Range), como herramienta para los enlaces de radio. Además, se explora el uso de plataformas IoT compatibles con LoRa para la gestión de datos sobre la contaminación. Los cálculos empleados incluyen modelos de propagación en radio enlaces y fórmulas de calibración de sensores mediante software especializado para simulaciones y obtención de valores constantes. El objetivo principal es obtener datos precisos sobre la contaminación en el casco céntrico de la ciudad de Loja, siguiendo las directrices de la OMS. Para esto, se identifican lugares estratégicos para implementar nodos con sensores especializados en cada variable contaminante, considerando niveles de potencia y disponibilidad como criterios clave para la ubicación de estos nodos. La investigación propone establecer una red de sensores eficiente y confiable que permita monitorear y recopilar datos precisos sobre la contaminación ambiental. Con estos resultados, se busca contribuir a la toma de decisiones informadas y a la implementación de medidas adecuadas para mitigar los efectos de la contaminación en la ciudad.

Palabras clave: Red de sensores, calidad de aire, contaminación atmosférica, ruido, sensores, comunicación inalámbrica.

Abstract

The present degree project addresses acoustic and atmospheric pollution, topics considered a priority by the World Health Organization. Bibliographic research is conducted covering the study of gases such as CO, SO₂, O₃, NO₂ and PM, as well as wireless communication, focusing on LPWAN technologies, specifically LoRa (Long Range), as a tool for radio links. In addition, the use of LoRa-compatible IoT platforms for pollution data management is explored. The calculations employed include propagation models in radio links and sensor calibration formulas using specialized software for simulations and obtaining constant values. The main objective is to obtain accurate data on pollution in the downtown area of the city of Loja, following WHO guidelines. For this, strategic locations are identified to implement nodes with specialized sensors in each pollutant variable, considering power levels and availability as key criteria for the location of these nodes. The research proposes to establish an efficient and reliable sensor network to monitor and collect accurate data on environmental pollution. With these results, it seeks to contribute to informed decision-making and the implementation of appropriate measures to mitigate the effects of pollution in the city.

Keywords: Sensor network, air quality, air pollution, noise, sensors, wireless communication.

3 Introducción

La contaminación en ciudades con respecto a las áreas urbanas, se ha vuelto tema de estudio para organizaciones, empresas públicas y privadas, en la cual su primer objetivo es la de salvaguardar la salud pública de las personas, por ende, se ven en la ardua labor de concientizar, normalizar y dar a conocer los niveles de contaminación que afectan a los seres vivos en general. Con respecto a contaminantes como lo son las altas concentraciones de ruido y a los niveles excesivos de gases (partículas contaminantes en el aire), son una de las principales fuentes del deterioro de la salud y de pérdida de años de vida saludable para el ser humano. Esto conlleva que se tomen medidas para la prevención de dichos contaminantes que pueden tener contacto con el medio y posteriormente con los seres vivos (OMS, 2021).

La OMS (Organización mundial de la salud), expone directrices que conllevan a los niveles recomendados de exposición (medidas en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) en un periodo de tiempo establecido para cada contaminante los cuales estarían clasificados como: MP (material particulado), CO (Monóxido de carbono), CO₂ (Dióxido de carbono), SO₂ (Dióxido de azufre) y O₃ (Ozono). Los mismos abarcan en gran medida a la actividad industrial, tráfico vehicular, aglomeraciones, incendios, quema de desechos, entre otros (contaminación artificial producto del ser humano), convirtiendo a la actividad humana en unos de los principales contaminantes ambientales.

Adicionalmente para el año de 1972, la OMS declara que la contaminación acústica es una realidad y la convierte en un contaminante general para las personas, dando a concentraciones elevadas del mismo en zonas que conllevan mayor actividad humana como lo son: industrias, eventos sociales, etc. De igual forma, investigaciones realizadas convierten al ruido natural en una causa para las alteraciones del ciclo de sueño, su profundidad y su despertar. La forma de medir la intensidad de ruido en el ambiente es el decibelio (dB) clasificando al ruido desde muy bajo (30 dB), bajo (40 dB), ambiente ruidoso (50 a 75 dB), ruido fuerte (80 a 100 dB), ruido molesto (100 a 105 dB) y ruido insoportable (106 a 140 dB), en los cuales cada uno contempla un diverso escenario y circunstancia. El efecto generado respecto a este contaminante está relacionado con la intensidad y tiempo de

exposición, llegando a deteriorar la capacidad auditiva e impidiendo el correcto entendimiento de los sonidos de interés(Quispe Julio et al., 2021).

El principal objetivo de este trabajo es el de implementar una red de sensores que permitan recabar información de los niveles existentes de contaminación en el casco céntrico de la ciudad de Loja, utilizando para ello tecnologías de recolección de datos contaminantes (sensores de gases y de ruido), considerando tecnologías inalámbricas de baja potencia o sus siglas en inglés Low Power Wide Area Network (LPWAN). Estas tecnologías exhiben atributos y capacidades que se ajustan a las necesidades de consumo eficiente de energía y transmisión confiable y segura de datos. Además, son capaces de operar durante extensos lapsos y cubrir grandes distancias, todo ello con una implementación asequible en investigaciones, servicios generados y recopilación de datos de interés. Para llevar a cabo la implementación del sistema, se definen parámetros que incluyen aspectos como casos de estudio (tecnologías LPWAN, plataformas IoT, calibración de sensores, ubicaciones de implementación, nivel de cobertura, entre otros) y procesos de desarrollo (construcción del prototipo, implementación y programación basada en objetos). Estos parámetros se diseñan teniendo en cuenta los factores a los que el prototipo de recolección de datos será sometido. Además, el prototipo se configura para operar durante un período de 30 días en cada área cubierta, y se sitúa en el exterior, considerando así los diversos aspectos climáticos a los que estará expuesto en esa zona.

Mediante el análisis de los datos recopilados en una muestra representativa de toda la ciudad de Loja, se evalúa el nivel de contaminación en las áreas medidas. Esto implica determinar si se sitúan por debajo del promedio o, en algunos casos, exhiben niveles de contaminación superiores a lo habitual. Estas variaciones se deben a la existencia de un nivel moderado de contaminación ambiental, motivo por el cual la Organización Mundial de la Salud establece directrices para su regulación y protección de la salud pública.

Además, los datos obtenidos resultan valiosos para diversos proyectos relacionados con temáticas similares, así como para encontrar soluciones efectivas en la reducción de contaminantes acústicos y atmosféricos en la ciudad de Loja. En consecuencia, estos

resultados brindan información relevante y útil para futuras investigaciones y esfuerzos orientados hacia un ambiente más limpio y saludable en beneficio de la comunidad.

Objetivo general

- Implementar una red de sensores WSN (Wireless Sensor Network) en el casco céntrico de la ciudad de Loja con la ayuda de tecnologías LPWAN (Low Power Wide Area Network) para recabar datos sobre la contaminación atmosférica y acústica en el ambiente.

Objetivos específicos

- Efectuar una revisión bibliográfica, concerniente a: contaminantes en el aire y niveles excesivos de ruido, redes de sensores WSN y tecnologías LPWAN.
- Diseñar e implementar una red WSN, basado en tecnologías LPWAN.
- Analizar estadísticamente los datos de contaminación con ayuda de plataformas IoT (Internet de las Cosas) y concluir en función de lo obtenido.

4 Marco Teórico

4.1 Contaminantes

La contaminación ambiental es provocada por la presencia de partículas nocivas para la salud de los seres vivos, las cuales pueden ser químicas, físicas o biológicas, dispersas en el medio natural (bosques, montañas, ríos, lagos, aire, etc.) o artificiales (edificios, máquinas, casas, carreteras, etc.). La contaminación ambiental es causada principalmente por actividades humanas, como la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera o la sobreexplotación de los recursos naturales (Cuidemos el Planeta, 2018).

El aumento de contaminación ambiental es debido a la manipulación del hombre sobre los recursos existentes en el planeta, según (Cuidemos el Planeta, 2018) existen diversas fuentes antropogénicas (actividad de contaminación producida por los humanos): la desmedida tala de árboles, el verter y emitir residuos industriales hacia la atmósfera e hidrosfera, extraer, procesar y refinar combustibles fósiles como lo son: petróleo, carbón y gas natural, crear energía con combustibles fósiles y otras fuentes no renovables, el uso de automóviles u otros medios de movilidad impulsados por gasolina o diésel, fabricación y uso inapropiado de plásticos y otros materiales que derivan del petróleo y arrojar plásticos y objetos no biodegradables en lugares naturales.

4.2 Contaminación atmosférica

4.2.1 Tipos de contaminantes

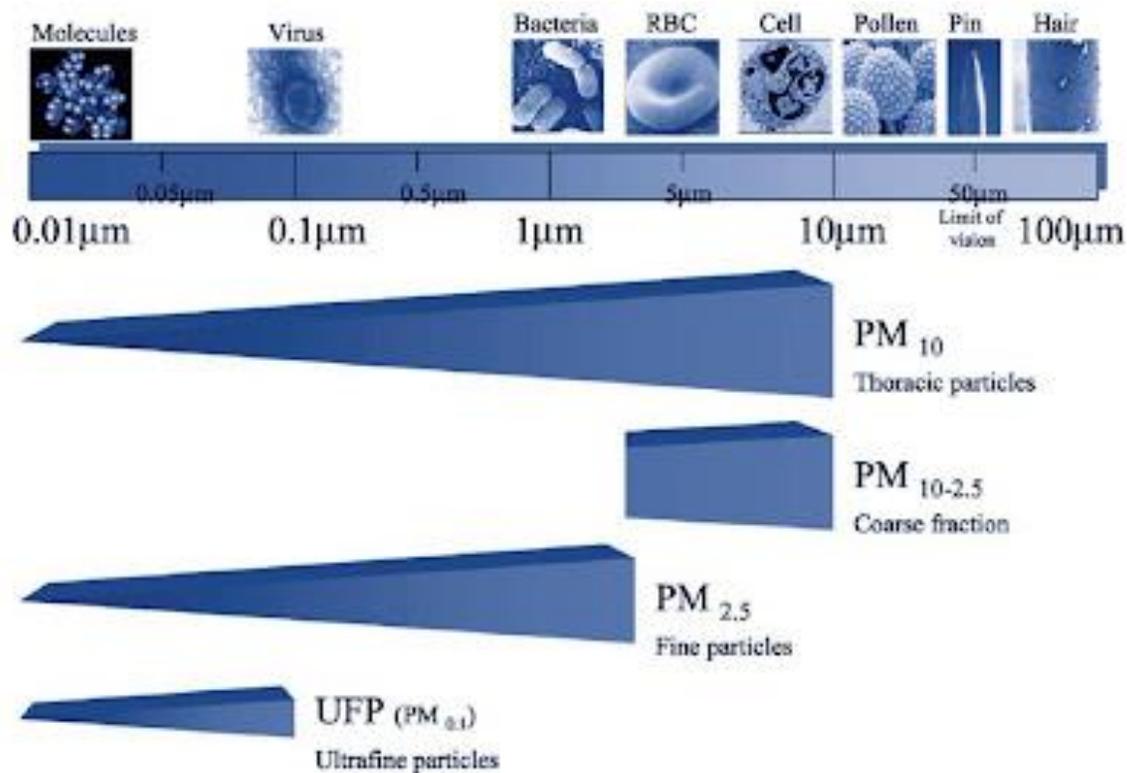
La OMS (Organización Mundial de la Salud) periódicamente publica directrices sobre los cinco tipos de contaminantes que tienen gran influencia en la calidad de vida del ser humano, destacando; MP (material particulado), O₃ (Ozono), NO₂ (Dióxido de Nitrógeno), SO₂ (Dióxido de Azufre) y el CO (Monóxido de Carbono) como principales contaminantes atmosféricos (contaminantes aéreos).

4.2.2 Material Particulado PM_{2.5} y PM₁₀

Está presente en las ciudades de forma líquida o gaseosa y expuestas en polvo, cenizas, hollín, cemento, polen, etc. y su terminología 2.5 y 10 está ligada al tamaño de la

partícula (2.5 μm y 10 μm). En donde Cristina Linares Gil del Centro Nacional de epidemiología en Madrid expone que <<aunque no se miden en muchas ciudades, el material particulado en suspensión de menos de 2,5 micrómetros (PM_{2.5}) parece ser un mejor indicador de la contaminación urbana que el PM₁₀ utilizado hasta ahora>> (Linares Cristina, 2008), esto debido a que las mismas provienen de las emisiones que causa la combustión de vehículos de diésel en zonas urbanas y al mismo tiempo tienen mayor penetración hacia las vías respiratorias.

Figura 1.
Tamaños para partículas más pequeñas a las de un cabello humano



Nota. Clasificación de partículas según su tamaño (tomado de bit.ly/3ozZApz) (Linares Cristina, 2008).

Según la OMS con respecto al material particulado (MP) hace mención a que <<no se han identificado umbrales y dado que hay una variabilidad interespecífica sustancial en la exposición y en la respuesta a una exposición>> (OMS, 2005), lo cual genera que las

directrices expuestas varíen su efectividad con respecto a las cantidades de exposición con respecto al MP.

El MP10 (material particulado de 10 micras), es el representante de los MP, ya que engloba MP de 2.5 micras (MP2.5) hasta un límite de 10 micras. Las MP2.5 son producidas por procesos de combustión comúnmente en entornos urbanos, en cambio las MP10 llegan a generarse en procesos mecánicos como; construcciones, suspensión de polvo en caminos y viento. En la mayoría de entornos urbanos están presentes estas partículas gruesas (MP10) y finas (MP2.5), aunque la variabilidad del tamaño de estas partículas dependerá de cada ciudad en todo el mundo, debido a su geografía, meteorología y fuentes específicas de dicha partícula.

A nivel de estudios epidemiológicos las MP10 se convierten en el principal objeto de análisis, en los cuales las GCA (Guías de Calidad de Aire en inglés AQG – Air Quality Guidelines), exponen que << Los valores guía para el MP2,5 se convierten a los valores guía correspondientes para el MP10 aplicando una razón MP2,5/MP10 de 0,5>> (OMS, 2005). El valor de la razón de 0.5 comprende a países que están en vías de desarrollo, lo cual representa el límite inferior de una media propuesta, en la cual el límite superior, la cual es la razón de 0.8, vendría siendo ocupada por países desarrollados.

Cabe destacar que estos valores pueden variar, dependiendo de los estudios realizados en las localidades, generando una nueva razón para las MP. La GCA proporcionan guías relacionadas con periodos de exposición breves (24 horas) y prolongadas (media anual), para el material particulado.

4.2.2.1 Exposiciones prolongadas. Para las guías se establece que el valor para una exposición prolongada anual sería de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (5 microgramos por metro cúbico), el mismo sería actualizado por la OMS en las GCA del 2021, así mismo se establecen metas intermedias las cuales ayudan a determinar la consecuencia a una exposición prolongada en cada una de estas cantidades

4.2.2.2 Exposiciones de corta duración. En la mayor parte de los países se suele usar datos de exposición prolongadas (anuales) antes que las de corta duración (24 horas), debido a que las concentraciones bajas de MP son una mejor forma de evitar enfermedades relacionadas con estas partículas. De igual forma la OMS expone en sus nuevas GCA 2021 un valor de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (15 microgramos por metro cúbico), en un lapso de 24 horas.

Nota. el aire tiene una densidad de $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ en ambientes de 20°C , este valor es variable conforme se varíe su temperatura y aumente la altitud, el material particulado sin embargo no tiene una densidad definida, sin embargo, se las conoce como partículas en suspensión, esto debido a que pueden flotar en el aire por largos periodos de tiempo (EPHysLab, 2020).

4.2.3 *Ozono O₃*

Definida como molécula Triatómica conformada por átomos de oxígeno, considerado como un poderoso oxidante de rápida reacción frente a otros compuestos químicos y su vez muy inestable si se encuentra en gran concentración. En condiciones normales, esta molécula pasa a ser oxígeno diatómico en un lapso de 30 minutos. El ozono se encuentra en la atmósfera en bajas concentraciones, siendo este vital para la vida. Gran parte de este material molecular se encuentra a 20 km de la superficie en una región de la estratosfera llamada ozonósfera, en donde se concentra un 90% de este material, el cual evita el paso de la radiación ultravioleta proveniente del sol, logrando de esta manera evitar afecciones a la salud debido a la radiación.

Según la dirección de monitoreo atmosférico de la ciudad de México (CDMX) en su publicación detalla que <<al nivel de la superficie, el ozono en altas concentraciones es un contaminante del aire que provoca efectos nocivos en la salud humana, las plantas y los animales. Tiene además una contribución al calentamiento global>>(CDMX, 2016).

El ozono es considerado como un oxidante encontrado en los niveles más bajos de la atmósfera, llega a producirse por otros compuestos mediante la intervención de la luz solar y es capaz de oxidar materiales orgánicos (tejidos vivos) e inorgánicos (metales). Es un compuesto altamente peligroso que afecta a gran medida por su pronta reacción ante otros compuestos (degradando su composición – oxidándolos).

Enrique Mantilla en su publicación del CEAM (Fundación de la Comunitat Valenciana - Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo) redacta que << afecta tanto a los materiales como a los propios seres vivos, que se ven expuestos a su acción, externamente pero también internamente, en el intercambio de gases que tiene lugar por la respiración>>(Enrique Mantilla, 2022, p. 11). Cabe mencionar que la experimentación propuesta para el análisis de este tipo de contaminante, arroja un resultado positivo en el caso de las personas que mantienen afecciones previas, relacionadas a la capacidad respiratoria y alteración pulmonar, como es el caso de los asmáticos e influye en el desarrollo pulmonar de los niños.

El incremento de emisiones provocadas por actividad humana como lo es el tráfico vehicular, las industrias, disolventes industriales, etc. en los últimos años, ha logrado un incremento significativo de la generación de ozono en la superficie baja del planeta.

Figura 2.
Ozono, molécula triatómica encontrada a 20 km de la superficie terrestre



Nota. Esta molécula es encontrada en su mayoría por encima de la troposfera y es de gran importancia para evitar el paso de la radiación debidos a los rayos del sol (tomado de bit.ly/45EGzTt) (Junta de Castilla y Leo, 2019)

El ozono mantiene graves afecciones a la salud, partiendo del hecho que genera una reacción al entrar en contacto con ciertas moléculas biológicas, lo que puede llevar a la formación de radicales libres (aldehídos, peróxido de hidrógeno, entre otros). En el caso de que el ozono se adentre en el tracto respiratorio llegará a producir daño en el mismo, esto dependiendo de las condiciones y el tiempo de exposición al mismo.

La razón de este daño es que el contaminante mantiene un efecto directo con el sistema inmunológico a través de las vías respiratorias, y debido a la exposición aguda y crónica al ozono, se produce una disminución del aclaramiento mucociliar, creando una vía invasiva de microbios y microorganismos que puede conducir a la enfermedad.

La medición de concentraciones de ozono en el ambiente es realizada por fotometría ultravioleta, por medio de una propiedad de las moléculas del ozono la cual es la de absorber parte de la radiación ultravioleta (escudo natural contra los rayos ultravioleta del sol), la misma permite cuantificar la concentración ambiente en función de disminución de la misma.

Nota. el ozono posee una densidad de 2.14kg/m³ dando por hecho que supera los 1.2kg/m³ del aire dando como resultado un gas que desciende hacia la superficie (Lenntech, 2023).

4.2.4 Dióxido de Nitrógeno NO₂

Es un compuesto químico formado por una molécula de nitrógeno y dos de oxígeno y es considerado uno de los principales contaminantes atmosféricos, y es generado como un subproducto en los procesos de combustión a altas temperaturas, ya sea en vehículos automotores, en plantas eléctricas, en humos de soldaduras, en la agricultura (fertilizante), en minería (explosivos) y según el Instituto Nacional de Salud y Seguridad en el Trabajo (INSST) <<también se encuentra en el humo del tabaco, por lo que la exposición a NO₂ es frecuente tanto en ambientes laborales como en extralaborales>>(INSST, 2018).

Al ser considerado un contaminante atmosférico representa afecciones graves a la salud, generalmente causa daño a los animales y humanos que mantienen un nivel de contacto excesivo con el mismo, y su forma de ingreso se lleva a cabo por las vías respiratorias en un 90%, llegando a incorporarse en el metabolismo del huésped.

Este compuesto al tener un contacto directo con el agua cambia su composición lentamente, llegando a formar ácido nítrico y nitroso, los mismos son irritantes y corrosivos para el ser humano, lo que causa fuertes quemaduras o irritaciones en la piel y ojos. El contaminante en cuestión, al ser ingerido mediante vías respiratorias, forma los ácidos mencionados y a su vez el NO₂ puede permanecer dentro de los pulmones durante un largo periodo de tiempo.

Nota. la densidad relativa del nitrógeno es de 1.58 veces la del aire, dando un total de $1.58 \times 1.2 \text{kg/m}^3 = 1.896 \text{kg/m}^3$, en conclusión, este gas tiende a descender (INSST, 2018).

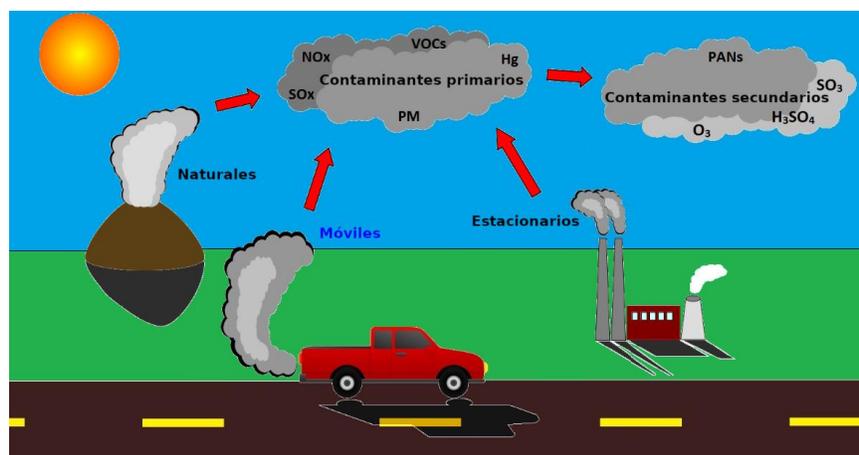
4.2.5 Dióxido de Azufre SO₂

Se basa en un compuesto agrupando una molécula de azufre por dos de oxígeno, se muestra en forma de gas incoloro y denota como principal característica un olor irritante. El dióxido de azufre conlleva propiedades desinfectantes y fue utilizado de esta forma durante varios siglos, por ejemplo, los barriles de vino se quemaban con azufre dentro del mismo, también se utiliza en la industria alimentaria como conservante y antioxidante, típicamente en zumos, frutos secos, mermeladas, vino, etc.

El INSST define que <<el dióxido de azufre penetra en el organismo por inhalación. Este gas, muy soluble en agua, se hidrata rápidamente, se disocia en los iones sulfito y bisulfito y se absorbe en el tracto respiratorio superior>>(INSST, 2014). La forma en que actúa el SO₂ en el cuerpo es principalmente a través de la inhalación por la nariz y la boca, y luego llega al torrente sanguíneo, donde se distribuye por todo el cuerpo, y el hígado reacciona principalmente oxidando el compuesto, convirtiéndolo en sulfato. La mayor parte del anhídrido sulfuroso se elimina antes de llegar al organismo, y la parte que logra ingresar al organismo se excreta en la orina.

El óxido de azufre irrita las membranas mucosas porque se disuelve fácilmente para formar ácido sulfuroso (que se asocia con la lluvia ácida). Esta exposición causa broncoconstricción, principalmente debido a una mayor resistencia al flujo de aire (respiración forzada). Los síntomas incluyen tos, dificultad para respirar, ojos llorosos, dolor de garganta, ardor en la nariz, los ojos y la garganta.

Figura 3.
Contaminantes primarios y secundarios



Nota. La combinación de diferentes compuestos como lo son el humo de volcanes, fábricas y automotores da paso a la generación de diferentes químicos entre ellos el NO₂, SO₂ y O₃ (tomado de bit.ly/3qpSLam) (*Contaminante - Enciclopedia de Energía*, 2022).

Este compuesto se lo denomina también como un contaminante primario junto con otros, que resultan de forma natural (volcanes) y artificial (industrias, automóviles, etc.), los cuales provocan que en el proceso de combustión se generen una serie de compuestos químicos, entre ellos destacan: SO_x (óxidos de azufre), NO_x (óxidos de nitrógeno), VOCs (Compuestos orgánicos volátiles), Hg (Mercurio) y PM (material particulado). Los contaminantes primarios al entrar en contacto con agua, aire y procesos de oxidación se transforman en contaminantes secundarios entre ellos destacan: H₂SO₄ (ácido sulfúrico – compuesto extremadamente corrosivo), SO₃ (trióxido de azufre), PANs (Nitrato de peroxiacilo) y O₃(ozono).

Los contaminantes secundarios provocan lo que comúnmente se conoce como lluvia ácida (lluvia, nieve, agua nieve, granizo y neblina), que no es más que la ausencia de PH básico lo cual provoca que su consistencia este únicamente formada por PH ácido, llegando a generar daños en el medio al cual se ve expuesta este fluido ácido, generando daños a la vegetación, ecosistemas de agua dulce y estructuras artificiales y naturales. También llega a provocar una alerta en la naturaleza, debido a que su exposición provoca enfermedades respiratorias en los humanos y fauna marina (lagos, ríos, etc.) provoca la muy probable disminución o que no exista población animal en dichos ecosistemas.

Nota. la densidad del Dióxido de Azufre es de 2.26 veces la del aire, ($2.26 \times 1.2\text{kg/m}^3 = 2.712\text{kg/m}^3$), siendo la misma, más pesada que el aire por lo tanto tiende a descender hacia la superficie terrestre (INSST, 2014).

4.2.6 Monóxido de carbono CO

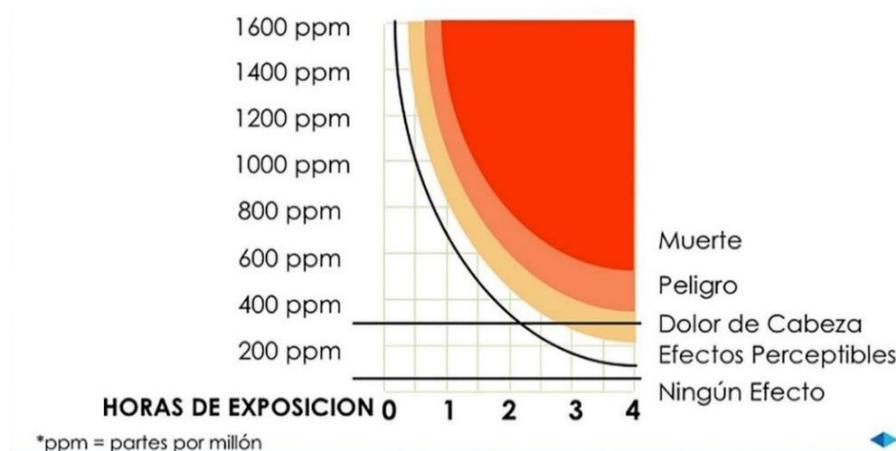
Denominado como gas y descrito como no irritante, sin color o sabor y se lo puede encontrar en espacios cerrados o al aire libre. Se la consideraría como una combustión incompleta del carbón, la misma se daría de forma natural (en volcanes, incendios, etc.) o generada por el ser humano (tubo de escape en automotores, viviendas, chimeneas, hornos, entre otros).

Una vez liberado al medio ambiente, el CO entra al aire y luego a la atmósfera durante 2 meses antes de convertirse en CO₂ (dióxido de carbono). Esta reacción ocurre porque otros compuestos que se encuentran en la atmósfera actúan junto con el CO para convertirlo en CO₂. Otros organismos que se encuentran en el suelo y el agua también son fuentes de dióxido de carbono.

De forma general, en las acciones que se realiza día con día, las personas se ven expuestas a pequeñas dosis de CO, y su dosis es variable en función a la hora del día y así como también el lugar donde se encuentre (tráfico, vehículos, aglomeraciones así mismo, el CO se lo encuentra en las combustiones de gas y madera, y puede llegar a ser peligroso si los espacios donde esto ocurre son en lugares con poca ventilación.

El contaminante actúa rápidamente en el individuo que lo inhala, entrenado en sangre, cerebro y músculo, según la definición del ATSDR (Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades - Agency for Toxic Substances and Disease Registry) con respecto al CO es que el <<respirar niveles altos de monóxido de carbono puede ser fatal. Respirar niveles de monóxido de carbono más bajos puede causar daño permanente del corazón y el cerebro>>(ATSDR, 2012), inclusive se han dado casos que el mismo CO induce al aborto y provoca que el desarrollo mental del feto se deteriore.

Figura 4.
Efectos del monóxido de carbono, concentración vs exposición



Nota. 1600ppm de CO estaría basado en ambientes sin nada de ventilación logrando que el oxígeno en el entorno se desplace quedando únicamente el CO, provocando una muerte por envenenamiento en poco tiempo, (tomado de bit.ly/3WMuiZ8) (Rocha Laura, 2018).

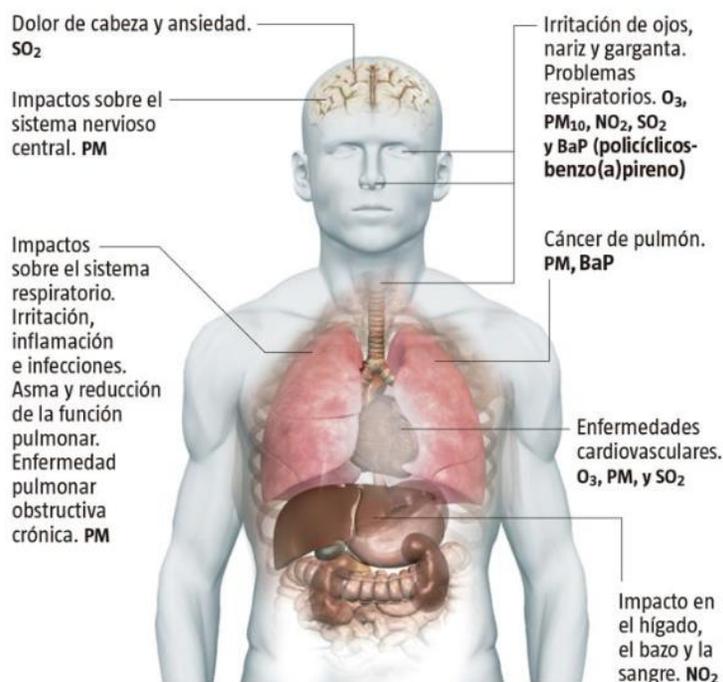
Este compuesto de dióxido de carbono contribuye en gran medida al calentamiento global y, a su vez, es un factor importante para el crecimiento de las plantas. En definitiva, se le conoce como contaminante físico por los efectos climáticos provocados por cantidades excesivas en la atmósfera, pero a la vez Medina Valtierra señala que <<es descartado como un contaminante químico, ya que no sufre reacciones por ser inerte a las condiciones ambientales>> (Medina Jorge, 2010).

Nota. La densidad del Monóxido de Carbono es de 0.967 veces la del aire ($0.967 \times 1.2\text{kg/m}^3 = 1.1604\text{kg/m}^3$) lo cual resultaría menos denso que el aire y el mismo tiende a subir en relación al aire (Linde, 2023).

4.2.7 *Directrices de la calidad del aire*

Está correcto decir que la calidad de vida de las personas es afectada directamente por la contaminación existente en el ambiente, en donde la OMS (Organización Mundial de la Salud) expone un documento <<Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire>> la cual menciona que la morbilidad (mala salud) en el mundo está asociada con la exposición a contaminantes atmosféricos (contaminantes en el aire), la misma tiene un enorme impacto para la salud humana: llegando a calcular que su exposición genera en cada año millones de muertes y de años de vida saludable perdidos, llegando a aumentar la morbilidad y mortalidad debidas a enfermedades cardiovasculares, respiratorias, cáncer al pulmón y últimamente se encuentran consecuencias a otros tipos de órganos (OMS, 2021).

Figura 5.
Impacto en la salud contaminación en el aire



Nota. Cada compuesto químico mantiene una reacción diferente a cada una de las partes que componen al cuerpo humano, (tomada de bit.ly/3OYLska) (Alegre Alberto, 2022).

En 1987 la OMS empieza a publicar de manera periódica las directrices sobre la calidad del aire, previniendo de esta manera a los gobiernos a buscar una solución en sus respectivos sectores sobre la contaminación existente en el aire y sus efectos adversos. Este documento contiene información sobre los principales contaminantes atmosféricos, como son: MP (material particulado), O₃ (Ozono), NO₂ (Dióxido de Nitrógeno), SO₂ (Dióxido de Azufre) y el CO (Monóxido de Carbono) (OMS, 2021b).

Tabla 1.
Niveles recomendados sobre la calidad del aire y metas intermedias

Contaminante	Tiempo promedio	Meta intermedia				Nivel de directrices sobre la
		1	2	3	4	calidad de aire 2021
MP_{2.5} $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Anual	35	25	15	10	5
	24 horas	75	50	37.5	25	15
MP₁₀ $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Anual	70	50	30	20	15
	24 horas	150	100	75	50	45
O₃ $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Temporada alta	100	70	-	-	60
	8 horas	160	120	-	-	100
NO₂ $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Anual	40	30	20	-	10
	24 horas	120	50	-	-	25
SO₂ $\mu\text{g}/\text{m}^3$	24 horas	125	50	-	-	40
CO mg/m^3	24 horas	7	-	-	-	4

Nota. La meta intermedia sugiere que las concentraciones de contaminantes no deben exceder el rango 1 (el rango 1 es tolerable), de lo contrario es perjudicial para la salud de las personas, (tabla tomada de bit.ly/3qoGdjO) (OMS, 2021b).

Tabla 2.
Tiempos promedios para exposición a factores contaminantes vigentes

Contaminante	Tiempo promedio	Directrices de calidad de aire
$NO_2 \mu g/m^3$	1 hora	200
$SO_2 \mu g/m^3$	10 minutos	500
	8 horas	10
$CO mg/m^3$	1 hora	35
	15 minutos	100

Nota. (tabla tomada de bit.ly/3qoGdjO) (OMS, 2021b). Los siguientes datos presentan tiempos promedios cortos los cuales fueron presentados en las directrices del 2005, sin embargo, al no realizar nuevas pruebas, las mismas siguen siendo válidas para promedios cortos sobre contaminantes NO₂, SO₂ y CO.

A continuación, se mencionará un contaminante en particular, el cual en el año de 1972 sería catalogado como un contaminante en dentro de las zonas urbanas denominado como ruido.

4.3 El ruido

Es la variación del en relación a su nivel de exposición, el mismo puede ser causado de forma natural (sonidos creados por el medio ambiente) y artificial (generado por actividad humana en industrias, tráfico vehicular, aglomeraciones, etc.), se emplea la escala en decibelios (dB) para su medición.

4.3.1 Contaminación Acústica

El ruido es molesto y no necesariamente debe tener niveles excesivos para serlo, denominado como un sonido no deseado que tiene percusión al aparato auditivo y bienestar psíquico, llegándose a convertir en uno de los grandes contaminantes en la sociedad moderna a escala global. Para el año de 1972 la OMS declara y cataloga al ruido como un contaminante general, posteriormente en 1979 la conferencia de Estocolmo llega a categorizar al ruido

como un contaminante específico. Hoy en día es considerado la principal causa de contaminación en Francia y la segunda en Europa.

La OMS llega a considerar que una escala aceptable de ruido es de 50 dB, si se considera un incremento de 10 dB a este límite, el oído percibirá un incremento del doble de sonido. Según estudios realizados en la unión europea por Isabel Álvarez, <<80 millones de personas están expuestos diariamente a niveles de ruido ambiental superiores a 65 decibeles, Fracción Audible, otros 170 millones, lo están a niveles entre 55-65 dB>>(Álvarez Isabel, 2017), de igual forma, el ruido que se percibe para las personas es diferente dependiendo de las circunstancias como de sus rasgos genéticos, en donde puede influir la edad y la formación de la cóclea en el oído medio. Los niños, al encontrarse en una edad de formación, llegan a ser mucho más sensibles a la contaminación acústica.

El sonido viaja por medio de ondas a través del aire, llegando a producir vibración en el tímpano del ser humano, que a su vez transfiere estas vibraciones a los huesos del oído, encargados de interpretar los sonidos por medio de estimulaciones en las terminales nerviosas expuestas en la cóclea (oído interno), para ser llevadas como impulsos nerviosos hasta el cerebro.

4.3.2 Clasificación del ruido según sus niveles

El ruido al ser un contaminante mundial tiene diferentes fuentes de creación, según los niveles existentes de ruido en diferentes ambientes (ya sea en exterior o interior), ruido ambiente o artificial, tomando en cuenta variables de entorno (zonas rurales y urbanas) y nivel de contaminación acústica (variación excesiva de sonido), se lo llega a clasificar en:

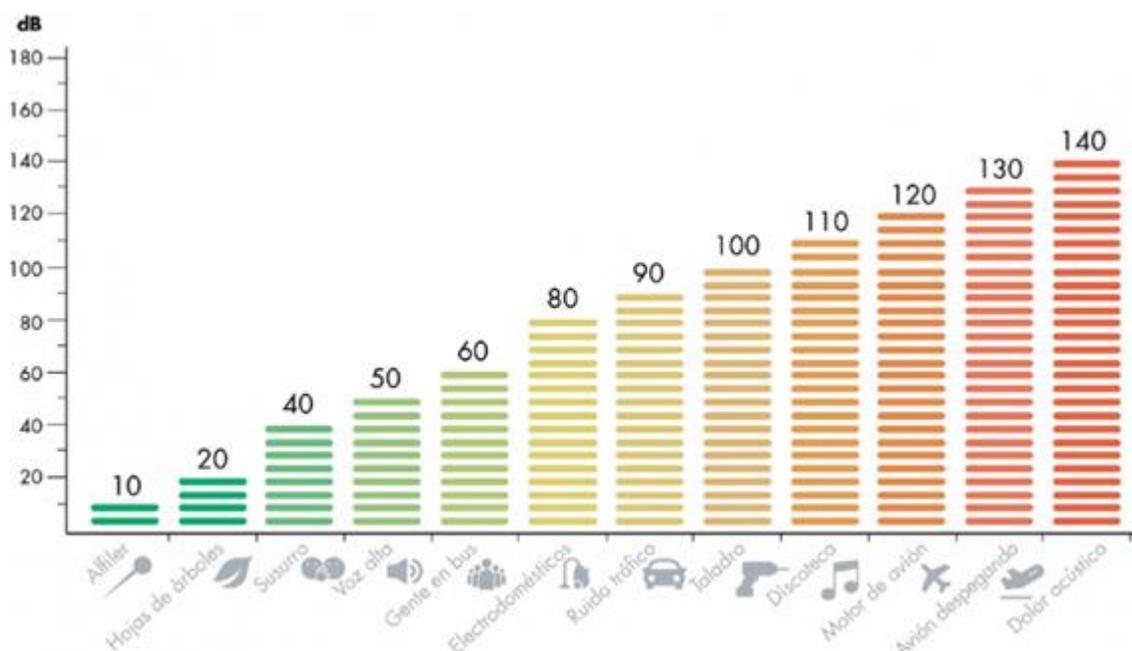
Tabla 3.
Clasificación de ruido según sus niveles en ambientes controlados

Ruido	Considerado	Decibelios (dB) promedio
Crujido de las hojas de los árboles y susurros	Ruido muy bajo	30
Ruido normal del hogar	Ruido bajo	40
Exterior viviendas, voz alta, gente en bus	Ambiente ruidoso	50
Ruido de oficina, licuadora	Ambiente ruidoso	60
Tráfico, industrias	Ambiente ruidoso	75
Mucho tránsito, restaurante ruidoso.	Ruido fuerte	80–89
Tren subterráneo, conversación a los gritos.	Ruido fuerte	90–95
Vehículos todo terreno, motocicletas	Ruido fuerte	96–100
Baile escolar	Ruido molesto	101–105
Motosierra, soplador de hojas.	Ruido insoportable	106–115
Público deportivo, concierto de rock.	Ruido insoportable	120–129
Carreras de automovilismo	Ruido insoportable	130
Disparos de arma de fuego.	Ruido insoportable	140

Nota. Tabla propietaria del autor (datos obtenidos de bit.ly/42hJnDg) (Cigna, 2022).

Tomando en cuenta los niveles perjudiciales para la salud, en el caso de pérdida de audición Julio Quispe expone que <<existe cierto riesgo de pérdida de audición en niveles superiores a 80 dB durante 8 horas al día y varios años de exposición>>(Quispe Julio et al., 2021), por ende, la precaución para con niveles de ruido fuerte en adelante se vuelve una regla a seguir durante todo el día a la hora de realizar cualquier actividad humana durante que conlleve ruidos fuertes e intolerables.

Figura 6.
 Clasificación del ruido debido a los rangos en decibelios



Nota. A medida que el ruido pasa de los 50 dB a los 60 dB se vuelve molesto y tiene efectos para la salud de las personas (tomado de bit.ly/3INaQz5) (knaufinsulation, 2023).

4.3.3 Consecuencias debidas al ruido

El ruido fuerte e intolerable considera una alteración a nivel psicológico de la persona expuesta, ocasionando para ello: estrés insomnio, hipertensión arterial, irritabilidad, entre otros. En si el ruido se lo considera molesto, cuando impide el correcto entendimiento de aquel sonido que se desea escuchar, el mismo puede ser reflejado cuando encuentra obstáculos para llegar hasta el individuo final, atenuando su nivel de energía, llegando al final con menos de su potencia inicial.

El ruido al ser molesto puede causar:

- Incomodidad. La misma es causada por sensaciones de interferencia con la actividad realizada, en donde entran los ruidos chirriantes, estridentes, etc. Estos llegan a causar depresión, inquietud, rabia, ansiedad, entre otro.

- Somnolencia. La perturbación del sueño llega a ser causado por ruidos ambientales que provocan alteraciones a los ciclos de sueño, profundidad y al despertar. Sus efectos fisiológicos datan los incrementos rítmicos del corazón, arritmia cardiaca y alteración en la respiración.
- Mala Audición. Es el excedente de ruido que llega a notarse tras incurrir en su umbral, para una persona adulta este umbral llega a estar entre los 140 dB mientras que para los niños es de 120 dB, luego de superar este umbral y también según su nivel de exposición en: tiempo (años) y la susceptibilidad de la persona, llega a perjudicar la capacidad auditiva deteriorando la misma a niveles acelerados.

En el siguiente apartado se hará mención sobre tecnologías que ayudan visualizar datos de contaminación, datos recolectados de diferentes sensores, con aplicaciones que destacan en cada uno de ellos, se hablara de las plataformas IoT y como llegaron a usarse en el presente proyecto.

4.4 Internet of Things (IoT)

El termino IoT surge en el año de 1999 en Procter y Gamble (P&G), dicha empresa busca consolidar sensores a la red con el fin de visualizar en línea parámetros relacionados a estos sensores, después de ello han pasado más de 20 años y la idea de IoT llega para reemplazar el termino máquina a máquina (M2M), dando lugar a la interconexión de dispositivos inteligentes y plataformas de gestión habilitando el mundo inteligente dentro de este entorno (Bernal Enrique, 2020).

IoT se inicia sobre la conexión existente entre millones de usuarios y dispositivos inteligentes por medio de la red (internet) en arquitecturas como: multi – plataforma, multi – tecnología y multi – protocolo, los mismos interconectarían casi cualquier aparato electrónico (social, industrial, académico, salud, etc.) dando la idea de conexión en cualquier lugar, objeto y momento. Aplicaciones que consideren IoT se diseñan bajo el hecho de brindar escalabilidad, privacidad, protección, transparencia, seguridad, confianza, fiabilidad, anonimato e integridad.

4.4.1 Capas de arquitectura IoT

IoT se construye alrededor de una arquitectura multicapas dando lugar a la conexión de dispositivos inteligentes los cuales darán su operación, estas capas son:

- **Capa de aplicación.** – Considera aplicaciones relacionadas a IoT, las cuales llegarían a ser controladas por sistemas computacionales en la nube para la gestión de grandes cantidades de información.
- **Capa de soporte de servicio y aplicaciones.** – Se subdivide en dos grupos:
 - a) Capacidades de soporte genéricos. – especifica funciones comunes como procesamiento y almacenamiento de datos.
 - b) Capacidades de soporte específicas. – atiende las necesidades particulares en diferentes aplicaciones, se basan en diferentes grupos con distintas funciones que se requieren en diferentes ámbitos de aplicaciones IoT.
- **Capa de red.** – Considera dos tipos de capacidades:
 - a) Capacidad de red. – conlleva funciones de control y conexión en red (control de acceso y recursos de transporte, gestión de movilidad, autenticación, autorización y contabilidad).
 - b) Capacidad de transporte. – se centra en proporcionar conectividad para la transmisión de información y datos específicos de los servicios y aplicaciones de IoT, así como la transmisión de información de gestión y control relacionada con IoT (Bernal Enrique, 2020).
- **Capa de dispositivo.** – Dispone de dos capacidades:
 - a) Capacidades de dispositivo. – denotando para ello a:
 - 1. Interacción directa con la red de comunicación: el dispositivo puede obtener y cargar información directamente a la red de comunicación, y también puede recibir información directamente desde la red de comunicación.
 - 2. Interacción indirecta con la red de comunicación: los dispositivos pueden recuperar y cargar información indirectamente a la red de comunicación a través de la función de puerta de enlace. Además, el

dispositivo puede recibir información indirectamente de la red de comunicación.

3. Redes ad hoc: en algunos casos, las entidades pueden crear redes ad hoc para mejorar la escalabilidad y la velocidad de implementación.
4. Modo Reposo y activo: las funciones del dispositivo deben tener mecanismos para pasar a los estados de suspensión y activación para ahorrar energía.

b) Capacidades de pasarela. – consideradas como:

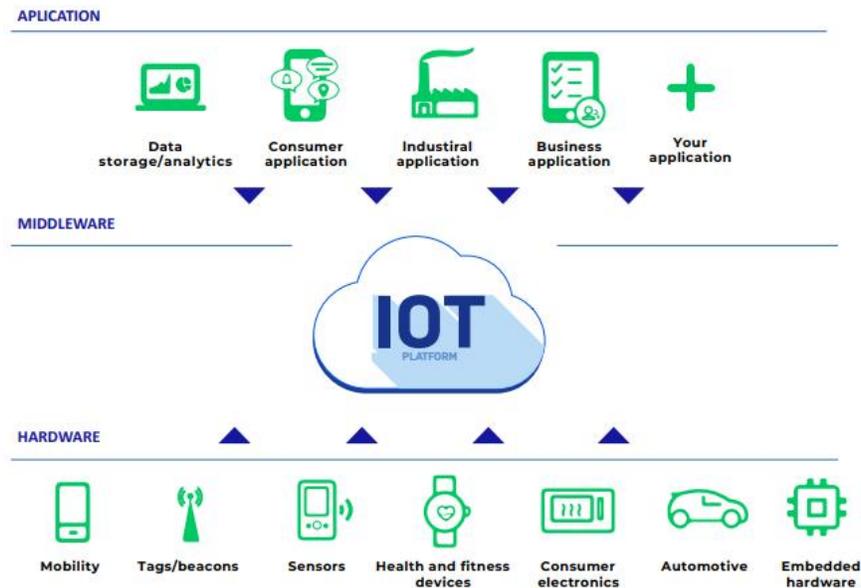
1. Compatibilidad con múltiples interfaces: a nivel de dispositivo, la función de puerta de enlace admite dispositivos conectados mediante diferentes tipos de tecnologías alámbricas e inalámbricas, como bus de red de área de control (CAN), ZigBee, Bluetooth o Wi-Fi. En la capa de red, la función de puerta de enlace puede comunicarse utilizando una variedad de tecnologías, como la red telefónica pública conmutada (PSTN), redes móviles de tercera o cuarta generación (3G o 4G), 5G (término de desarrollo a corto plazo), Ethernet, o una línea digital de abonado (DSL).
2. Conversión de protocolo: hay dos situaciones en las que se requieren funciones de puerta de enlace; una es la comunicación de la capa del dispositivo usa diferentes protocolos, como los protocolos de tecnología ZigBee y Bluetooth, y la otra es la comunicación, involucra una capa de dispositivo y una capa de red, cada una usando diferentes protocolos, como el 3G o 4G ZigBee. protocolo de tecnología en la capa de dispositivo y la capa de red.

4.4.2 Plataformas IoT

Las plataformas IoT consisten en una arquitectura multicapa, es decir, conlleva múltiples tecnologías permitiendo la gestión, abastecimiento directo y que los dispositivos conectados dentro de la IoT trabajen de manera autónoma. Estas plataformas por medio de capas de arquitectura y tecnología logran analizar, almacenar, procesar y ofrecer datos

recabados de sensores, redes de sensores (WSN), tecnologías LPWAN, entre otros, que generalmente se relacionan con IoT (COITAOC, 2021).

Figura 7.
Concepto de plataforma IoT



Nota. Consideradas como una plataforma middleware es decir crea un enlace entre las aplicaciones (software) y los dispositivos (hardware), proporcionando herramientas para el análisis de datos. Los datos obtenidos del hardware son transmitidos hacia la nube para ser procesados a nivel de aplicación y viceversa se transfieren instrucciones desde la aplicación al dispositivo (tomada de bit.ly/3qqdEck) (COITAOC, 2021).

4.4.3 Tipos de plataformas IoT

A la hora de elegir una plataforma IoT se deben tomar diversos parámetros que ofrecen los proveedores para su funcionamiento, entre estos tenemos:

- a) **Tipo de servicio.** Los servicios de cada plataforma difieren en cuanto control el usuario tenga sobre ella, para el uso de herramientas de gestión y monitoreo, como lo son:
 1. **Servicio IaaS (Infrastructure as a Service).** Existe mayor control sobre las aplicaciones y sistemas operativos a los que el desarrollador

puede acceder, la plataforma solo se encarga de recibir y almacenar los datos.

2. **Servicio PaaS (Plataform as a Service).** – el proveedor ofrece entornos para la creación y distribución de aplicaciones para que el desarrollador pueda elegir los entornos de desarrollo que le convengan.
3. **Servicio SaaS (Software as a Service).** – el desarrollador se ve limitado al uso de las aplicaciones, solamente puede utilizarlas a nivel de APIs (mecanismos de comunicación entre dos componentes de software) que proporciona el proveedor.
4. **Gestión.** – la plataforma ofrece servicios de puesta en marcha, inventariado, configuración remota, etc.
5. **Capacidad.** – consta de herramientas para el control y gestión de grandes cantidades de datos, siendo apta para aplicaciones IoT con gran número de dispositivos finales.
6. **Seguridad.** – ofrece mecanismos de ciberseguridad (seguridad digital, protege la información digital, dispositivos y activos) y garantiza la privacidad de la información.
7. **Protocolos.** – varias plataformas soportan dispositivos cuyos protocolos se basan en área extensa y sus variaciones actualizadas (protocolos que no quedarán obsoletos de un momento a otro).

Tabla 4.
Plataformas IoT de código abierto

Plataforma	Descripción	URL
Nodo – Red	Herramienta visual para alinear el IoT, conectando dispositivos de hardware, API y servicios en línea de nuevas formas.	nodered.org
ThingsBoard	Es para la recopilación, el procesamiento, la visualización y la gestión de dispositivos de datos.	thingsboard.io
Kaa IoT Platform	Plataforma multipropósito, flexible para soluciones IoT de extremo a extremo, aplicaciones conectadas y dispositivos inteligentes.	kaaiot.com
Thingier	Proporciona una base de nube escalable para conectar dispositivos. Es compatible con todo tipo de tableros de hackers, como Frambuesa Pi, Intel Edison y ESP8266.	thingier.io
ThingSpeak	Las herramientas de ThingSpeak se utilizan para explorar patrones, relaciones y tendencias entre diferentes elementos de datos y mostrar información mediante gráficos, indicadores y tablas.	thingspeak.com

Nota. Tabla propietaria del autor (datos obtenidos de bit.ly/3MJUGhx) (Geekflare, 2022).

En el siguiente apartado se hará mención a una Red de sensores inalámbricos (WSN - Wireless Sensor Network) y cuál sería su aplicativo en este proyecto, el cual requiere de la recolección de datos contaminantes en una zona urbana.

4.5 Redes de sensores

4.5.1 Sensores

Un sensor es considerado como un dispositivo que tiene las facultades de medir propiedades físicas y químicas en el ambiente donde son implementadas, estas propiedades también se las conoce como variables de instrumentación las cuales son captadas por estos dispositivos (temperatura, aceleración, distancia, presión, fuerza, humedad, sonido, luminosidad, gases, etc.) dando lugar a una respuesta en relación a cada variable, interpretando la señal en una medida eléctrica cuantificable, las cuales pasan por un proceso para ser convertidas en estas variables eléctricas y previamente usadas en algún sistema de gestión y control (Medina Santiago, 2018).

4.5.2 *Redes inalámbricas de sensores (WSN)*

Las redes de sensores se han convertido en un sistema eficiente en ámbitos en los que se requiere de un monitoreo continuo en el ambiente implementado, esto referente a distintas variables encontradas en el entorno, su popularidad está sujeta a las características que proporciona dicha red, como lo son; bajos costos de implementación, soporte y mantiene un sistema flexible y escalable en tecnologías usadas en el despliegue.

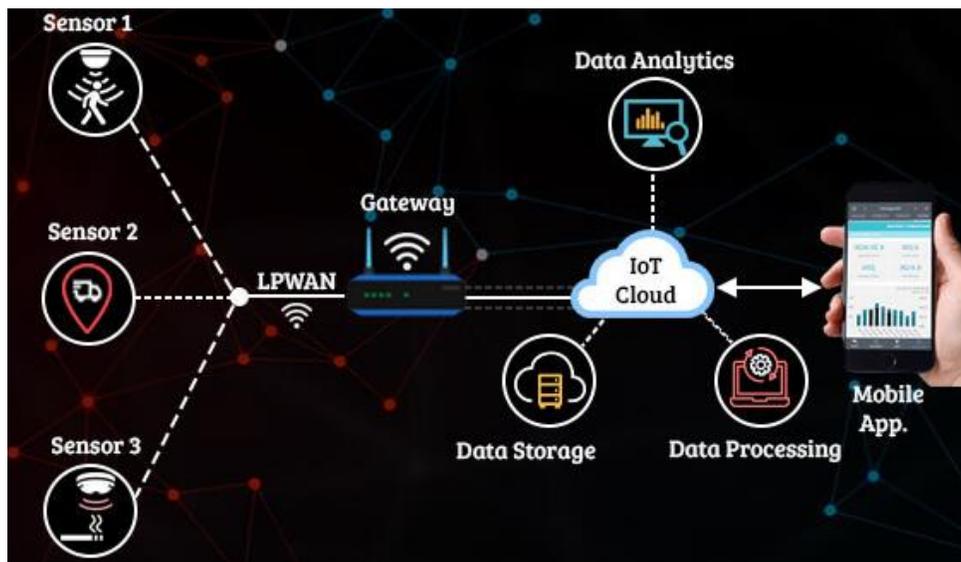
La red está formada por dispositivos que trabajan en conjunto para realizar una tarea específica, denominados también como nodos (sistema final que capta información relevante o de interés) los cuales transforman las señales de cada sensor y envían la información a un nodo sumidero denominado Gateway el cual gestiona la información y la lleva a internet (Romero Amondaray et al., 2020).

Los nodos son denominados como un sistema final debido a que funcionan en la parte final de la LPWAN, monitoreando el ambiente cada cierto intervalo de tiempo en casos de uso óptimo y en tiempo real en casos de máximo consumo y generación de datos, sus características conllevan un tamaño reducido, bajo consumo energético, poco almacenamiento y procesamiento de información y una comunicación a corta distancia (entre nodos) y larga distancia (nodo – Gateway), estas características dan por hecho una larga vida útil para los nodos.

La WSN se caracterizan por no tener infraestructura y ser una red desasistida, llegando a operar en lugares activos y críticos, sus nodos se distribuyen de manera geográfica en lugares de poco acceso o de gran relevancia a nivel de requerimiento, esto conlleva a que el mantenimiento en caso de fallas no se suscite en gran medida para la red.

Últimamente el papel de esta tecnología se vuelve esencial en las IoT (Internet de las cosas o sus siglas en inglés Internet of Things) pretendiendo la interconexión de dispositivos finales (motores, luces, sensores, etc) – Internet, con el fin de un trabajo en conjunto para llegar a sus objetivos previstos. La WSN es empleada con el fin de dar seguimiento a varios objetos en diversas aplicaciones como: Smart Cities (ciudades inteligentes), agricultura inteligente, asistencia médica inteligente, redes eléctricas inteligentes, entre otros.

Figura 8.
Estructura de una WSN



Nota. La estructura básica de una LPWAN está compuesta de un Gateway, varios nodos, WSN e infraestructura de ser necesaria (tomada de bit.ly/3oFfEWU) (PB Psiborg, 2022).

Las redes de sensores están sujetas a la estructura de un dispositivo final (nodo) equipado con múltiples herramientas de monitoreo (sensores), las cuales miden las condiciones en el ambiente para la generación de una respuesta a algún evento previsto, así mismo se ve sujeta a la comunicación inalámbrica con tecnologías LPWAN (redes de área amplia de baja potencia o por sus siglas en inglés Low Power Wide Area Network) que van desde el dispositivo final hasta la estación (Gateway) con el fin de difundir la información en la nube hacia cualquier plataforma IoT que esté relacionada con la interpretación de las tecnologías LPWAN.

También se considera posibles percances en la red relacionadas a características de uso y lugares de implementación representados en la siguiente tabla:

Tabla 5.
Características de las WSN y sus restricciones.

Característica	Implementación	Restricciones
Integración	Agricultura, medicina, minería, etc.	
Interacción	Redes vehiculares	
Comunicación Inalámbrica	Entre sensores y estación base	
Costo	Bajo y de fácil instalación	Energía, memoria, intervención humana y procesamiento
Vida útil	Largo	
Cobertura	Amplia	
Tiempo de respuesta	Rápido	
Precisión	Excelente	
Seguridad	Excelente	

Nota. las características de uso y los lugares de implementación todas se ven sujetas a las mismas restricciones. Tabla propietaria del autor.

4.5.3 LPWAN (Low Power Wide Area Network)

Las tecnologías LPWAN son consideradas una nueva forma de comunicación inalámbrica de bajo costo, largo alcance y de eficiencia energética, últimamente han tomado relevancia en aplicaciones de IoT considerando características de autonomía en cuestiones de:

- Envío de paquetes cortos,
- Dispositivos repartidos a lo largo de un área amplia,
- Funcionamiento autónomo en largos periodos de tiempo (meses o años) (Pascua Eugenio, 2021).

Estas redes de baja potencia consideran una excelente cobertura en áreas urbanas, rurales y remotas, llegando alcanzar distancias desde los 5 a 40 km, la misma considera la vida útil de las baterías de hasta 10 años y llegando admitir favorablemente una gran cantidad de dispositivos. Según una publicación realizada en la Universidad Nacional, Abierta y a Distancia de Colombia (UNAD) indica que <<durante el año 2019 se instalaron 231 millones

de dispositivos creciendo más del 110% en comparación con 2018. El crecimiento del mercado es impulsado por el despliegue de tecnologías a gran escala en diferentes partes del mundo>> (Guaca & Hurtado, 2020). Entre las tecnologías LPWAN más conocidas se tiene:

- LoRaWAN: Francia operan más de 300 mil medidores de agua inteligentes.
- Sigfox: llego a modernizar 850 mil medidores de gas en Japón.
- NB-IoT: en China permite el rastreo de más de 1 millón de bicicletas eléctricas.

Tabla 6.
Características tecnologías líderes de LPWAN

Protocolo	Sigfox	LoRaWAN	NB-IoT
Estándar	Compañía SigFoxen	LoRa-Alliance	3GPP
Modulación	BPSK	CSS	QPSK
Frecuencia	915 MHz en USA	915 MHz en USA	Licenciada de LTE
Ancho de Banda	100 Hz	250 – 125 KHz	200 KHz
Máxima tasa de datos	100 bps	50 kbps	200 kbps
Bidireccional	Limitado / Half - Duplex	Si / Half - Duplex	Si / Half - Duplex
Máx. mensajes al día	140 UL – 40 DL	Ilimitado	Ilimitado
Máx. longitud de Payload	12 bytes UL – 8 bytes DL	243 bytes	1600 bytes
Rango de cobertura	10km urbano 40km rural	5km urbano 20km rural	1km urbano 10 km rural
Inmunidad interferencias	Muy alto	Muy alto	Bajo
Autenti. – encriptación	No soportado	Si AES 128b	Encriptación LTE
Tasa de datos adaptativa	No	Si	No
Localización	Si (RSSI)	Si (TDOA)	No
Permite red privada	No	Si	No

Nota: Tomada de la UNAD (Guaca & Hurtado, 2020).

Se estima que para el 2025 las aplicaciones con dispositivos IoT consideren una población de 22 millones de dispositivos funcionales, considerando a LPWAN como un

motor para el crecimiento de los sectores inteligentes como: agricultura, infraestructura, industria, hogar, salud, ciudad, etc.

Aunque presente características excelentes en algunos aspectos, en otros decae rotundamente, Manuel Guambugete en su trabajo de diseño de una WSN expone que: <<existen reportes de problemas de atenuación de las señales cuando la red LPWAN incluye dispositivos ubicados en edificios o separados por elementos físicos, la conectividad entre los dispositivos y su aplicación o servidor no es constante y puede ser unidireccional>> (Guambugete Manuel, 2021), debido a que la mayor parte de su implementación estaría dado en zonas urbanas las cuales constituyen objetos que sirven para la atenuación de la señal, se debe tomar en cuenta lugares con una buena línea de vista dados los sectores nodo – Gateway.

4.6 LoRa (Long Range)

LoRa es una tecnología IoT que utiliza el protocolo de comunicación LoRaWAN sobre una red LPWAN, LoRa se establece en la capa física y es la modulación que se emplea para comunicaciones de largo alcance, el cual se basa en el espectro ensanchado Chirp (pulso que hace un barrido de todas las frecuencias para expandir la señal espectral).

Es una tecnología patentada de la empresa Semtech Corporation y considera las bandas ISM (bandas de radio industriales, científicas y médicas – 915 MHz, 2.4GHz – 5 GHz) para su operación. La asignación de reglamentos y frecuencias para dicha tecnología se alteran dependiendo de la zona geográfica en el mundo donde se implemente (Planes Ana, 2020).

LoRa tiene fundamentos para su correcta operación las cuales se deben tomar en cuenta como características fundamentales de la tecnología, las cuales son:

- Trabaja en la banda ISM (915 MHz – 2.4 GHz – 5 GHz), pero también puede hacerlo en 915 MHz para EEUU, 868 MHz para Europa y 433 MHz para Asia.
- Modulación DSSS (espectro ensanchado por secuencia directa) en su variación Chirp.

- Método de ajuste dinámico (ADR), toma en cuenta la máxima velocidad posible entre nodo – Gateway, ajustando para ello: potencia de emisión, tasa de transferencia y tamaño del mensaje, esto con el fin de que las comunicaciones sean lo más eficientes posibles.
- Espectro ensanchado, permite la recepción de múltiples señales con distinta velocidad.
- Utiliza 6 factores de propagación (SF – Spreading Factors van desde SF7 - SF12) para cada uno de ellos se considera una relación entre potencia y tasa de transferencia. Cuanto mayor es el factor de propagación, mayor es la sensibilidad del receptor y, por tanto, mayor es el rango a cubrir, pero la velocidad decrece.
- Velocidad para SF12 de 0.3 kbps y de 5486 kbps para SF7.
- Sensibilidad de recepción de -123 dBm para SF7 y -137 dBm para SF12.
- Alcance de 2 km para SF7 y de 14 km para SF12 (Hernández Silvia, 2020).

Tabla 7.
Requisitos reglamentarios de LoRa en Europa y América del Norte

Parámetros	Europa	América del Norte
Bandas de frecuencia	863 – 870 MHz	902 – 928 MHz
Canal ascendente	125/250 KHz	125/500 KHz
Canal descendente	125 KHz	500 KHz
Canales	10	64+8+8
Tx ON	+14 dBm	+30 dBm permitidos
Tx OFF	+14 dBm	+27 dBm
Velocidad de datos	250 bps – 50 kbps	980 bps – 21.9 kbps

Nota. Tomada de la Universitat Politècnica de València (Planes Ana, 2020).

4.6.1 LoRaWAN

Es considerado como un protocolo de red, que por medio del uso de la tecnología LoRa establece comunicación y administración entre estos dispositivos, considerado como la capa de acceso al medio y desarrollado de forma abierta por LoRa Alliance (Asociación

global de empresas que sustentan el estándar abierto de LoRaWAN para redes LPWAN en conectividad con tecnologías IoT).

Clases del protocolo LoRaWAN. – los dispositivos que emplean LoRaWAN se llegan a clasificar en tres diferentes grupos, dando lugar al nivel de exigencias y características a las que consta cada uno de ellos, se tiene la clase A, B y C, donde la clase A considera menos características pudiéndose aumentar en las clases B y C, a continuación:

4.6.1.1 **Clase A.** su único modo de operación es el modo escucha (ventana RX), lo cual permite un mayor ahorro de energía, este modo solo se considera cuando se ha enviado un dato de manera eficiente al Gateway.

4.6.1.2 **Clase B.** escucha mayor tiempo que la clase A, generando un consumo mayor de energía, debido a que tanto nodo como Gateway se sincronizan para determinar los tiempos de envío de paquetes ampliando sus tiempos en la ventana RX, eliminando así la restricción de envío de datos.

4.6.1.3 **Clase C.** con mejoras en la latencia (suma de retardos temporales dentro de la red), estos dispositivos siempre están en modo escucha consumiendo más energía que sus predecesores, este modo solo se interrumpe cuando se envían paquetes.

4.6.2 **Registro y activación del dispositivo final (nodo)**

La mayoría de las tecnologías en red permiten unirse a ellas mediante credenciales de acceso, en el caso de LoRaWAN no es la excepción, empleando cifrado AES de 128 bits el cual autoriza al dispositivo final unirse a la red, denominado como un mecanismo de registro y activación de un nodo. Los procedimientos para la configuración del registro se los nombra como métodos de activación:

4.6.2.1 Over The Air Activation (OTAA). Llamada como activación por aire la cual se configura de forma manual tomando en cuenta de forma sistemática ciertos parámetros, como: identificador del dispositivo final (DevEUI – identifica al dispositivo de forma única), identificador de aplicación global (AppEUI) y una llave de aplicación (AppKey con cifrado de 128 bits). Este último se utiliza para determinar las claves de sesión (AppSKey - NwkSKey) (Hernández Silvia, 2020). Estos parámetros deben ser usados de la siguiente manera:

- El dispositivo final solicita unirse a la red, abriendo para ello la ventana de RX usando para ello datos de configuración.
- El Gateway recibe esta petición y la envía al servidor.
- El servidor actúa verificando la llave de encriptación (sea correcta) y que el nodo este dado de alta.
- Si la llave es correcta se crea una sesión temporal entre Gateway y nodo, seguidamente si los datos de configuración son incorrectos se rechaza el ingreso a la red.
- Si la llave es correcta se crea una sesión temporal entre Gateway y nodo, seguidamente si los datos de configuración son correctos se acepta el ingreso a la red.

Nota: La mayor ventaja que tiene este tipo de conexión OTAA es la seguridad, cada sesión se crea en la transmisión de datos y se renueva cada que el dispositivo final pierde conexión (se apaga o reinicia), dificultado el robo de una sesión y la clonación del dispositivo (Hernández Silvia, 2020).

4.6.2.2 Activation by Personalization (ABP). Vincula un dispositivo final a la red omitiendo la petición de conexión y el proceso de aceptación, conteniendo para ello: un identificador de aplicación (AppSKey), un único identificado de dispositivo (DevAddr) y un único identificador de red de dispositivo (NwkSKey), estos tres identificadores son conocidos por el servidor y el nodo, permitiendo una conexión a la red de forma instantánea al igual que su transmisión de paquetes.

Nota: su principal ventaja es la conexión instantánea para dispositivos que se encuentra en movimiento, no requiriendo un inicio de sesión en la red para enviar datos. La desventaja es que al momento encontrarse la llave de encriptación en el nodo, la misma podría ser extraída y clonada (Hernández Silvia, 2020).

4.6.3 Seguridad en LoRaWAN

Aplicaciones para sistemas IoT exigen un nivel de seguridad a cumplir en sus dispositivos en red para lo cual LoRaWAN presenta soluciones en su capa de acceso al medio, implementando mecanismos de autenticación mutua, integridad y confidencialidad, considerando para todo ello una llave de cifrado simétrica.

Esta llave de cifrado simétrica utiliza el algoritmo de cifrado AES 128 bits donde para ello tanto nodo como servidor en red deben conocer esta llave, compartiendo la llave en red de manera confidencial por lo cual Silvia Hernández en una publicación sobre el estudio de LoRaWAN detalla que <<LoRaWAN utiliza llaves de cifrado que se derivan de una llave inicial (AppKey) y un valor aleatorio que hace que sea imposible reproducir el proceso de creación>>(Hernández Silvia, 2020).

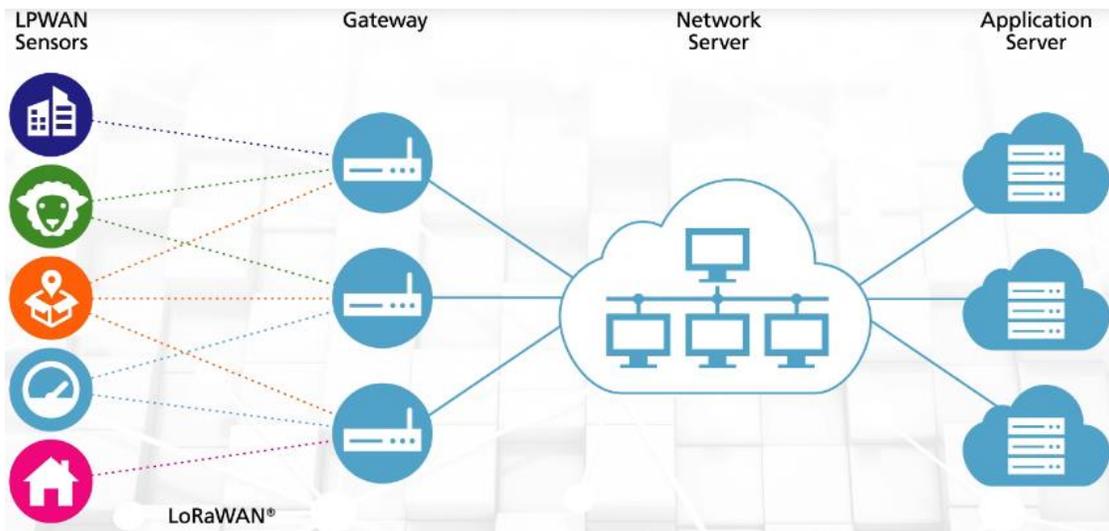
Estas dos llaves son utilizadas en todo el proceso de tráfico en red empleando para ello: llave de sesión en red (NwkSKey con ella el nodo y el servidor interactúan, verificando la autenticidad del mensaje) y la llave de sesión (AppSKey, encripta y descripta datos).

4.6.4 Topología LoRaWAN

La red estaría diseñada con topología de estrella, en donde los nodos o dispositivos finales mantiene una conexión directa con el Gateway o servidor de red central. Se emplean conexiones IP estándar que actúan como un puente transparente convirtiendo las señales RF

en paquetes IP y viceversa. Se aprovecha el Long Range (LoRa) en la capa física, permitiendo un enlace de un solo salto entre el dispositivo final y una o varias puertas de enlace.

Figura 9.
Topología de red LoRaWAN



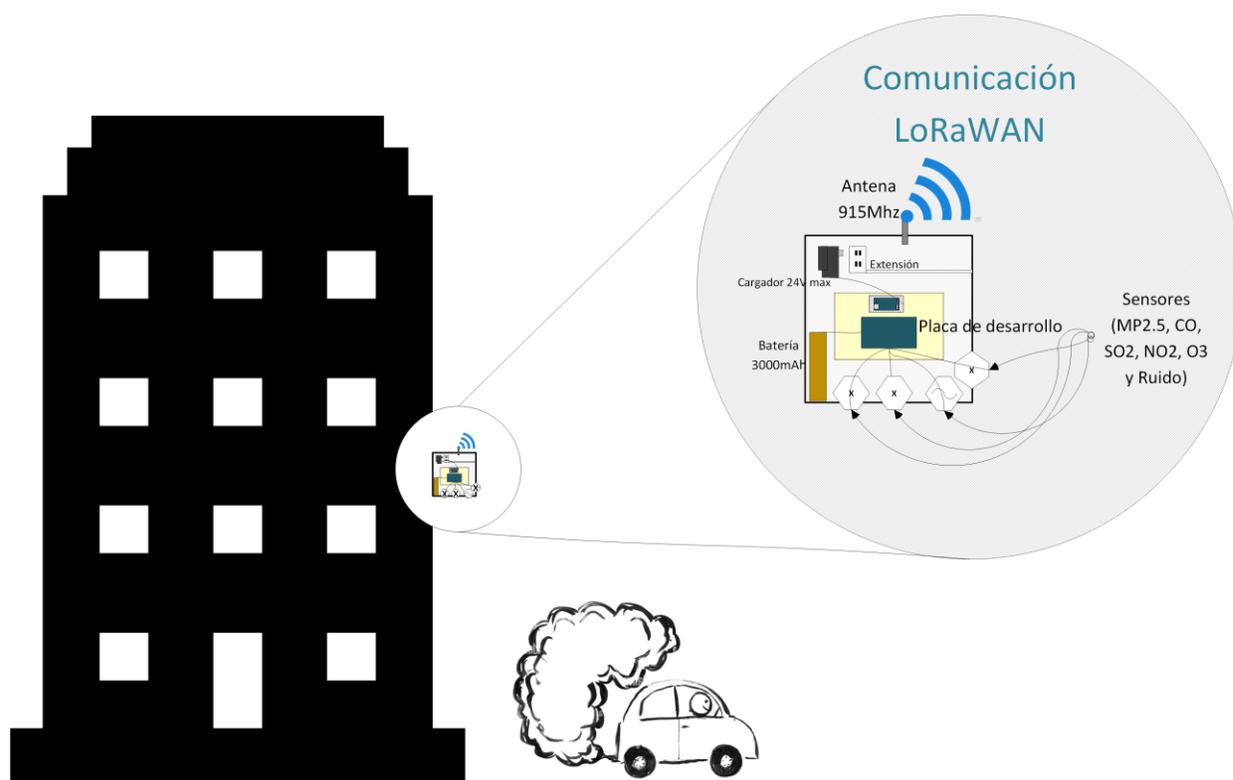
Nota. LoRa es una de las tecnologías LPWAN más conocidas en el medio por el costo beneficio que ofrece a sus usuarios (tomada de bit.ly/43uR0aw) (LoRa (Long Range), 2022).

5 Metodología

La red encargada de la obtención de datos contaminantes está compuesta de tres partes fundamentales, los cuales comprenden las de obtener, enviar y presentar según los requerimientos en los que son objeto para el estudio de contaminación debida al aire y ruido.

5.1 Nodo final

Figura 10.
Diagrama de nodo final



Nota. Figura propietaria del autor.

El nodo final es el encargado de la obtención de datos de contaminación acústica y atmosférica debido a que en el mismo incorpora sensores que captan dichas variables (sensores acústicos y de gases). Al mismo tiempo llenaría el vacío de sostenibilidad energética ya que se encontraría en la intemperie se crea la necesidad de una fuente de alimentación confiable, por ende, su principal fuente sería la luz del sol en cual un panel solar

generaría la suficiente energía para cargar una batería con suficiente capacidad para alimentar los módulos existentes en el nodo final.

De igual manera contiene protocolos de comunicación de largo alcance (LoRaWAN), que por la frecuencia 915MHz establecida para Norteamérica y que cubre la región en donde se encuentra el proyecto realizado Ecuador sería la adecuada para enviar los datos obtenidos en la aplicación.

Nota. en relación a las densidades los gases contaminantes los cuales son objeto de estudio se determinan que: MP2.5, SO2, NO2 y O3, tienen una mayor densidad a la del aire, por tanto, tienden a descender, y el gas contaminante CO es menos denso que el aire por tanto tiende a ascender. La implementación debe considerar alturas que sean de un mayor aprovechamiento para la recolección de estas cinco variables, considerando alturas promedio de fuentes emisoras de gases como lo son automotores, personas, animales, entre otros, se estima una altitud de origen de 1metro hasta los 3metros. Se toma en consideración la altura de 3metros para la colocación del nodo final por motivos de máximo aprovechamiento de recolección de variables contaminantes y del mismo modo por motivos de seguridad a la integridad del prototipo.

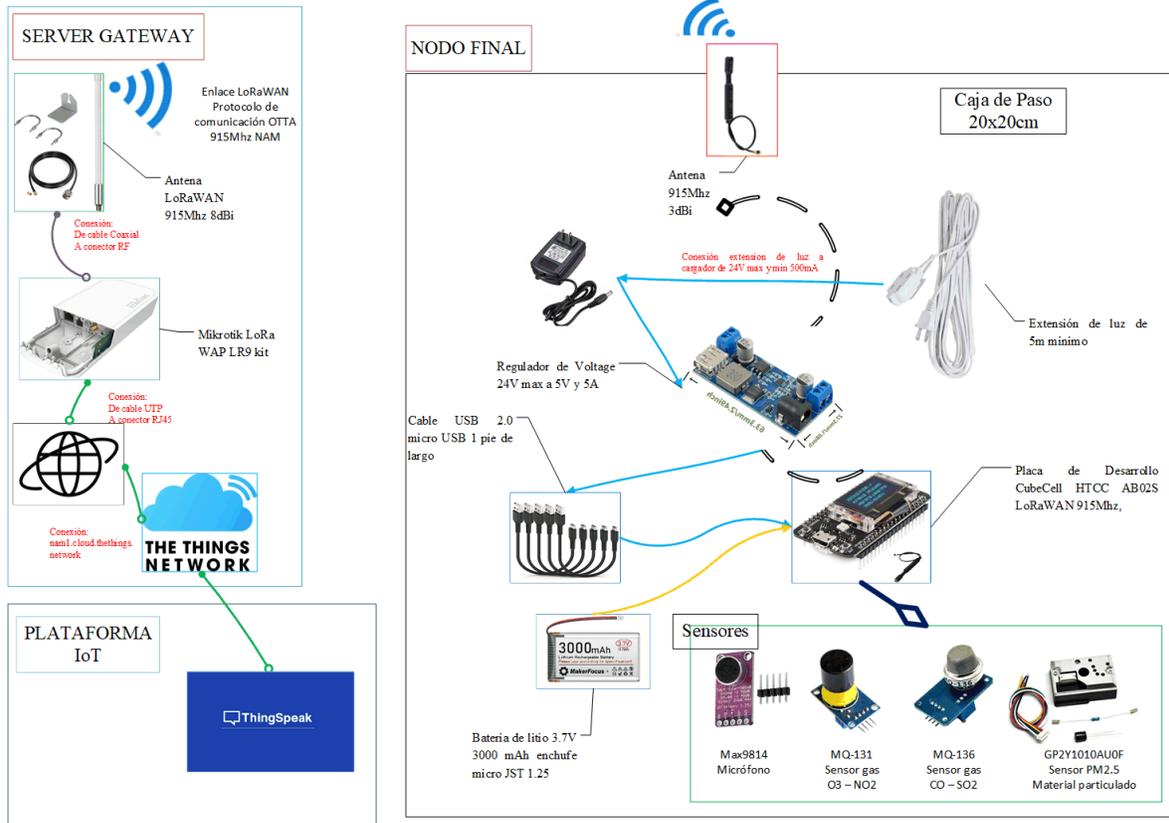
5.2 Server Gateway

Por medio de la tecnología LoRa se establece la comunicación que se da entre nodo final (de los datos obtenidos con los sensores) hasta el Gateway (con salida a internet). El Gateway es un equipo de comunicación inalámbrica que trabaja bajo la banda frecuencia 915MHz de la NAM (Norte de América). Los equipos empleados para el mismo contemplarían un equipo Gateway con salida a internet, una antena, alimentación y salida a internet.

5.3 Plataforma IoT

Una de las características del proyecto es la culminación de los datos obtenidos representados de forma gráfica en las distintas plataformas para dispositivos IoT que existen en el mercado ya sean de pago o gratuitas como lo es ThingSpeak, Ubidots, etc.

Figura 11.
Diseño de red LoRaWAN



Nota. Figura propietaria del autor con información concluyente de (China-total, 2022; Heltec, 2022; Makerfocus, 2022; MAXIM, 2022; Mikrotik, 2022; RAK Wireless, 2022; SHARP, 2014; Soshine, 2022; Winsen, 2014).

La obtención de valores relacionados a la contaminación debida al ruido y al aire se establece mediante dispositivos dedicados a los principales estudios relacionados de la OMS con respecto a: CO, SO₂, O₃, NO₂ y PM_{2.5}, de igual forma un dispositivo que obtenga valores debidas al ruido estableciendo características de mediciones en condiciones normales y condiciones donde surja la contaminación a estas seis variables. Cada dispositivo fue escogido con cautela con respecto a la comunicación, energía y de la sensibilidad a los contaminantes establecidos, los mismos serán vistos en la siguiente sección.

5.4 Cálculos de potencia

En comunicaciones inalámbricas es el resultado de la suma de pérdidas (debidas a conectores, obstrucciones, clima, etc.), pérdidas de propagación, potencias de transmisión (P_{tx}) y ganancias (debido a las antenas en transmisión y recepción, G_{tx} y G_{rx}).

En los equipos empleados se establece potencias de transmisión de 21dBm (nodo final) y de 23dBm (Gateway) y con unas ganancias de 3dBi (nodo final) y de 8dBi (Gateway). Partiendo de la sensibilidad del Gateway (en recepción) de -135dBm, describiría cual es el nivel de señal más bajo que puede captar. Cruzando este umbral de potencia se tendría un enlace deficiente, por ende, siempre se busca que este valor sea superior (mínimo 10 a 15dB) para que se establezca un enlace con una calidad en la señal “Regular”.

- Cálculo de Potencia en Recepción.

$$P_{rx} = P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} + LOS + L$$

P_{rx} : Potencia en recepción.

P_{tx} : Potencia en Transmisión.

G_{tx} y G_{rx} : Ganancia en transmisión y recepción debido a las antenas.

LOS : Pérdidas en el espacio libre.

L : Pérdidas debidas a conectores, cables y obstáculos.

- Cálculo de pérdidas por propagación

$$LOS = 32.4 + 20 \log_{10}(D_{km}) + 20 \log_{10}(f_{MHz})$$

D : distancia en km

f : frecuencia en MHz

- Modelo de propagación de Okumura Hata. – El modelo Hata es una fórmula empírica basada en la curva de pérdidas dada por Okumura. Hata creó una serie de relaciones numéricas para describir el enfoque gráfico de Okumura y facilitar su aplicación. Estas relaciones se denominan modelos de Okumura-

Hata. Este modelo es adecuado para celdas grandes, y el efecto es mejor cuando la distancia es superior a 1 km, pero no es adecuado para micro celdas.

Características limitante modelo Okumura Hata:

- Frecuencia: 150 a 1500 MHz.
- Altura de antena fija: 30 a 200 m.
- Altura antena móvil: 1 a 10 m.
- Distancia: 1 a 20 km.

Cálculo de pérdidas de propagación (Lb – Loss Bugget – presupuesto de pérdidas) con obstáculo en zonas urbanas modelo Okumura hata:

- $Lbf (dB) = 69,55 + 26,16 * \log_{10}(f) - 13,82 * \log_{10}(ht) - A + (44,9 - 6,55 + \log_{10}(ht)) * \log_{10}(d)$
- $A = (1,1 * \log_{10}(f) - 0,7) * hr - (1,56 * \log_{10}(f) - 0,8)$

Dónde:

A: factor de corrección

f: Frecuencia [MHz]

d: Distancia [Km]

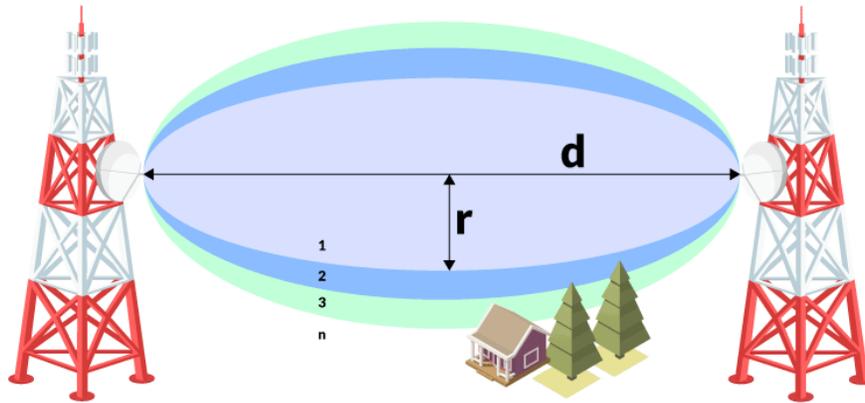
htx: Altura de la estación base [m]

hrx: Altura del receptor móvil [m] (Ponce Castillo et al., 2022).

5.4.1 Zona de Fresnel

Son el porcentaje que se tiene desde la línea directa de vista hasta el obstáculo más cercano a ese enlace. De forma promedio un enlace debe de tener mínimo el 60% hasta el 80% despejado para un funcionamiento “Aceptable”.

Figura 12.
Zonas de Fresnel



Nota. Figura obtenida de (Martínez José Luis, 2018), los datos obtenidos de las zonas de Fresnel se originan desde el software Radio Mobile y son expuestos en la comparativa de la selección del mejor lugar lo cuales son expuestos en el apartado “[Diseño de red](#)” de los anexos en la tabla 18 “Datos del enlace Gateway – Nodo Final”.

5.4.2 Distancia

Un enlace LoRaWAN puede llegar a cubrir largas distancias, dependiendo de la zona donde se implemente, generalmente el enlace llega a cubrir distancias de 5km en zonas rurales y de 2km en zonas urbanas, este valor varía dependiendo del nivel de ganancia (antenas en este caso antenas de 8 y 3dBi) que se desee aplicar.

5.5 Puntos estratégicos

Consideradas como ubicaciones que cuentan con existencia de contaminación acústica y atmosférica en el casco céntrico de la ciudad de Loja, se procede a elegir varios puntos en el mapa y simular el radio enlace desde un punto alto donde se ubica el Gateway hasta un nodo final, este último se ira variando dependiendo de la distancia y potencia de la señal en recepción.

Tabla 8.
Parámetros del enlace Nodo final – Gateway

Parámetros	TX nodo final	RX Gateway
Potencia TX	21 dBm	23 dBm
Sensibilidad	-135 dBm	-137 dBm
Ganancia	3 dBi	8 dBi
Altura	3 m	6 m

Nota. Tabla propietaria del autor, con información concluyente de (Heltec, 2022; Mikrotik, 2022; RAK Wireless, 2022). En este caso se hace énfasis a que el nodo será el transmisor debido a que enviará datos de contaminantes hacia el Gateway.

Se considera que, para instalación de cada nodo final en el centro de la ciudad, tanto la potencia en recepción (Prx medida en dBm), la zona de Fresnel (porcentaje de obstrucción en la línea del enlace de comunicación), la distancia medida en kilómetros (km) y la disponibilidad (permisos de instalación en empresas públicas y privadas o en residencias) son el punto clave para la implementación del prototipo propuesto para la medición de contaminación.

5.5.1 Resultados puntos escogidos

En la tabla 19 “Cálculos de propagación lugares estratégicos” del apartado “Diseño de red” la cual se encuentra en los anexos, se expone valores calculados y medidos en los diferentes puntos considerables para la colocación del nodo final en el centro de la ciudad. Estos lugares se consideran debido a la existencia de contaminantes acústicos y atmosféricos provocados por el tráfico y la concentración de personas sobre el sector. Debido a la gran cantidad de lugares a cubrir se considera filtrar los mismos teniendo en cuenta parámetros como potencia en recepción, zonas de Fresnel, distancias y disponibilidad.

5.5.2 Selección de lugares para implementación

Para la selección de un punto estratégico para la colocación de los nodos se debe mencionar 4 puntos importantes:

1. Potencia en recepción (Rx) medida en dBm,
2. Zona de Fresnel medida en porcentajes 0 al 1,
3. Distancia del enlace medida en kilómetros (km),

4. Disponibilidad (permisos de implementación).

El último punto define prácticamente si será puesta en marcha la implementación sobre el sector, esto debido a que se requiere de acceso de la persona o entidad involucrada para la colocación estratégica del nodo sobre su residencia o empresa.

Tabla 9.
Parámetros de calificación mejor lugar

Parámetro	Buena	Aceptable	Regular	Mala	Insuficiente
Prx (dBm)	> -80	-80 a -100	-100 a -120	-120 a -135	<-135
Zona de Fresnel	> 0.8	0.8 a 0.6	0.4 a 0.6	0.4 a 0.2	< 0.2
Distancia (km)	< 1.2	1.2 a 1.8	1.8 a 2.4	2.4 a 3.0	> 3.0
Puntos	10	9	8 – 7	3	0

Nota. Tabla propietaria del autor. Los datos de esta tabla se basan en: la calidad de la señal en recepción en donde la señal promedio dependerá del nivel de potencia en recepción existente, distancias a cubrir y obstrucciones que se cruzan en el radio enlace. La misma ayuda a simplificar datos de zonas en las que se desea implementar un nodo final, estas ubicaciones se encuentran expuestas en la tabla “*Datos del enlace Gateway – Nodo Final*”.

En la misma tabla se llega a obtener medidas de potencias en recepción empleando cálculos de pérdidas de propagación con el modelo Okumura Hata los cuales llegan a rondar entre los -70dBm hasta -100dBm. Sin embargo en las medidas realizadas en estos puntos los valores varían desde los -82dBm hasta los -117dBm. La tabla “Puntos de mejor cobertura Gateway – Nodo Final” resumirá con una calificación los lugares aptos para la implementación de los nodos, la cual considera apropiada una calificación promedio de los tres primeros puntos por encima del 7.00 para poder considerarse en la implementación, así como también la disponibilidad del sector.

Cabe mencionar que cada lugar cuenta con variaciones que provocan un enlace poco favorable como lo son las zonas cerradas y con poca línea de vista hacia el Gateway y otros lugares que a pesar de tener poca línea de vista están lo suficientemente cerca para llegar a tener un enlace óptimo (como lo es el lugar denominado “Puerta de la ciudad”).

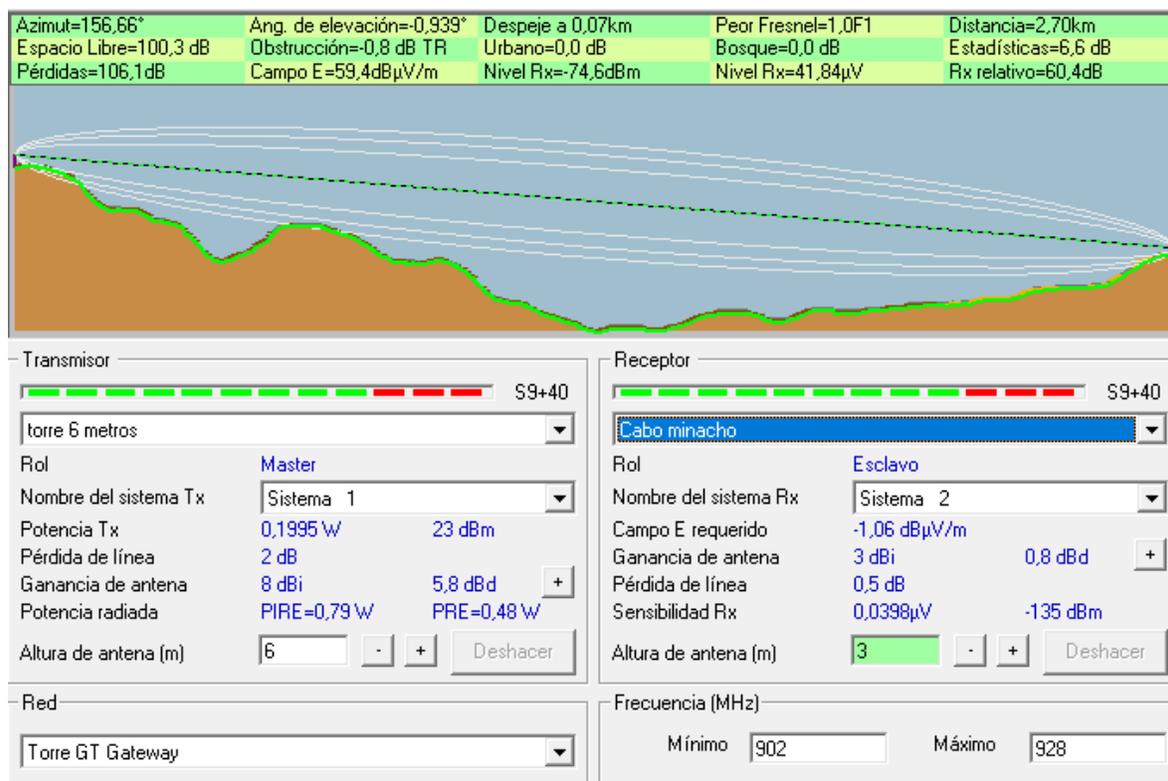
Figura 13.
Simulación en Radio Mobile - puntos estratégicos



Nota. Figura obtenida del Software Radio Mobile.

El Gateway se establece en las coordenadas latitud -3,984871 y longitud -79,21104 en el barrio San José alto, el cual se encuentra a 2140 metros sobre el nivel del mar, garantizando una excelente línea de vista a la gran mayoría de la zona urbana de la ciudad, la instalación de la antena y vista general cubierta por la misma puede apreciarse en el apartado de [*“Instalación de antena y equipo Mikrotik”*](#) en los anexos.

Figura 14.
Parámetros de enlace Nodo final – Gateway



Nota. Figura obtenida del software Radio Mobile. Se muestra un enlace con los peores resultados en potencia de recepción y zonas de Fresnel, basados en uno de los puntos escogidos para la implementación.

Tabla 10.
Puntos escogidos Gateway – Nodo Final

Nro	Lugar	Dirección	Prx Teórica dBm	Calificación /10	Prx Medida dBm	Calificación /10
1	Mayorista 2	Av. Gran Colombia y calle Guaranda	-78.15	10	-104; -115	9.00
2	Puerta de la ciudad	Entre Av. Antonio José, 18 de noviembre y calle Pasaje Rodríguez	-81.81	7.66	-107; -109	7.00
3	San Sebastián	Entre calles Lourdes y Juan José Peña referencia Farmacia San José	-69.00	7.66	-104; -106	7.00
4	Cabo Minacho	Entre calles Eduardo Kigman y Gonzanama	-74.60	7.66	-104; -110	7.00

Nota. Tabla propietaria del autor. En esta tabla se muestra un breve resumen de los mejores lugares en el cual se pretende colocar un nodo para la medición de contaminación. El parámetro clave de su selección es la disponibilidad que se da sobre el sector, ya que debido a que otros lugares cuentan con excelente nivel de potencia en recepción no se cuenta con los debidos permisos de implementación.

Para la implementación del presente sistema se consideran nodos finales para la recolección de datos contaminantes los cuales incorporan como primera instancia módulos o placas de desarrollo en las cuales constan de un chip de comunicación Lora capaces de enviar datos hasta el servidor (Gateway), mediante credenciales de acceso previamente dadas desde el servidor.

5.5.3 Simulación vista desde XIRIO ONLINE

Xirio Online es una plataforma online para el análisis y planificación de cobertura de redes de telecomunicaciones como redes móviles y de radio. Proporciona herramientas para visualizar y evaluar la calidad de la señal, estimar la cobertura y realizar simulaciones para optimizar el despliegue de la infraestructura de comunicaciones.

Con la ayuda de esta herramienta se plantea ubicar en cada uno de los sectores una antena ubicándola con coordenadas y alturas que se relación a la realidad del ambiente, de la misma manera se configura las frecuencias a trabajar, las perdidas debidas a varios factores como lo son del feeder, conectores, perdidas pasivas, etc. Y del mismo modo se plantea el modelo de propagación Okumura Hata que es el que más se apega al caso de estudio para zonas urbanas/ciudades pequeñas para una frecuencia de 915MHz.

Figura 15.
Configuración inicial nodo final Xirio

Propiedades del estudio de Enlace

Estudio

Nombre: WSN Cabo minacho

Grupo: [dropdown]

Servicio: LORA WAN

Banda: [dropdown] + ?

Descripción:
Estudio de enlace...

Fecha de última puesta en servicio/apagado: [calendar icon] 31

Enlace agregado

Agregación: [dropdown]

Estado: [dropdown]

Extremos

Transmisor: Gateway [calendar] [X] [add] [help]

Receptor: Cabo minacho [calendar] [X] [add] [help]

Parámetros de cálculo

Método de calculo: Nuevo Okumura-Hata [calendar] [X] [add] [help]

Nota. Figura obtenida del software XIRIO ONLINE (Xirio Online, 2024).

Figura 16.
Configuración Gateway software XIRIO

The image displays the configuration interface for the XIRIO Gateway software, organized into several sections:

- Coordenadas:** Latitude is set to 03°59'05.50"S and Longitude to 079°12'39.80"W.
- Parámetros de radio:** Antenna is LORA Omni 8 dBi, antenna height is 6 m, orientation is 144.217008133147°, mechanical inclination is 1.25365763582395°, and electrical inclination is 0°.
- Referencia de alturas de antenas:** Reference level is 'Nivel del terreno', 'Usar altura de edificio' is 'Capa de elevación (MDE)', and building height is 3 m.
- Referencia de alturas de antenas (repeated):** Identical settings to the previous section.
- Frecuencias de transmisión:** A table shows a single frequency of 915.000 MHz. Polarization is set to 'Vertical'.
- Feeder:** Feeder is 'Elemento de catálogo cable coa', length is 5 m, feeder losses are 1.00 dB, and passive losses are 4 dB.
- Potencia:** Power is set to 23 dBm.

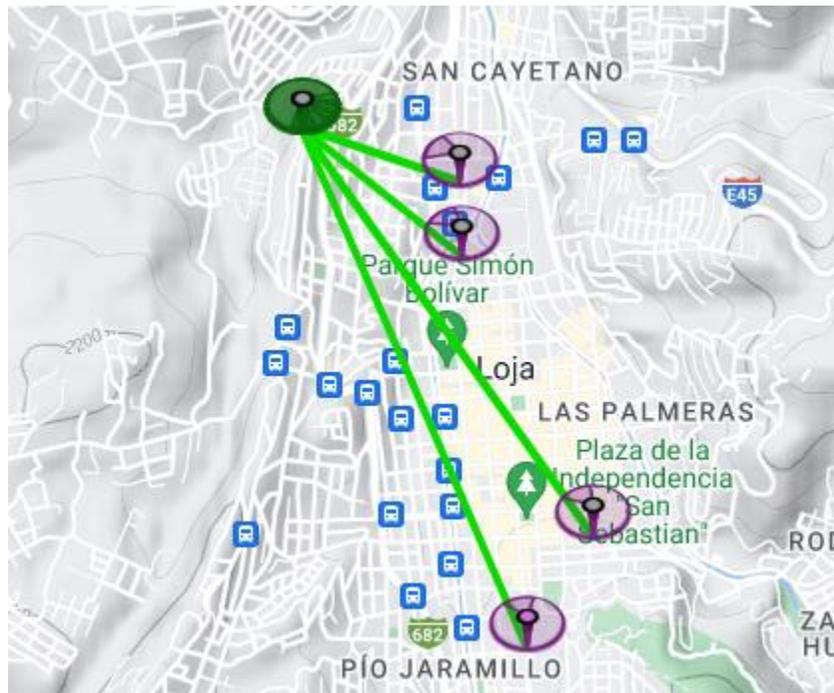
Nota. Figura obtenida del software XIRIO ONLINE (Xirio Online, 2024).

Figura 17.
Configuración Nodo Final software XIRIO

Parámetros de radio	
Antena:	LORA Omni 3 dBi
Altura antena:	3 m
Orientación:	336.329743001436 °
Inclinación mecánica:	-0.690270181844008 °
Polarización:	Vertical
Feeder:	Nuevo feeder
Longitud del feeder:	0,5 m
Pérdidas del feeder:	0,20 dB
Pérdidas pasivos:	2 dB
Factor de ruido:	10 dB
Umbral recepción:	<input type="radio"/> Campo <input checked="" type="radio"/> Potencia
	-135 dBm

Nota. Figura obtenida del software XIRIO ONLINE (Xirio Online, 2024).

Figura 18.
Vista general radio enlace software XIRIO



Nota. Figura obtenida del software XIRIO ONLINE (Xirio Online, 2024).

Tabla 11
Comparativa nivel de potencia simulada y medida software XIRIO

Nro	Lugar	Dirección	Prx Teórica dBm	Prx Medida dBm	Porcentaje de error %	Spreading Factor SF
1	Mayorista 2	Av. Gran Colombia y calle Guaranda	-87.94	-104; -115	15.44 – 23.53	SF7
2	Puerta de la ciudad	Entre Av. Antonio José, 18 de noviembre y calle Pasaje Rodríguez	-91.42	-107; -109	14.56 – 16.13	SF8
3	San Sebastián	Entre calles Lourdes y Juan José Peña referencia Farmacia San José	-103.93	-104; -106	0.07 – 1.95	SF9
4	Cabo Minacho	Entre calles Eduardo Kigman y Gonzanama	-107.63	-104; -110	3.93 – 2.15	SF9

Nota. Datos de tabla obtenida del software XIRIO ONLINE (Xirio Online, 2024).

Los datos de los lugares más cercanos al Gateway, muestran un considerable margen de error, esto debido a que, en las mediciones, se llegarían a encontrar perdidas adicionales debido al entorno. También se puede notar la relación existente al SF de cada enlace, establecido de forma automática, por las librerías de enlace en cada uno de los nodos.

5.6 Placa de desarrollo LoRa

En referencia a la placa de desarrollo de Heltec modelo CubeCell HTCC AB02S con chip de comunicación LoRa, antena incorporada, puerto de carga de batería LiPo, pantalla OLED, pines análogos y digitales, salidas de energía de 3.7V y 5V, sueño profundo (estado de bajo consumo) y la cual presenta las siguientes características:

Tabla 12.
Características Placa de desarrollo CubeCell HTCC AB02S

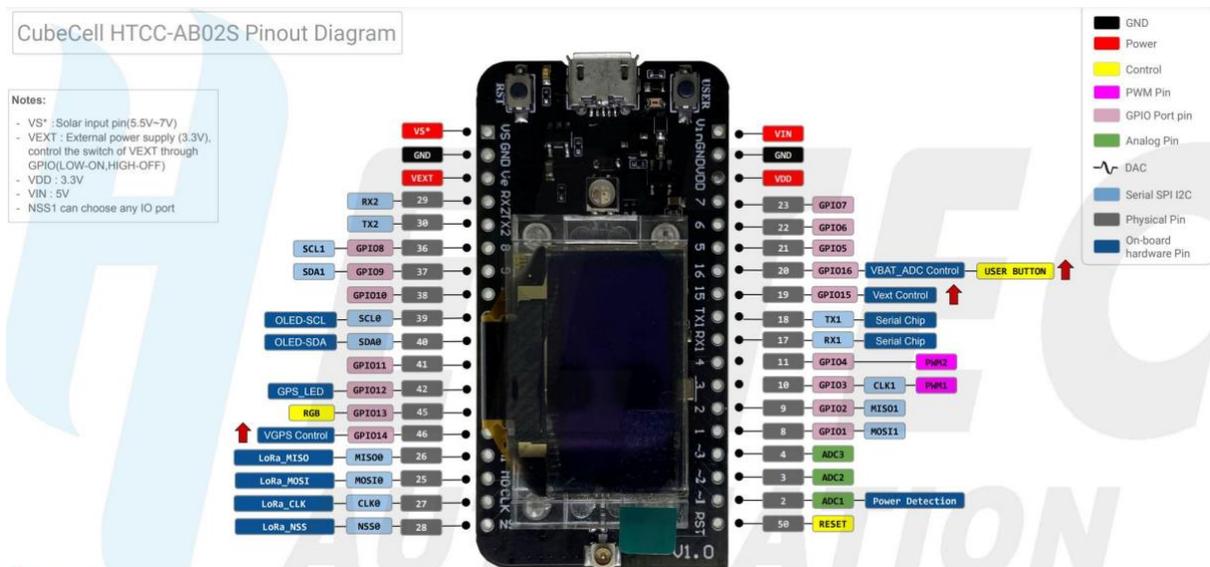
Parámetro	Descripción
MCU (Main Control Unit)	Incorpora un chip ASR6502 basada en una placa del ESP32 PSoc® 4000 (ARM® Cortex® M0+ Core) y SX1262. Chip Lora SX1262
Compatibilidad	IDE Arduino y LoraWAN 1.0.2
Modulo	GPS AIR530Z
Funcionamiento	Ptx: 21 ±1dB – Sensibilidad Rx: -135dBm – Frec. operacion 863~928MHz.

Certificación	FCC - CE
Gestión de carga	<i>Conexión directa con panel solar de 5.5 – 7 V – Conector SH 1.25-2 para batería de litio – Sistema de gestión de carga, descargar y protección contra sobrecargas – Sueño profundo de 21µA.</i>
Interfaz	<i>Pantalla OLED de matriz de puntos de 128 * 64 de 0,96 pulgadas a bordo – Dimensiones 55,9 x 27,9 x 9,5 mm – micro USB; Interfaz de antena LoRa (IPEX) x 1 – PINS: UART x 2; SPI x 2; I2C x 2; SWD x 1; 12-bits ADC input interface x 3; 8-channel DMA engine; GPIO x 16.</i>
Energía	<i>VDD Pin:3.3V con una corriente de 500mA – VIN Pin: 5V igual a la corriente de entrada >=500mA – Vext Pin: 3.3V hasta 350mA – Consumo de transmisión LoRa 105mA 20dB de salida máximo.</i>

Nota. Tabla propietaria del autor con información concluyente de Heltec.org (Heltec, 2022).

Figura 19.

Placa de desarrollo CubeCell



Nota. la figura fue obtenida de (Heltec, 2022).

La placa cumple con los requisitos de comunicación (transmisión) y energía lo cual son dos puntos fundamentales para este proyecto que se enfoca en la obtención de variables contaminantes y su envío a través de una LPWAN como lo es LoRa.

5.7 Sensores de Gases y Ruido

Se tiene en consideración 6 variables contaminantes para el análisis, que abarcan CO, SO2, O3, NO2 y PM2.5 para los gases y de ruido, mencionando para ello:

Tabla 13.
Sensores para gases y ruido

Nombre	VARIABLES	Descripción	Figura
MQ136	CO - SO2	Voltaje de entrada: 5V DC Consumo: $\leq 900\text{mW}$ Corriente: 180mA Pre calentamiento = 48 horas Sensibilidad de CO y SO2 = 5 -100ppm Resistencia de carga: ajustable hasta $3\text{k}\Omega$	
MQ131	O3 - NO2	Voltaje de entrada: 5V DC Consumo: $\leq 900\text{mW}$ Corriente: 180mA Pre-Calentamiento = 48 horas Sensibilidad de CO y SO2 = 5 -100ppm Resistencia de carga: $1\text{k}\Omega$	
GP2Y1010F	PM2.5	Voltaje de entrada: 3 - 7V DC Corriente: 40mA Pre calentamiento = 48 horas Sensibilidad de CO y SO2 = 5 -100ppm	
Max9814	Ruido	Voltaje de entrada: 2.7 – 5.5V DC Corriente: 6 – 100mA Ganancia: 40 – 50 – 60 dB Control de ganancia automático: Si	

Nota. Tabla propietaria del autor con información concluyente de (China-total, 2022; MAXIM, 2022; SHARP, 2014; Winsen, 2014).

La tabla muestra principalmente dispositivos empleados para el presente proyecto los cuales cumplen las condiciones de energía y sensibilidad de contaminante, consumiendo menos de 500mA (MQ136: 180mA, MQ131: 180mA, GP2Y1010F: 40mA y Max9814:

100mA esta última corriente es lo máximo en caso de sobre alimentación, pero promediamente trabaja en 6mA, la suma de todas estas corrientes es de 406mA) que es la corriente que entrega la placa CubeCell.

5.8 Gateway LoRa Wap LR9 de Mikrotik

Para la elección del equipo de recepción y transmisión LoRa se establece que la comunicación debe basarse bajo la banda de Norteamérica de 915MHz, tener una salida a internet y una entrada para la instalación de una antena de mayor ganancia de ser necesario, por lo cual destaca el Gateway escogido en:

Tabla 14.
Puerta de enlace Gateway

Especificaciones	Descripción	Figura
Generales	CPU: QCA9531 Frec: 650MHz – Sistema operativo: Router OS – Ram: 64MB – Almacenamiento: 16MB – Temperatura: 40 – 60 °C.	
Energía	3 entradas de alimentación (DC-jack, POE in, automotive). Consumo: 7W Voltaje: 9 – 30V.	
Wireless	Data Rate: 300Mbps – Canales 2.4GHz: 2 – Estándar: 802.11b/g/n – WiFi 4 – Antena interna ganancia: 2dBi	
Ethernet	Puerto Ethernet: 10 – 100: 1	
LoRa	Frecuencia de operación: 902-928 MHz usada en EEUU, Canadá, México, Australia, Brasil, etc.	

Nota. Tabla propietaria del autor con información concluyente de (Mikrotik, 2022).

Tabla 15.
Antena Gateway 915 MHz

Nombre	Descripción	Figura
Antena Gateway LoRa para helio RAK Hotspot HNT Finestra Miner Mining	Ganancia: 8dBi Frecuencia de operación: 915MHz Dimensiones: 68.6 x 10.15 x 10.15 cm Otros: impermeable, fibra de vidrio, omnidireccional. Incluye un soporte para poste, cable coaxial con conector SMA macho, RP SMA macho y conector N macho.	 <p>The image shows the antenna components: a tall, thin, clear cylindrical antenna mounted on a metal bracket, a black coaxial cable with SMA and N connectors, and a metal mounting plate with a hole for a post.</p>

Nota. Tabla propietaria del autor con información concluyente de (RAK Wireless, 2022).

5.9 Recursos energéticos

Se consideran equipos que ayuden a la sostenibilidad energética de los nodos finales, con el fin de que sean autosuficientes para trabajar durante un largo periodo de tiempo sin necesidad de intervención humana, considerando para ello voltajes que estén entre los 3.3 y 5 voltios, con una corriente mínima de 500mA, llegando a consumir un total de 2.5Wh y un total de 1.8kW al mes.

El Consumo mensual es de 20 ctvs. de dólar en base a las tarifas expuestas por la CNEL-EP (Corporación Nacional de Electricidad en Ecuador), la cual hace mención a un promedio de consumo para 1kWh es de 10.31 ctvs. de dólar para zonas residenciales y de 10.44 ctvs. de dólar para zonas de comercio (CNEL EP, 2021).

Tabla 16.
Dispositivos para la sostenibilidad energética

Nombre	Descripción	Figura
Cargador	5V hasta los 24V y 800mA mínimo en la salida	
Batería Litio Makerfocus	3.7V – 3000mAh conector micro JST 1.25	
Regulador de voltaje	En la entrada 24V máximo y en la salida 5V a 5A	
Cable micro a USB	USB 2.0 macho – entrada micro USB – 15cm de largo	

Nota. Tabla propietaria del autor con información concluyente de (Makerfocus, 2022; Soshine, 2022).

Como se aprecia en la tabla de sensores, se consideran aquellos necesarios para la obtención de las variables en este proyecto por ende se requiere de una corriente máxima de funcionamiento de 406mA en el cual se emplea un cargador de 5-24V y 800mA, el cual se conecta con un regulador de voltaje que soporta 24V máximo y entrega 5V y 5A el cual se conecta directamente con cable micro USB a módulo de Heltec y una conexión a una batería con voltaje de 3.7V y 3000mAh. Esta última tiene la función de alimentar todo el sistema de sensores, modulo y transmisión inalámbrica la batería se carga y descarga al mismo tiempo que todo el sistema funciona.

5.10 Presupuesto

En el apartado se hará mención presupuesto referencial y total, cada uno de ellos explica costos previstos para el desarrollo e implementación de la red de nodos y su puesta en marcha para la recolección y almacenamiento de datos contaminantes.

Tabla 17.
Presupuesto referencial

Cantidad	Descripción	Precio unitario	Precio total
3	Maker Focus LoRa Cubecell AB02s	30.00	90.00
1	Gateway Mikrotik WAP LR9	165.00	165.00
1	Antena de fibra de vidrio de 8 dBi 915 MHz LoRa Gateway	28.00	28.00
3	Sensor MQ-131	21.00	63.00
2	Sensores MQ-136	50.00	100.00
1	Sensores MAX9814 5 en 1	13.00	13.00
3	Sensores de polvo 2.5 GP2Y1010F	15.00	45.00
2	Baterías LiPo Makerfocus conector JST 1.25	28.00	56.00
2	Reguladores de voltaje de 5-24V a 5V a 5A EPLZON	14.00	28.00
1	Cable micro USB 15cm 5 en 1	5.46	5.46
2	Cargador genérico USB de 5V a 2A	5.00	10.00
2	Cajas de paso 20x20cm IPS65	10.00	10.00
1	Cautín	3.00	3.00
1	Estaño 1 metro	0.5	0.5
4	Slot de pines	0.5	2.00
1	Jumpers macho a hembra 15cm 1x40	3.00	3.00
1	Tornillos	3.00	3.00
1	Brocas de 2mm, 5mm, 0.5cm	5.00	5.00
2	Baquelitas 10x15cm	2.00	4.00
2	Extensiones de energía de 5 metros	3.00	6.00
3	Extensiones de energía de 3 metros	2.00	6.00
1	Impuestos totales	48.64	48.64
1	Envíos totales	93.00	93.00
	Subtotal		645.96

Total

787.60

Nota. Tabla propietaria del autor. Esta tabla refleja el presupuesto referencial óptimo sin ningún tipo de inconveniente.

Tabla 18.
Presupuesto Total

Cantidad	Descripción	Precio Unitario	Precio Referencial
1	Presupuesto referencial.	787.60	787.60
1	Transporte, incluye movilización de ciudad a ciudad, circulación urbana, taxis, etc.	70.00	70.00
4	Pago por utilización de domicilio o empresa, (Luz y arriendo).	10.00	40.00
2	Viveres, incluye pago de alimentos y agua por tema de cambio de sector cada nodo.	10.00	20.00
Total			917.60

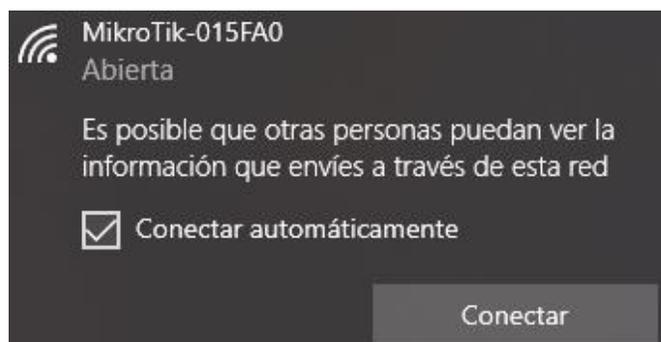
Nota. tabla propietaria del autor. Esta tabla muestra en ciencia cierta la cantidad total que se ha puesto en marcha para la implementación y estudios de este proyecto, tomando en cuenta el presupuesto referencial como punto de partida para el análisis de costos adicionales.

5.11 Configuración del Gateway

Como se hace mención, el mismo deberá cumplir como mediador entre nodo final y plataforma IoT, para lo cual se establece la siguiente configuración:

1. Se conecta la alimentación al Gateway el cual establecerá una red inalámbrica abierta llamada “Mikrotik-015FA0”, seguidamente se procede a unirse a la red.

Figura 20.
Red inicial creada por el WAP LR9



Nota. Figura obtenida de Windows 10.

2. Una vez dentro de la red inalámbrica se procede a entrar a la configuración del Gateway mediante el software especializado Winbox o desde un navegador mediante la IP 192.168.88.1, por lo cual se accede mediante un navegador. El usuario es “admin” y la contraseña inicial se deja en vacío y posteriormente se configura estas credenciales.

Figura 21.
Interfaz de ingreso a las configuraciones del Gateway



Nota. Figura obtenida en el navegador de Opera, bajo la interfaz Mikrotik.

3. Una vez dentro se procede a establecer credenciales de acceso para la red inalámbrica WiFi, estableciendo para el caso: nombre de la red “WSN-Milto”, país “Ecuador”, tipo de seguridad “WPA2” y una contraseña” *****”.

Figura 22.
Configuración red WiFi del Gateway

Wireless Protocol	<input checked="" type="radio"/> 802.11 <input type="radio"/> nstreme <input type="radio"/> nv2
Network Name	WSN-Milto
Frequency	auto MHz
Band	2GHz-B/G/N
Channel Width	20/40MHz XX
Country	ecuador
MAC Address	2C:C8:1B:01:5F:A0
Use Access List (ACL)	<input type="checkbox"/>
Security	<input type="checkbox"/> WPA <input checked="" type="checkbox"/> WPA2
Encryption	<input checked="" type="checkbox"/> aes ccm <input type="checkbox"/> tkip
WiFi Password <input checked="" type="checkbox"/> Hide

Nota. Figura obtenida en el navegador de Opera, bajo la interfaz Mikrotik.

- Del mismo modo se establece la configuración de acceso a las configuraciones del Gateway:

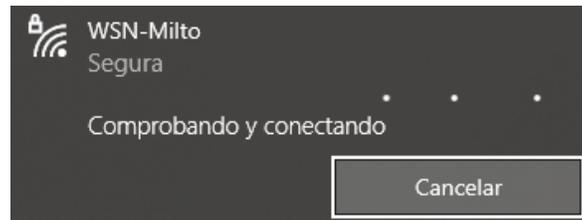
Figura 23.
Configuración para ingreso de la interfaz de Mikrotik (Gateway)

Local Network	
IP Address	192.168.88.1
Netmask	255.255.255.0 (/24)
Bridge All LAN Ports	<input type="checkbox"/>
DHCP Server	<input checked="" type="checkbox"/>
DHCP Server Range	▲ 192.168.88.10-192.168.88.254
NAT	<input checked="" type="checkbox"/>
VPN	
VPN Access	<input type="checkbox"/>
VPN Address	e7cb0e70cade.sn.mynetname.net
System	
Router Identity	MikroTik
	<input type="button" value="Check For Updates"/> <input type="button" value="Reset Configuration"/>
Password
Confirm Password
	<input type="button" value="Apply Configuration"/>

Nota. Figura obtenida en el navegador de Opera, bajo la interfaz Mikrotik.

5. Nuevamente se ingresa a la red con las nuevas credenciales con el fin de configurar los parámetros del server LoRa para TTN (The Thing Network),

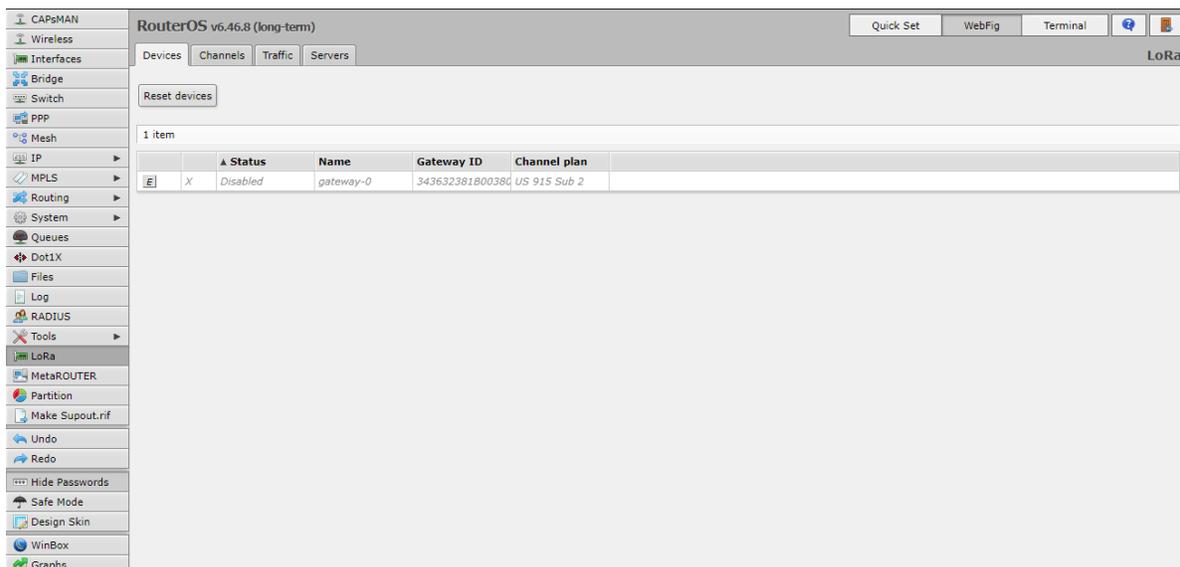
Figura 24.
Reconexión a la red WiFi preconfigurada



Nota. Figura propietaria del autor, obtenida de Windows 10.

6. Se procede a dirigirse a “WebFig” y seguidamente en el menú de la izquierda la opción de “LoRa”.

Figura 25.
Interfaz de configuración Mikrotik



Nota. Figura obtenida en el navegador de Opera, bajo la interfaz Mikrotik.

7. Se corrobora que “Gateway-0” este desactivado, de no ser el caso se desactiva. Luego se procede a dirigirse a la opción de “Servers” y agregar un nuevo servidor,

configurando para este caso: nombre del servidor “SQA-WSN-201” y la dirección “nam1.cloud.thethings.network”, seguidamente se aplica y clic en “OK”

Figura 26.
Agregar un server de enlace a TTN

▲ Status	Name
Disabled	gateway-0

Name: SQA-WSN-201

Address: nam1.cloud.thethings.networ

Up port: 1700

Down port: 1700

Nota. Figura obtenida en el navegador de Opera, bajo la interfaz Mikrotik.

8. Se abre la configuración de “Devices”, se le da clic sobre “Gateway-0”

Figura 27.
Cambio de estado de los dispositivos LoRa

▲ Status	Name
Disabled	gateway-0

Nota. Figura obtenida en el navegador de Opera, bajo la interfaz Mikrotik

9. Se configura: nombre, servidores de red “SQA-WSN-201” y el “TTN-US”, para este caso bajo la sub-banda 1 “US 915 sub 1”, se le asigna una ganancia a la antena en este caso una de 8dBi, se habilita este dispositivo marcando la casilla de “Enabled” y clic en “Apply” y “OK”.

Figura 28.
Configuración Gateway – vinculación a TTN

<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Cancel"/> <input type="button" value="Apply"/>	
Enabled	<input checked="" type="checkbox"/>
Status	Disabled
Name	Gateway-201
Hardware ID	343632381B003800
Gateway ID	343632381B003800
Network Servers	SQA-WSN-201 TTN-US
Channel plan	US 915 Sub 1
Antenna Gain	8 dB
Forward	<input checked="" type="checkbox"/> Valid <input checked="" type="checkbox"/> Error <input type="checkbox"/> Disabled

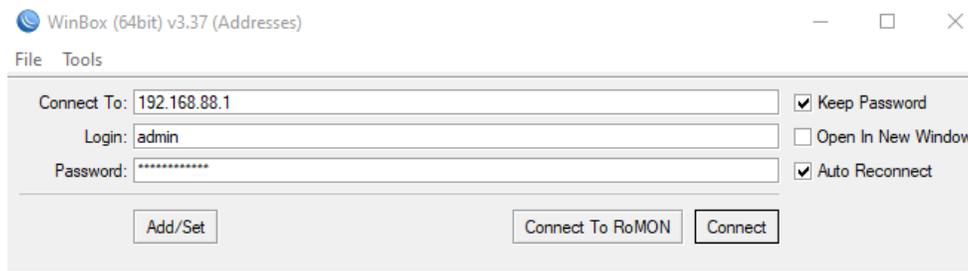
Nota. Figura obtenida en el navegador de Opera, bajo la interfaz Mikrotik.

5.11.1 Configuración adicional Red privada

En este apartado se procede establecer rutas IP (para el acceso a internet), nateos e ingreso de una IP estática, la misma que fue proporcionada por el gestor de la red privada a la cual se pretende tener una salida a internet. Esta configuración se la realiza al aire libre, con lo cual se vuelve imprescindible el uso de una laptop con la previa instalación de la herramienta de configuraciones de Mikrotik (Winbox) para las configuraciones de una red privada, las mismas son realizadas en el barrio San José alto en la torre de telecomunicaciones del proveedor.

5. Se ejecuta el programa como administrador y se coloca las credenciales de acceso al Gateway, se puede ingresar mediante MAC o por la IP de acceso, el usuario es “admin” y la contraseña “*****” (es privada por tal motivo se evitará su visualización).

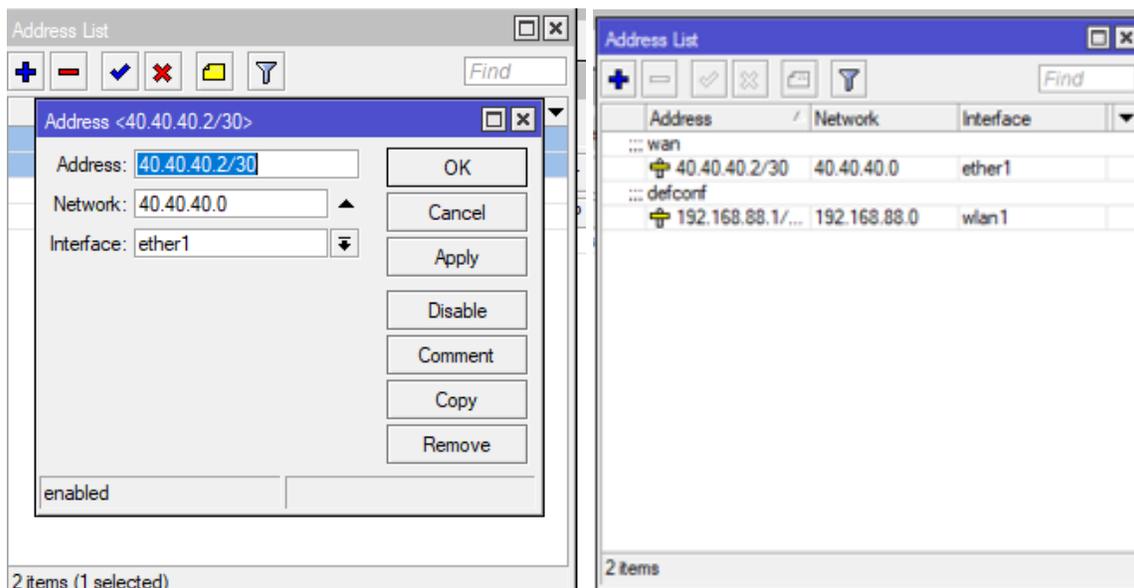
Figura 29.
Credenciales de acceso Winbox



Nota. Figura obtenida del software Winbox.

6. Una vez dentro se procede a ir a la ruta: IP – Address, para la cual se le añade una IP estática, proporcionada por el gestor de la red la cual es: 40.40.40.2/30:

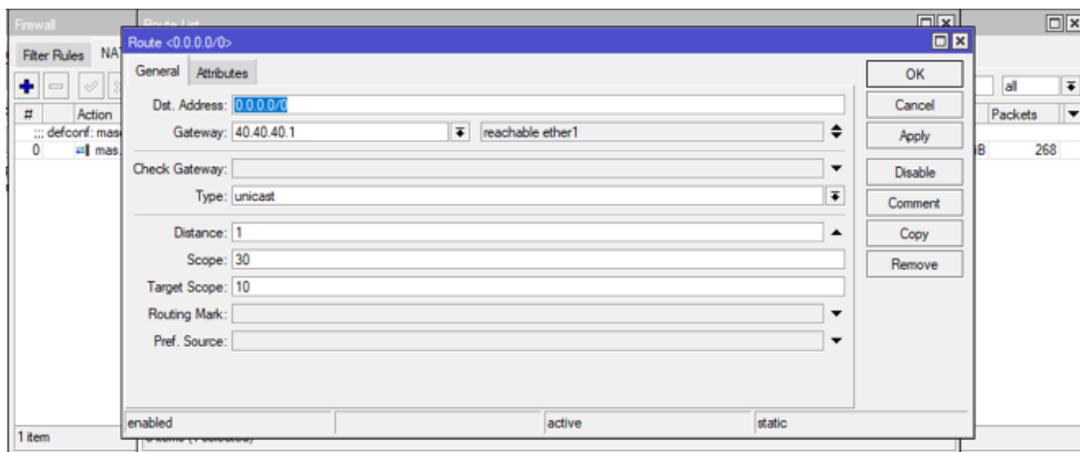
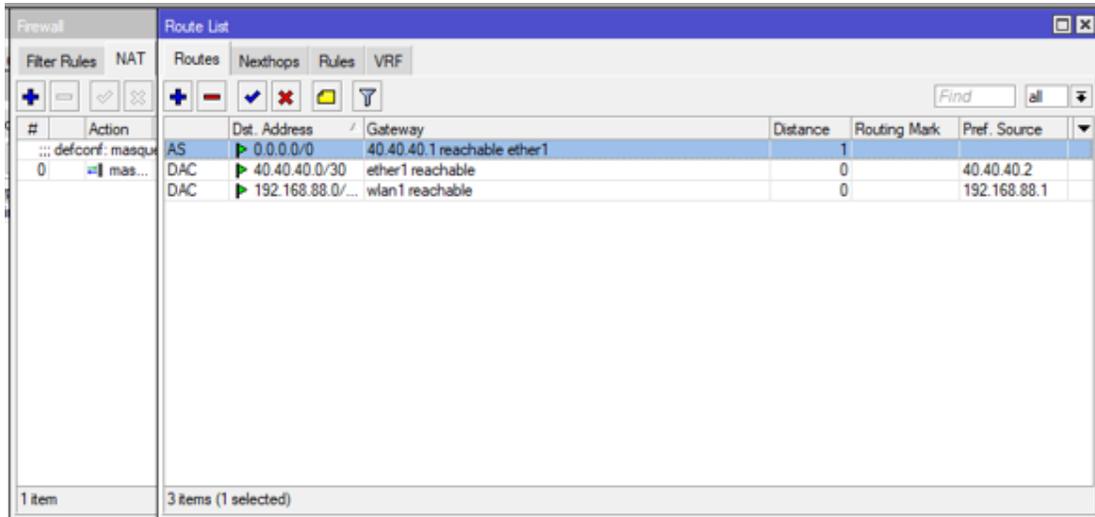
Figura 30.
Configuración IP estática Winbox



Nota. Figura obtenida del software Winbox.

7. Nuevamente se procede a ir a la ruta: IP – Firewall – NAT, en la cual se procede a asignarle la ruta por defecto (se le deja con esta configuración debido a que se tiene varios nateos detrás del mismo, por lo tanto, no existe riesgo de infiltración maliciosa).

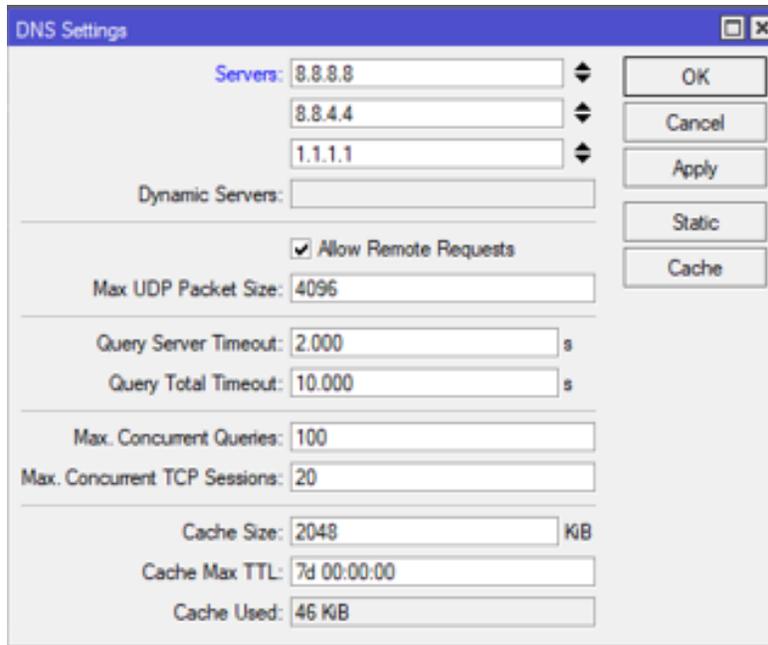
Figura 31.
NATEO, salida a internet



Nota. Figura obtenida del software Winbox.

8. Y por último se coloca una salida a los servidores DNS, en el cual se procede a colocar los servers: 8.8.8.8 – 8.8.4.4 – 1.1.1.1.

Figura 32.
Servidores DNS, salida a internet

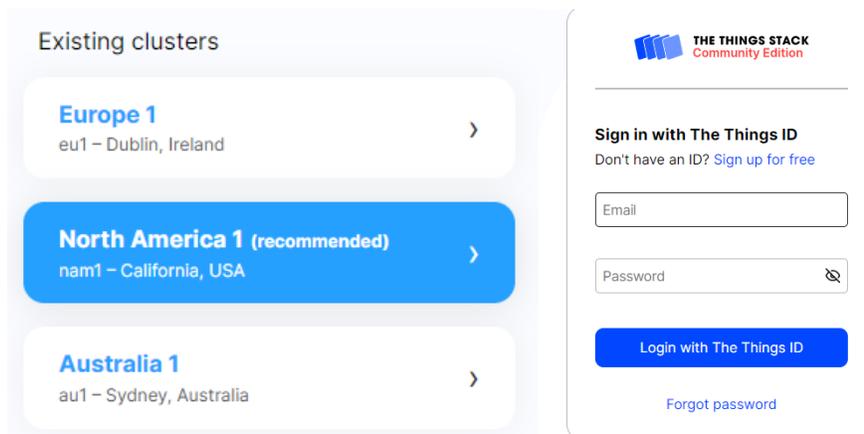


Nota. Figura obtenida del software Winbox.

5.12 Configuración de The Things Networks (TTN)

1. Se procede a abrir la página “console.cloud.thethings.network”, la misma escoger algún clúster según la región, se procede a seleccionar el más cercano a la ubicación de trabajo “Nort America - NAM” seguidamente pedirá credenciales de acceso, siendo el caso se deberá crear una cuenta (el registro es gratuito con algún correo electrónico).

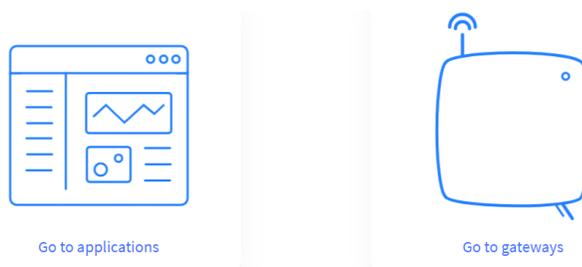
Figura 33.
Ingreso a la plataforma The Things Network



Nota. Figura obtenida de TTN console.cloud.thethings.network.

2. Luego de ingresar con las credenciales correspondientes, se procede a configurar tanto Gateway como las aplicaciones “Nodo final”. Para lo cual, el Gateway WAP LR9 adquirido deberá estar previamente conectado con cable de red hacia internet. Se escoge en primera instancia la opción de añadir un Gateway. “Go to gateways”.

Figura 34.
Ingreso de aplicaciones y Gateways a TTN



Nota. Figura obtenida de TTN console.cloud.thethings.network.

3. Seguidamente se ingresa el Gateway EUI, por defecto viene una etiqueta de fabrica en la caja del producto que dice “Gateway ID” con un código en serie, se lo ingresa y configura, el nombre en este caso “Servidor-Gateway” y el plan de frecuencia como “United States 902-928 MHz, FSB 2 (used by TTN)”. Y clic en registrar Gateway.

Figura 35.
Ingreso datos de registro Gateway WAP LR9

Register gateway

Register your gateway to enable data traffic between nearby end devices and the network.
Learn more in our guide on [Adding Gateways](#).

Gateway EUI ⓘ

Gateway ID ⓘ*

Gateway name ⓘ

Frequency plan ⓘ*

Require authenticated connection ⓘ
Choose this option eg. if your gateway is powered by [LoRa Basic Station](#)

Share gateway information
Select which information can be seen by other network participants, including [Packet Broker](#)

Share status within network ⓘ
 Share location within network ⓘ

Nota. Figura obtenida de TTN console.cloud.thethings.network.

- Ahora procede agregar una aplicación, configurando el nombre de la aplicación con cualquiera, en este caso se coloca el nombre de la placa de desarrollo usada, un pequeño nombre de la aplicación y se la crea.

Figura 36.
Creación de aplicaciones en TTN

Create application

Within applications, you can register and manage end devices and their network integration options to pass relevant data to your external services.
Learn more in our guide on [Adding Applications](#).

Application ID *

Application name

Description

Optional application description; can also be used to save notes about the ap

[Create application](#)

Nota. Figura obtenida de TTN console.cloud.thethings.network.

- Ahora se procede a registrar un dispositivo final mediante la opción “Overview” y la última opción parte inferior derecha llamada “Register end device”:

Figura 37.

Configuración de dispositivos finales

medir variables contaminante...

medir variables contaminantes SQAYN
ID: htcc-ab02s-1

Last activity 2 minutes ago

1 End device 1 Collaborator 1 API key

General information

Application ID: htcc-ab02s-1

Created at: Jan 23, 2023 15:47:50

Last updated at: Jan 23, 2023 15:47:50

Live data

17:59:36 eui-70b3d5... Delete end device

17:59:25 eui-70b3d5... Delete end device

17:59:15 eui-70b3d5... Forward join-accept message

17:59:13 eui-70b3d5... Accept join-request

17:56:24 eui-70b3d5... Forward join-accept message

17:56:22 eui-70b3d5... Accept join-request

End devices (1)

Search Import end devices Register end device

ID	Name	DevEUI	JoinEUI	Last activity
eui-70b3d57ed0059b2b-htcc-ab...		70 B3 05 7E D0 05 9B 2B	A5 A2 DA D1 2A DA 12 32	2 min. ago

Nota. Figura obtenida de TTN console.cloud.thethings.network.

- Las configuraciones para la placa de desarrollo de Heltec HTCC AB02S se basan en un plan de frecuencia FSB 2 (used by TTN), versión de LoRaWAN 1.0.2 revisión B,

y un JoinEUI, DevEUI, AppKey completamente aleatorios o generados por algún software para generar los mismos, en este caso se usaron de forma aleatoria.

7. El “End device ID” es un nombre único de registro, solo se le decidió añadir el modelo de la placa y un numero para identificar esto de forma aleatoria, se puede añadir cualquier nombre. Y por último se registra el dispositivo.

Figura 38.
Configuración de HTCC AB02S en la plataforma de TTN

End device type

Input Method ⓘ

Select the end device in the LoRaWAN Device Repository

Enter end device specifics manually

Frequency plan ⓘ *

Australia 915-928 MHz, FSB 2 (used by TTN) | v

LoRaWAN version ⓘ *

LoRaWAN Specification 1.0.2 | v

Regional Parameters version ⓘ *

RP001 Regional Parameters 1.0.2 revision B | v

[Show advanced activation, LoRaWAN class and cluster settings](#) v

Provisioning information

JoinEUI ⓘ *

21 23 12 3D AC DA 12 32 | Confirm

To continue, please enter the JoinEUI of the end device so we can determi

Provisioning information

JoinEUI ⓘ *

21 23 12 3D AC DA 12 32 | Reset

This end device can be registered on the network

DevEUI ⓘ *

70 B3 D5 7E D0 05 B4 DD | Generate 5/50 used

AppKey ⓘ *

05 FC 6F 3A 48 7A C9 BD 5B EC 0B 0D 25 6F 4B 93 | Generate

End device ID ⓘ *

eui-70b3d57ed005b4dd-ab02s-2

This value is automatically prefilled using the DevEUI

After registration

View registered end device

Register another end device of this type

Register end device

Nota. Figura obtenida de TTN console.cloud.thethings.network.

5.13 Códigos Arduino

1. Librerías empleadas, las mismas constan para establecer el enlace LoRaWAN, y para presentar datos a la pantalla OLED que integra a la placa HTCC AB02S:

```
#include "LoRaWan_APP.h"
#include <Wire.h>
#include "HT_SSD1306Wire.h"
```

2. Las configuraciones previas al enlace se establecieron de forma predeterminada al ejemplo que proporciona Heltec (Heltec, 2022) y configuradas según los requerimientos de la red WSN empleando para ello: comunicación mediante el protocolo Over The Air Activation (OTTA), en donde se debe ingresar credenciales de acceso, el canal “Region_US915”, ingresando un dispositivo que trabaja en clase A (forma trabajo en bajo consumo) y se desactiva el soporte de comando AT.

Figura 39.
Configuraciones previas al enlace, en el IDE de Arduino



Nota. Figura obtenida del IDE de Arduino.

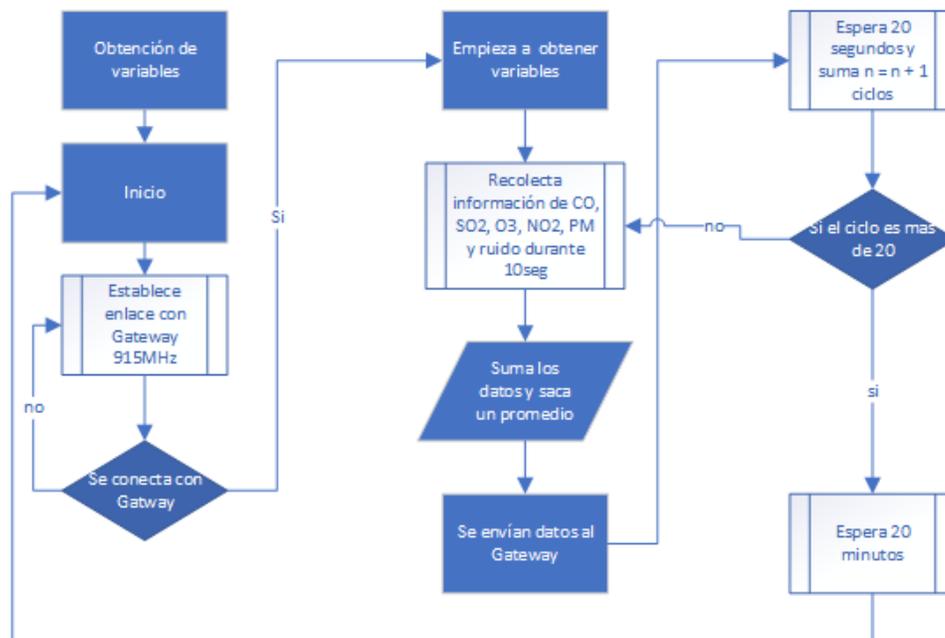
3. Seguidamente establece credenciales de acceso del AB02S y la aplicación creada en TTN, basando el enlace los datos registrados de AppEUI, DevEUI y Appkey:
4. El [código completo](#) se lo registrara y comentara en los anexos.

5.14 Proceso de funcionamiento

5.14.1 Nodo Final

Se describe el proceso de preparación de envío de paquetes, desde el módulo LoRa (Nodo final) hasta el servidor Gateway, la cual especifica la cantidad de paquetes y el periodo de su transmisión inalámbrica.

Figura 40.
Diagrama de flujo de la obtención de variables contaminantes



Nota. Figura propietaria del autor.

Este diagrama de flujo corresponde al funcionamiento de un nodo final, en el cual:

1. El nodo comenzara a encender todos los equipos que incluyen placa de desarrollo y sensores.
2. Los sensores MQ136 y MQ131 requieren de un precalentamiento de 48 horas al ser la primera vez que se encienden y de 2 minutos después del precalentamiento inicial, esto con el fin de quemar cualquier partícula que se encuentren alojados dentro del mismo. Se debe considerar picos elevados en los primeros datos obtenidos de los sensores debido al calentamiento inicial.
3. El nodo intentara establecer enlace hacia al Gateway, este enlace debe considerar parámetros de frecuencias, la versión de LoRa utilizada en la placa y credenciales de acceso vistos al momento de crear una aplicación (AppEUI, DevEUI y Appkey).
4. Ya enlazado nodo – Gateway se procede a recolectar información por partes:

- a. En el primer periodo se recolecta información de variables contaminantes durante los primeros 10 segundos.
- b. Seguidamente espera 20 segundos para volver a recolectar información, (durante esos 20 segundos el paquete se envía bajo la frecuencia 915MHz hacia el Gateway).
- c. Este proceso se repite 59 veces más generando 60 ciclos en total.
- d. Y por último una vez culminado los 60 ciclos de recolección, se procede a esperar 30 minutos más para empezar todo este proceso una vez más.

Nota: durante el ciclo de trabajo de recolección 10 minutos son usados para ello, en donde la tercera parte de esto conlleva a datos recolectados y las 2/3 partes del mismo son tiempos de espera y envío, esto se lleva a cabo con el fin de no saturar el espectro para el resto de nodos y evitar el consumo excesivo de energía.

5.15 Decodificador TTN y visualización en plataforma IoT

Este es el apartado en TTN para convertir datos del tipo hexadecimal en valores decimales medibles y entendibles para la plataforma IoT como para el ser humano, el mismo estaría conformado por:

1. El mismo debe ser configurado en la plataforma de TTN en el apartado de: Aplicaciones – Nodo Final – Payload formatters – Up Link – Custom JavaScript formatter – Formatter code.
2. Esta función asigna valores de decimales a entradas hexadecimales, repasando cada valor hexadecimal y asignado, un valor entero, signo y coma decimal.

```
function bytesToFloat(by) {
    var bits = by[3]<<24 | by[2]<<16 | by[1]<<8 | by[0];
    var sign = (bits>>>31 === 0) ? 1.0 : -1.0;
    var e = bits>>>23 & 0xff;
    var m = (e === 0) ? (bits & 0x7fffffff)<<1 : (bits & 0x7fffffff)
    | 0x800000;
}
```

```

    var f = sign * m * Math.pow(2, e - 150);
    return f;
}

```

3. Esta función utiliza la anterior con el fin recorrer todo el valor hexadecimal obtenido y coordinar cada valor en cada variable contaminante, seguidamente cada variable se le asigna un campo (field) mismo que es utilizado en la plataforma IoT Thing Speak (TS).

```

function Decoder(bytes, port) {
    i = 0;
    adB = bytesToFloat(bytes.slice(i,i+=4));
    bCO = bytesToFloat(bytes.slice(i,i+=4));
    cSO2 = bytesToFloat(bytes.slice(i,i+=4));
    dO3 = bytesToFloat(bytes.slice(i,i+=4));
    eNO2 = bytesToFloat(bytes.slice(i,i+=4));
    fPM = bytesToFloat(bytes.slice(i,i+=4));

    var decoded = {};

    decoded.field1 = adB;
    decoded.field2 = bCO;
    decoded.field3 = cSO2;
    decoded.field4 = dO3;
    decoded.field5 = eNO2;
    decoded.field6 = fPM;

    return decoded;
}

```

4. Previamente se debe tener creada una cuenta en TS la misma que tiene relación directa con Mathworks (software de Matlab), la misma proporciona de forma gratuita 1 año de servicio en el cual, se puede llegar a enviar 3 millones de paquetes, cada 15 segundos entre paquete y hasta un máximo de registro de 4 canales (nodo final). El mismo servicio se puede ampliar por un costo mínimo de 45\$ por una cuenta de 30 millones de paquetes, 1 segundo de envío entre paquetes y hasta 10 canales (nodo final).

Figura 41.
Registro e inicio de sesión en TS

The screenshot shows the ThingSpeak website interface. At the top, there is a navigation bar with 'Channels', 'Apps', and 'Support' links, along with 'Commercial Use' and 'How to Buy' options. Below the navigation bar, there is a text prompt: 'To use ThingSpeak, you must sign in with your existing MathWorks account or create a new one.' This is followed by a paragraph explaining that non-commercial users can use ThingSpeak for free with certain limitations, while commercial users are eligible for a time-limited free evaluation. A link for 'paid license options' is provided for commercial, academic, home, and student usage.

Below the text, there is a MathWorks logo and an email input field. A 'Next' button is visible. To the right, a diagram illustrates the data flow: 'SMART CONNECTED DEVICES' send data to a cloud labeled 'DATA AGGREGATION AND ANALYTICS ThingSpeak'. This cloud then connects to a 'MATLAB' interface for 'ALGORITHM DEVELOPMENT SENSOR ANALYTICS'.

Nota. Figura obtenida de TS thingspeak.com.

5. Una vez ingresada a la cuenta, se debe ir a: Channels – My channels – Create new Channel.

Figura 42.
Agregación de nuevos canales para nodos finales

The screenshot shows the 'My Channels' page in ThingSpeak. At the top, there is a 'New Channel' button and a search bar labeled 'Search by tag'. Below this is a table with columns for 'Name', 'Created', and 'Updated'. The table contains one entry: 'SQA-N', created on '2023-02-13' and updated on '2023-03-06 15:36'. Below the table, there are buttons for 'Private', 'Public', 'Settings', 'Sharing', 'API Keys', and 'Data Import / Export'.

Name	Created	Updated
SQA-N	2023-02-13	2023-03-06 15:36

Nota. Figura obtenida de TS thingspeak.com.

6. En el cual se va a especifica nombre y una pequeña descripción, a continuación, clic en crear.

Figura 43.
Parámetros de ingreso para la creación de un nuevo canal

The image shows a web form titled "New Channel". It contains the following elements:

- A text input field labeled "Name".
- A larger text input field labeled "Description".
- A section with three rows, each labeled "Field 1", "Field 2", and "Field 3".
- Each row has a small text input field (containing "Field Label 1" for Field 1) and a checkbox to its right.
- The checkboxes for Field 1, Field 2, and Field 3 are checked, unchecked, and unchecked respectively.

Nota. Figura obtenida de TS thingspeak.com.

7. Una vez creado este canal se debe tener en cuenta la ID del canal para lo cual nuestra ID de uno de los nodos finales es:

Figura 44.
ID de identificación del canal en TS

The image shows a navigation bar at the top with the Thingspeak logo and menu items: "Channels", "Apps", "Devices", and "Support". Below the navigation bar, the channel name "SQA-N" is displayed in large letters. Underneath, the following information is shown:

- Channel ID: 2031405
- Author: mwa0000017843835
- Access: Private

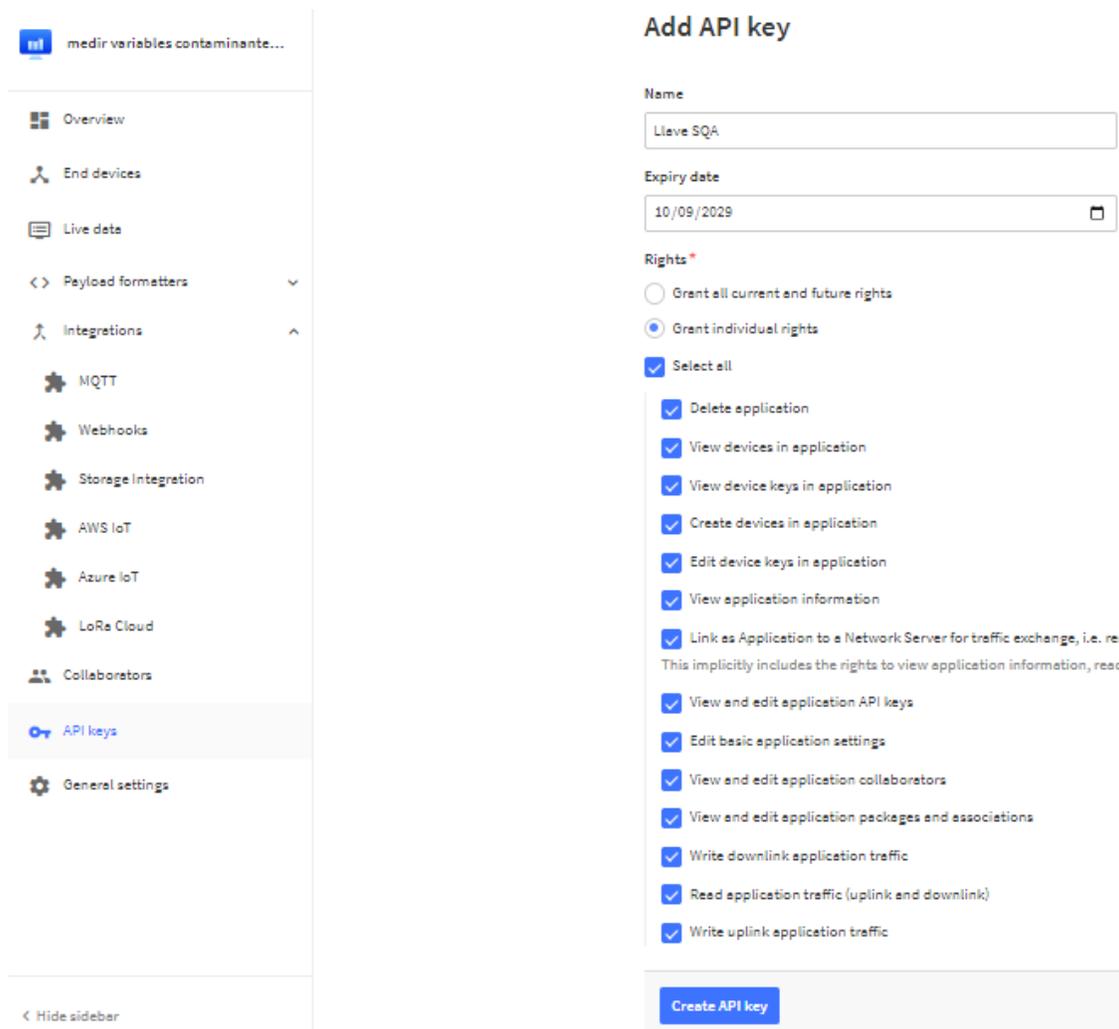
On the right side, there is a button labeled "Medir variables contaminantes".

Nota. Figura obtenida de TS thingspeak.com.

8. Ahora se configura la plataforma IoT, en donde primero se registrará la plataforma a emplear y los permisos que se le va a dar en la interfaz de TTN, para

ello se procede a dirigirse a la ruta: aplicaciones – API keys – add API KEY. Se le asigna un nombre, fecha de expiración de la llave, y los permisos, por defecto se ha asignado todos los permisos para el presente proyecto, debido a que solo se enviarán datos. Y por último clic sobre “Create API key”.

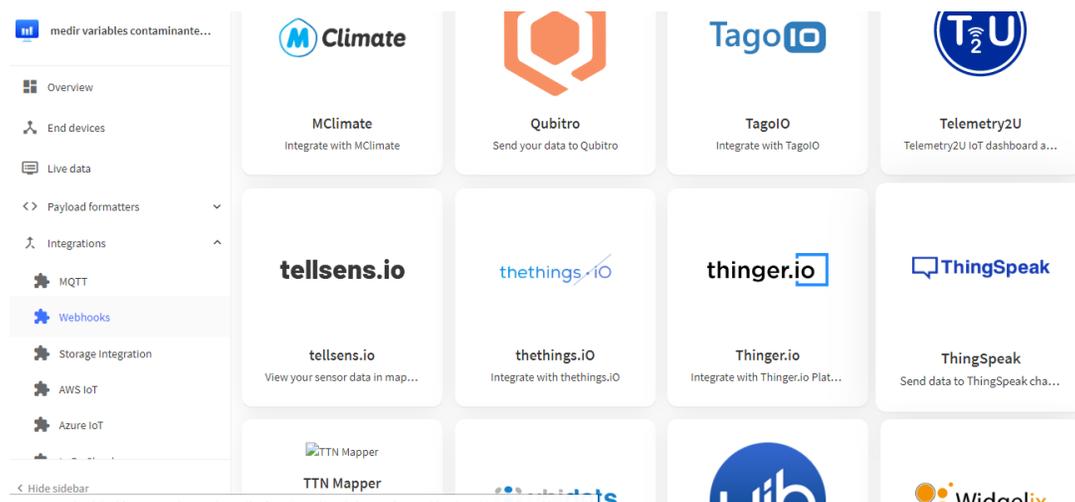
Figura 45.
Creación de una API key en TTN



Nota. Figura obtenida de TTN console.cloud.thethings.network.

9. Seguidamente se procede a dirigirse a la ruta de: aplicaciones – integraciones – Webhooks y se busca la plataforma IoT a utilizar en este caso se optó por la de ThingSpeak (TS).

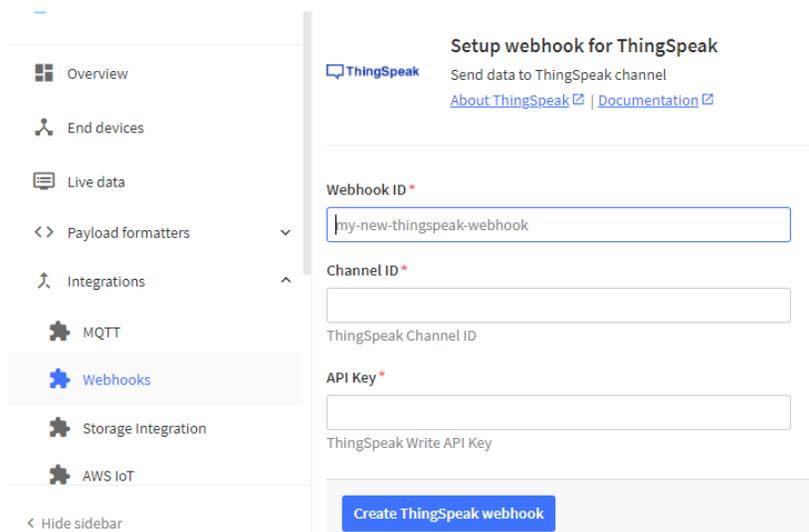
Figura 46.
Configurar plataforma IoT desde TTN



Nota. Figura obtenida de TTN console.cloud.thethings.network.

10. Se le asigna una ID puede ser aleatoria, se copia el ID del canal creado con anterioridad y se le asigna el API key que de la misma forma ya se ha creado con anterioridad.

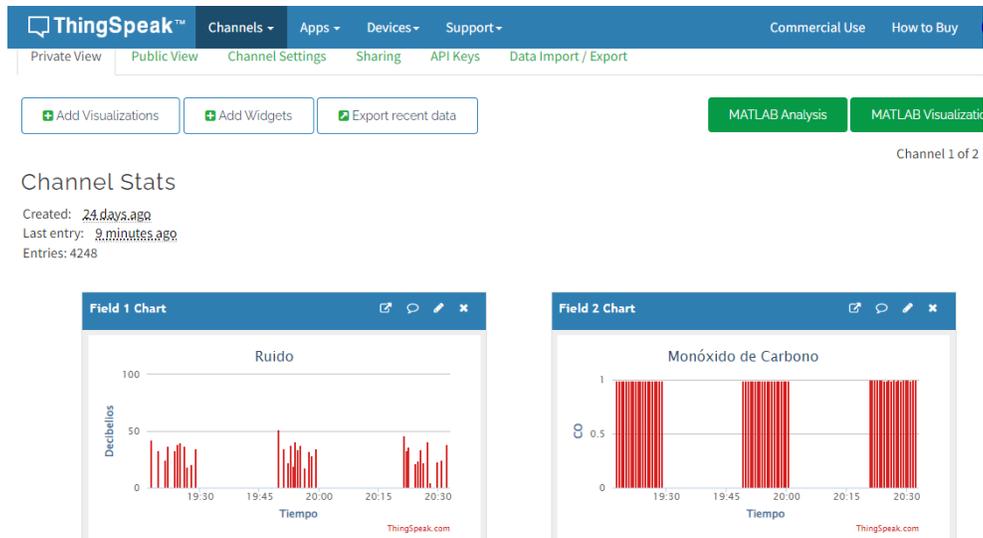
Figura 47.
Parámetros de conexión entre TTN y TS



Nota. Figura obtenida de TTN console.cloud.thethings.network.

11. Ahora nuevamente se regresa a TS, en el cual se configura los campos de cada variable contaminante, se procede ir a la ruta de: TS – Channels – My channels – Channel Settings, aquí se le asigna a cada “Field” un nombre de variable y se lo habilita. Tener en cuenta que estos “Fields” están relacionados con el decodificador de TTN, en cuyo caso cada variable se le asigna la siguiente configuración:
 - a. Field 1: Decibelios
 - b. Field 2: CO
 - c. Field 3: SO2
 - d. Field 4: O3
 - e. Field 5 NO2
 - f. Field 6: PM
12. Se guarda las configuraciones y seguidamente se aprecian gráficos subsecuentes de estos datos en: TS – Channels – My Channels – Private View.

Figura 48.
Vista de los Fields y valores de variables contaminantes



Nota. Figura obtenida de TS thingspeak.com.

5.16 Construcción prototipo

Este mismo consta de 3 partes fundamentales: Armazón, soportes, y circuitería interna. Cada una de ellas tiene un trabajo específico para lo cual es necesario en ambientes no controlados como lo es el centro de Loja. Los soportes tienen la función de generar un agarre en las paredes donde se lo desea implementar y adicionalmente proporciona una base para la instalación de un panel solar, mismo que ayudará al suministro energético de una batería de litio. Se considera un armazón (caja metálica) con el propósito de soportar ambientes lluviosos y bajo el sol, adicionalmente considera espacio suficiente para equipar todos los módulos (sensores y placa de desarrollo), baterías y cables que incorpora dentro del mismo. Y por último la circuitería, es una conexión entre placa, sensores y suministro energético.

5.16.1 Materiales de caja

- a. 1 caja plástica (caja de paso) certificación IP67 20x20x10 cm (largo – ancho – alto)
- b. 1 diseño de soporte 3D impresos para soporte de sensores.
- c. 2 pernos para pared de 0.5cm de diámetro con su respectiva arandela y taco Fisher.
- d. 7 tornillos de 0.25cm de diámetro y 8 tuercas.
- e. 5 metros de cable extensor de energía (extensión eléctrica de 5 metros).
- f. Cable USB a Micro USB de 15cm mínimo.
- g. Cargador de 5 a 24 voltios con 500 mili-amperes de corriente.
- h. Batería Lipo de mínimo 3000mA con conector jst 1.25

5.16.2 Materiales de circuito

Al ser un nodo que compone de sensores del tipo modular, se crea un circuito con suficientes slots para el fácil montaje y desmontaje de los cuatro sensores, del mismo modo un slot para el fácil desmontaje de la placa de desarrollo:

- a. 3 reles de slots para circuitos electrónicos de 40 pines
- b. 15 jumpers de entrada macho y hembra
- c. 1 sensor MQ136

- d. 1 sensor MQ131
- e. 1 sensor GP2Y1010F
- f. 1 sensor Max9814
- g. 1 batería de litio de 3.7v a 3000mAh
- h. 1 cable micro-USB a USB 2.0
- i. 1 panel solar 5-6V 500mA-1000mA.

5.16.3 Herramientas para la construcción

- a. 1 destornillador en estrella y plano
- b. 1 taladro
- c. 1 broca de 7/10, 3/5, 1/5 de diámetro
- d. 1 amoladora con disco de corte

5.16.4 Resultados de armado

Los mismos podrán apreciarse en los anexos en el punto [14.3 Construcción prototipo nodo final.](#)

5.17 Validación de las variables contaminantes

5.17.1 Validación variable ruido (dB)

Con ayuda del equipo Sonómetro Digital Data Logger - DT-8852 – CEM, el cual está diseñado para la medición de ruidos ambientales en fábricas, escuelas, aeropuertos, viviendas, entre otros. Aplicando para ello la norma IEC 61672-1 la cual es una especificación internacional desarrollada por la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC), que define los requisitos para los sonómetros (equipo expuesto en el Anexo 6). Este estándar es esencial para garantizar la precisión y coherencia de las mediciones de ruido en una variedad de aplicaciones, incluida la investigación ambiental, el monitoreo del ruido en el lugar de trabajo y la evaluación de productos acústicos.

Aspectos clave del DT-8852

1. Precisión y Exactitud: Nivel 1 y Nivel 2, siendo el Nivel 1 el más preciso.

2. Rango de frecuencias: el rango de frecuencias que un sonómetro debe ser capaz de medir.
3. Rango Dinámico: Define el rango de niveles de presión sonora.
4. Tiempo de respuesta: describe el tiempo de respuesta a diferentes tipos de mediciones de ruido (rápido, lento e impulsivo).
5. Calibración: contiene instrucciones para calibrar el sonómetro para garantizar resultados de medición trazables y confiables.
6. Características de ponderación: define curvas de ponderación de frecuencia (como A, C y Z) esenciales para evaluar cómo el sonido afecta al oído humano.

Tabla 19.
Características sonómetro DT-8852

Especificaciones	
Normativa	IEC61672-1 Clase 2
Exactitud	±1.4dB
Rango de frecuencia	31.5Hz a 8KHz
Rango dinámico	50dB
Niveles de rangos	Bajo: 30 – 80dB Medio: 50 – 100dB Alto: 80 – 130dB Auto: 30 – 130dB
Tiempo de ponderación	Rápido: 125ms Lento: 1seg



Micrófono	0.5 pulgadas – micrófono de condensador electrolítico
Resolución	0.1dB
Actualización de pantalla	2 veces por segundo
Salida analógica	AC: 1Vrms – DC: 10mV/dB
Registro de datos	Tiempo de muestreo: 1 – 59seg Valores del registro: 32600 datos

Nota. Tabla propietaria del autor con información concluyente de (SOLTEC, 2024).

Para el proceso de calibración se considera situaciones en ambientes controlados (domicilio) y en entornos abiertos. Para lo cual se coloca a la par el nodo final y el DT-8852, generando los siguientes resultados:

Tabla 20.
Comparativa sonómetro DT-8852 y sensor Max9814 ambiente controlado

Ambiente	DT-8852	Nodo Final	Margen
Controlado Ruido bajo 8m	33dB	20dB	13dB
Controlado Ruido medio 4m	50dB – 60dB	48dB – 55dB	2dB – 5dB
Controlado Ruido alto 0.5m	75dB – 85dB	73dB – 79dB	2dB – 6dB

Nota. Tabla propietaria del autor.

Para la fuente de origen del ruido se emplea un ruido proveniente de un tono de llamada a distancias desde los 0.5 metros hasta los 8m dentro de un domicilio, lo cual establece una situación controlada. Los resultados indican que el sonómetro tiene mayor precisión para captar ruidos bajos, y a medida que estos incrementan en intensidad se van apreciando datos similares entre el nodo final y el sonómetro.

Tabla 21.
Comparativa sonómetro DT-8852 y sensor Max9814 exteriores

Ambiente	DT-8852	Nodo Final	Margen
Ruido 1m voz de persona	65dB – 69dB	63dB – 66dB	2dB – 3dB
Ruido camión basura 10m a 5m	70dB – 78dB	69dB – 75dB	1dB – 3dB
Ruido vehículo aplanadora 10m a 5m	66dB – 71dB	65dB – 69dB	1dB – 2dB

Nota. Tabla propietaria del autor.

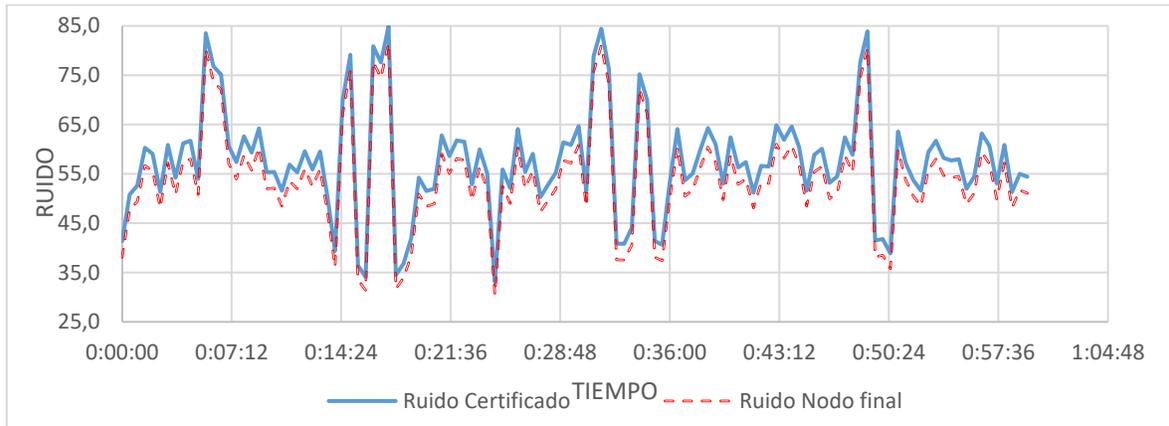
Para el origen del ruido se considera el uso de un claxon de automóvil mediano, la voz de una persona y el de un camión grande. Todos estos ruidos son generados de forma intensa en cada una de sus pruebas generando valores que oscilan dentro del rango del sonómetro.

Figura 49.
Sonómetro DT-8852 y nodo final



Nota. Figura propietaria del autor.

Figura 50.
Comportamiento del DT-8852 vs nodo final



Nota. Figura propietaria del autor.

Cálculo de la desviación estándar

- Calcular la media (μ): La media es el promedio de los datos.

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

donde N es el número de datos y x_i es cada valor de los datos.

- Restar la media y cuadrar el resultado: Para cada dato, resta la media y eleva al cuadrado el resultado.

$$(X_i - \mu)^2$$

- Calcular la varianza: La varianza es el promedio de los cuadrados de las diferencias calculadas en el paso anterior.

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2$$

- Calcular la desviación estándar: La desviación estándar es la raíz cuadrada de la varianza.

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2}$$

Tabla 22.
Desviación estándar comportamiento del ruido sobre los sensores

Cálculo de la desviación estándar			
DT-8852		Nodo Final	
Numero de datos 1	120	Numero de datos 2	120
Valor medio 1 (X)	57,6	Valor medio 2 (X)	54,2
Suma = (Xi1 - X1) ²	13857,3067	Suma = (Xi2 - X2) ²	13636,7093
Desviacion E. 1	10,79110537	Desviacion E. 2	10,7048678

Nota. Tabla propietaria del autor. Los resultados se pueden apreciar en el Anexo 6.

Se establece un resumen de la sensibilidad de ambos equipos (nodo final y DT-8852), los mismos se los coloca en un ambiente externo con el fin de estresar ambos sensores y corroborar la efectividad que tendría el nodo final frente a un equipo certificado. Las muestras se las hace cada 30 segundos en una avenida concurrida de tráfico vehicular. Como se puede apreciar en los resultados la gráfica se figura con una desviación estándar de 10,7911 para el equipo certificado mientras que para el nodo final es de 10,7048.

5.17.2 Validación variable monóxido de carbono (CO)

Para este proceso se considera el equipo denominado Medidor de Monóxido de Carbono AS8700A es un dispositivo portátil diseñado para medir la concentración de monóxido de carbono (CO) en el aire, el cual sigue la norma EN50291 que define formalmente los métodos de prueba y los requisitos de rendimiento para detectores de monóxido de carbono residenciales (equipo expuesto en el Anexo 7). Estos tipos de detectores son fundamentales para la seguridad en una variedad de situaciones, ya que el monóxido de carbono es un gas tóxico, incoloro e inodoro que puede ser fatal en altas concentraciones.

Aspectos clave del medidor AS8700A:

1. Pantalla digital: muestra la concentración de CO en segundos en ppm.

2. Rango de medición: de 0 a 1000 ppm, detecta concentraciones altas y bajas.
3. Portabilidad: Su diseño compacto y portátil permite su uso en una variedad de lugares y situaciones, desde inspecciones de viviendas hasta aplicaciones industriales.
4. Facilidad de uso: controles simples y calibración automática o manual.
5. Durabilidad y suministro de energía: Suelen funcionar con baterías, por lo que pueden usarse en lugares donde no hay una fuente de energía.

Modos de uso:

1. Seguridad en el hogar: detecta posibles fugas de monóxido de carbono de calentadores, hornos, chimeneas y otros dispositivos de combustión.
2. Inspección de vehículos: Utilizado por mecánicos y técnicos para probar el escape del vehículo en busca de monóxido de carbono.
3. Industrial y Comercial: En fábricas, talleres y otros entornos industriales donde se utilizan procesos de combustión.
4. Emergencia y Rescate: Esta es una herramienta importante para los bomberos y equipos de rescate que necesitan monitorear los niveles de CO en espacios confinados durante situaciones de incendio o rescate.

Tabla 23.
Características medidor AS8700A

Especificaciones



Sensor	Sensor de gas electroquímico
Detección	Monóxido de Carbono (CO) – Temperatura (°C, °F)
Unidad de medida	Partes por millón (ppm)
Rango de medición	0 – 1000ppm 0 – 50°C
Precisión CO	±5% o ± 10ppm
Precisión de temperatura	±2.5°C
Tiempo de respuesta	<60 segundos
Alarma	Luz y sonido
Modos de operación	<ol style="list-style-type: none"> 1. Detección continua: está en constante detección 2. Retención de datos (Hold): bloquea los resultados 3. Máximo y mínimo: muestra el valor máximo o mínimo obtenido

Nota. Tabla propietaria del autor con información concluyente de (OpenSky, 2024).

Para el proceso de calibración se coloca en dos situaciones el detector de monóxido de carbono AS8700A y al sensor MQ136, de unos 10 centímetros de la fuente emisora de contaminación hasta 1 metro de la misma fuente. Esto debido a que exposición concentrada del contaminante puede ser nociva para la salud. Se emplea para ello dos tipos de fuentes: el humo desprendido por la quema de carbón y el humo desprendido por la quema de papel. Ambos compuestos llevan en sí al momento de su combustión CO, es por ello que deben reaccionar los sensores al estar en contacto con la fuente de contaminación.

Debido que ambas son fuentes pequeñas de combustión, las pruebas se las realiza en espacios reducidos o a su vez acortando la distancia entre sensor y fuente emisora. En el

primer caso, al quemar el papel se lo realiza en un espacio cerrado llegando a colocar al sensor a no más de 10 centímetros y 1 metro de la fuente, y en el caso de la quema del carbón se lo realiza a no más de 20 centímetros y de 1 metro de distancia. Todo ello con el respectivo cubre bocas y nariz, para evitar la intoxicación a la exposición prolongada e intensa.

Tabla 24.
Comparativa medidor AS8700A y sensor MQ136

Ambiente	AS8700A	Nodo final	
		MQ136	Margen
Cerrado combustión de papel 10cm	174ppm	51ppm	123ppm
Cerrado combustión de papel 1m	25ppm	29ppm	4ppm
Abierto combustión carbón 20cm	469ppm	89ppm	380ppm
Abierto combustión carbón 1m	20ppm	23ppm	3ppm

Nota. Tabla propietaria del autor.

Los resultados de las dos pruebas a 10cm y 1m realizadas con el medidor AS8700A indican que se activa más rápidamente cuando se encuentra más cerca de la fuente emisora, produciendo valores elevados que oscilan entre 174 y 469 ppm dependiendo del tipo de fuente. Este aumento se atribuye a su amplio rango de medición de hasta 1000ppm. Además, la fuente emisora de carbón es la principal generadora de CO debido a su composición química. En contraste, el sensor MQ136 arroja resultados por debajo de los 100 ppm, que es el límite de medición para este compuesto sobre este sensor.

No obstante, al efectuar mediciones a una distancia de 1 metro, se observan valores inferiores en cada uno de los sensores, oscilando entre 25 y 30 ppm para la combustión del papel, y entre 20 y 23 ppm para la combustión del carbón. Estos resultados indicarían una sensibilidad mayor registrada en el medidor a distancias más cortas, mientras que las concentraciones medidas por ambos sensores serían casi idénticas a distancias más largas, sugiriendo una convergencia en sus capacidades de detección. Además, podemos notar que

el CO en el caso de la combustión del carbón es menor, esto se atribuiría a su capacidad del compuesto de ser menos denso que el aire y dispersarse con mayor facilidad en ambientes abiertos como fue el caso de la quema del carbón.

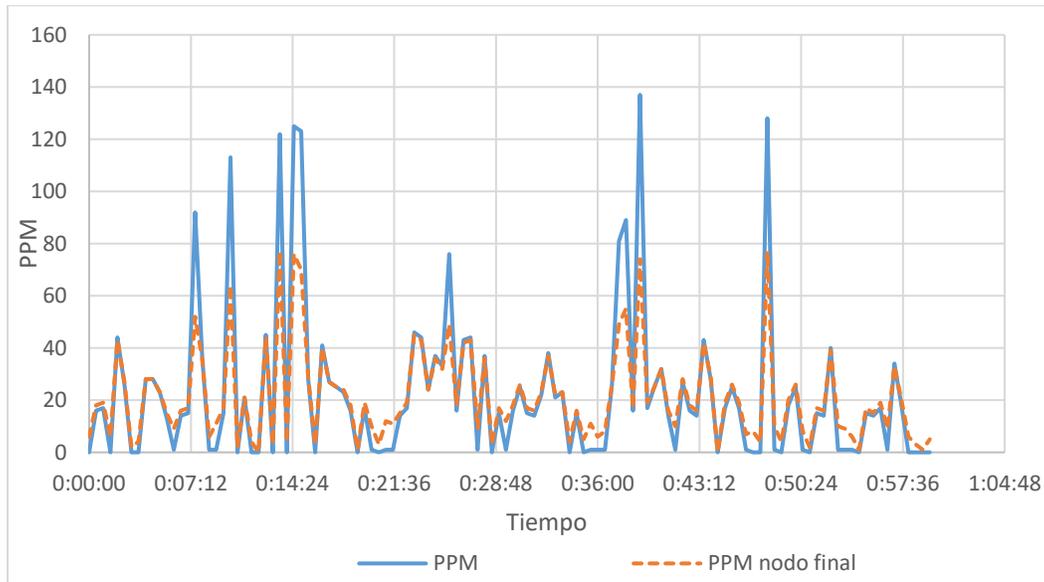
Figura 51.

Sensor MQ136 y medidor AS8700A, en ambientes de prueba



Nota. Figura propietaria del autor.

Figura 52.
Comportamiento del AS8700A vs nodo final



Nota. Figura propietaria del autor.

Cálculo de la desviación estándar

Las fórmulas utilizadas se pueden apreciar en el apartado de 5.17.1 Validación de la variable ruido, a continuación, se presentan los resultados con la ayuda de dichas formulas.

Tabla 25.
Desviación estándar comportamiento del monóxido de carbono sobre los sensores

Cálculo de la desviación estándar			
AS8700A		Nodo Final	
Numero de datos 1	120	Numero de datos 2	120
Valor medio 1 (X)	22,6	Valor medio 2 (X)	21,3
Suma = (Xi1 - X1) ²	106771,1667	Suma = (Xi2 - X2) ²	37031,5917
Desviacion E. 1	29,9539095	Desviacion E. 2	17,6405739

Nota. Tabla propietaria del autor. Los resultados se pueden apreciar en el Anexo 7.

Se establece un resumen de la sensibilidad de ambos equipos (nodo final y AS8700A), los mismos se los coloca en un ambiente externo controlado empleando fuentes de combustión como lo es el carbón y el papel con el fin de estresar ambos sensores y corroborar

la efectividad que tendría el nodo final frente a un equipo certificado. Las muestras se las hace cada 30 segundos durante una hora. Como se puede apreciar en los resultados la gráfica se figura con una desviación estándar de 29,9539 para el equipo certificado mientras que para el nodo final es de 17,6405.

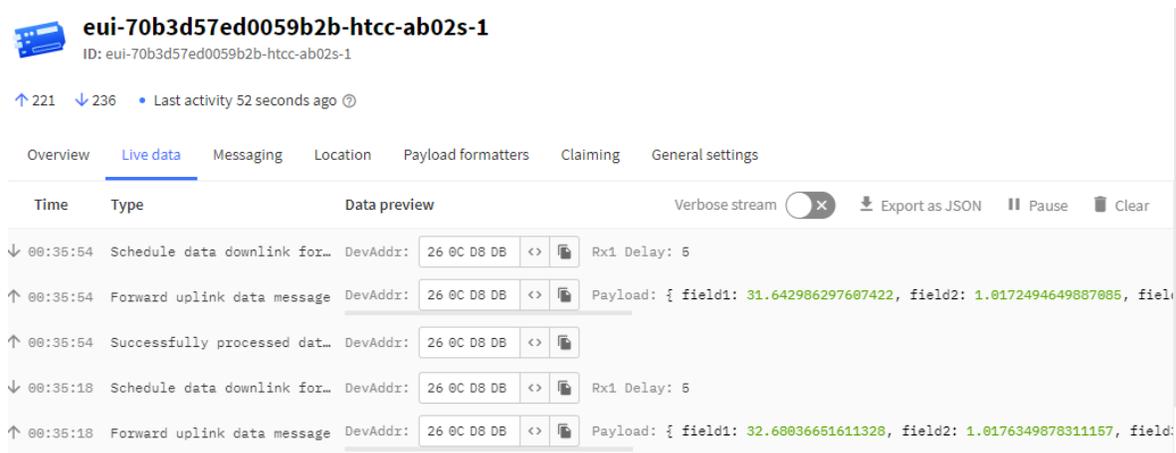
6 Resultados

En este apartado, se corroborará la funcionalidad de la red WSN, el enlace LoRaWAN, la conexión de Gateway a plataforma IoT y se analizarán las variables contaminantes en razón a los datos recolectados de las mismas, este último en un periodo establecido de máximo un mes y mínimo de dos semanas para la recolección de datos.

6.1 Red de sensores inalámbricos (WSN)

Cuatro sensores van conectados directamente a la placa HTCC AB02S, la cual recolecta información de todos ellos y les suministra energía para su funcionamiento normal. Esta red de sensores envía datos desde la placa hasta el Gateway, el mismo decodificaría estos datos para su correcta interpretación:

Figura 53.
Visualización de datos contaminantes desde TTN



Nota. Figura obtenida de TTN, este gráfico muestra los datos recibidos por el Gateway enviados a la plataforma de TTN y decodificados para su correcta interpretación, denotando cada campo (Field) como una variable contaminante específica, estos datos son recibidos cada 30 segundos hasta un máximo de 20 veces, luego se los vuelve a recibir en 20 minutos para repetir el mismo proceso. En total se envían 40 paquetes por hora, cada hora tiene dos periodos de trabajo y cada periodo de trabajo contiene 20 ciclos de recolección de variables contaminantes.

6.2 Enlace LoRaWAN

Para lo cual se necesita de la ayuda de un módulo con chip integrado, el mismo que se utiliza para este proyecto es el CubeCell HTCC AB02S, una antena de 8dBi de ganancia con conector SMA macho integrado y un dispositivo (Gateway) en este caso el WAP LR9 de Mikrotik.

El enlace establece un periodo de conexión de unos cuantos segundos (3 segundos aproximados) para enlazar el módulo AB02S con el Gateway a unos cuantos metros de distancia (5 a 20 metros aproximados) con un RSSI (Received Signal Strength Indicator) que es el indicador de fuerza de la señal es de aproximadamente -87dBm y para distancias de 500m con interferencias en un entorno urbano es de -105dBm que es un valor muy bueno considerando que es un enlace del tipo LoRaWAN, estos enlaces pueden llegar a tener peores RSSI de -120dBm.

Figura 54.

Calidad de la señal enlace LoRa RSSI

```

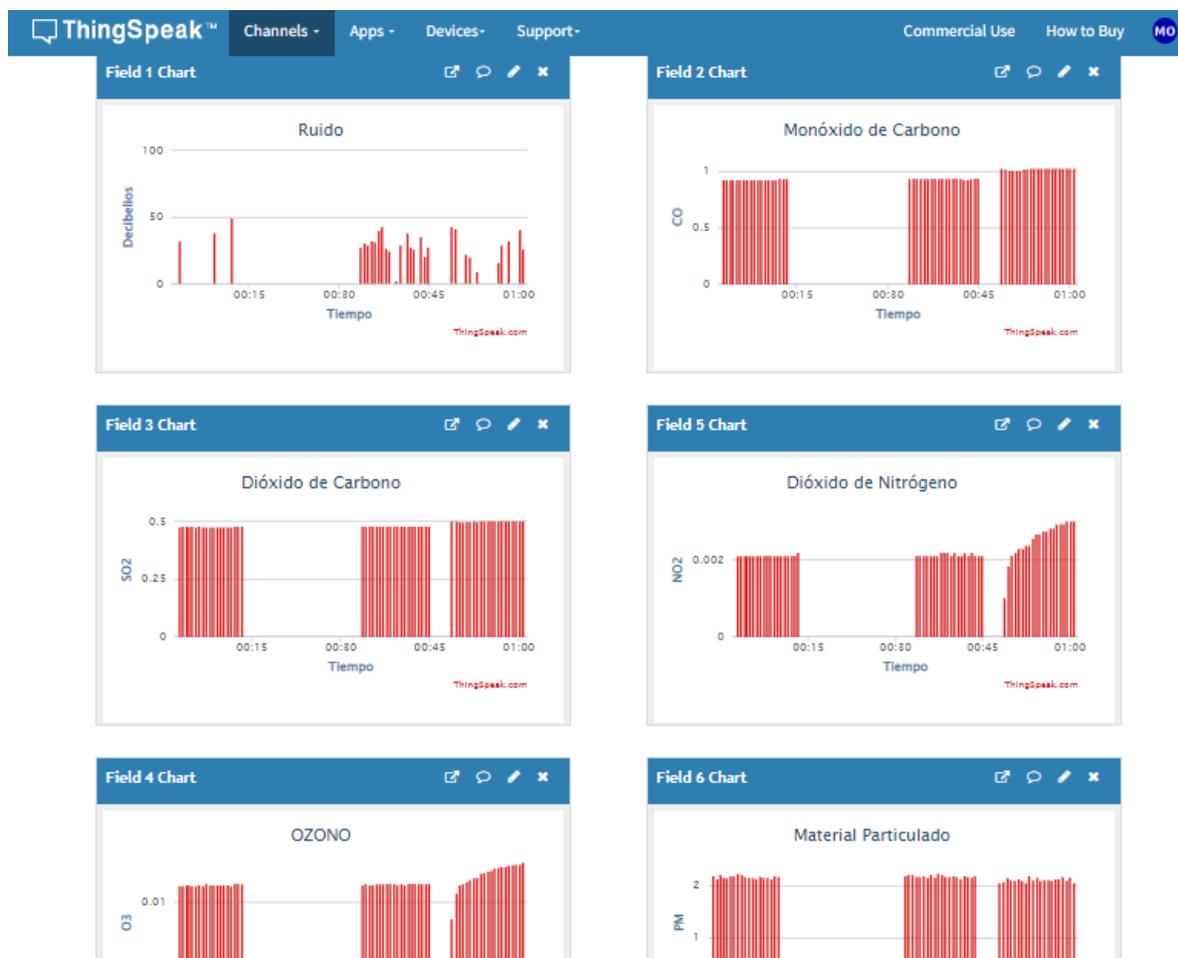
- -
Voltage mql31: 0.04ratio: 6.98muestra: 7 ----- 105
Voltage mql31: 0.04ratio: 6.98muestra: 7 ----- 106
decibelios: 41.27 CO: 1.11 SO2: 0.55 O3:0.01 NO2: 0.00 PM2.5: 2.26
confirmed uplink sending ...
received unconfirmed downlink: rssi = -87, snr = 10, datarate = 13
```

Nota. Figura obtenida del IDE de Arduino, muestra que durante un envío de paquetes se recibe una confirmación de recepción (Gateway) y se calcula el RSSI de ese paquete recibido, generando un valor promedio para una conexión de 20m con la tecnología LoRaWAN.

6.3 Conexión TTN (Gateway) y TS (plataforma IoT)

En esta conexión se emplea la plataforma de ThingSpeak (TS), misma que proporciona características necesarias para la visualización de datos, es muy amigable la plataforma con el usuario y maneja una conexión directa con TTN. Este enlace ya fue establecido con anterioridad, a continuación, se muestran datos resultantes de los sensores:

Figura 55.
Datos obtenidos mediante la plataforma ThingSpeak



Nota. Figura obtenida de TS, dentro de cada variable expuesta se puede configurar el tipo de figura para que exista otra manera de representar los datos, en este caso se usa el tipo “columna”, debido a que su análisis se facilita a la hora de llegar a una conclusión.

Además de que se puede llegar a visualizar contenido del censado, también existen múltiples aplicaciones en dispositivos como smartphones para la visualización de dichos datos, el único requisito es tener una conexión a internet y configurar debidamente la aplicación, misma que se debe colocar la ID del canal en donde están los datos de interés de

la plataforma TS y en caso de ser un canal privado colocar debidamente la API key de lectura proporcionada por el canal de TS.

- Canal ID TS nodo 1: 2031405
- API key: JHMDDG0TC5YVUF1I

6.4 Implementación Nodos

Los nodos fueron colocados acordes al apartado de “Selección de lugares para implementación” expuesta en los anexos, considerando potencia de señal, zonas de Fresnel y distancia hasta el enlace. Cabe destacar el factor de influencia denominado “permisos de colocación”, al ser lugares privados (pertenece a una persona o entidad privada), se realiza su previa entrevista y exposición de las implicaciones que conlleva colocar un nodo en el lugar, las cuales son:

1. Espacio en la pared a una altura superior a 3m sobre el suelo, adicional la perforación de dicha pared para la colocación de tornillos de soporte para el nodo.
2. Una acometida de corriente desde el interior de la casa o edificio hasta el nodo.
3. Un periodo de 30 días de prueba en todo lugar. Este periodo el nodo estará operativo recolectando y enviando datos, 24 horas al día y 7 días a la semana.
4. Se le hará una retribución económica de 10 dólares americanos a los dueños de estos lugares, cubriendo un arrendamiento mensual tanto de espacio como de luz eléctrica.

Debido a la limitación de prototipos (Nodos), luego de haber cumplido un periodo de prueba cualquiera de los lugares ya estudiados se procederá a desmontarlo de la ubicación actual y posicionarlo en una nueva locación. A continuación, se muestran lugares de recolección de datos para los nodos 1 y 2.

6.4.1 NODO 1

La primera etapa de prueba del nodo 1 fue realizada en el sector Mayorista, con dirección Av. Gran Colombia y calle Guaranda y lugar de implementación hostel Vallto.

Figura 56.
Nodo 1 – primera implementación



Nota. Figura propietaria del autor.

La segunda etapa de prueba del nodo 1 fue realizada en el sector Cabo Minacho, con dirección entre calles Eduardo Kigman y Gonzanama, el lugar de implementación se lo realiza en el restaurante La Toquilla “con la Sazón Manabita”.

Figura 57.
Nodo 1 – segunda implementación



Nota. Figura propietaria del autor.

6.4.2 NODO 2

La primera etapa de prueba del nodo 2 fue realizada en el sector Puerta de la ciudad de Loja, con dirección entre Av. Antonio José, 18 de noviembre y calle Pasaje Rodríguez y lugar de implementación casa particular.

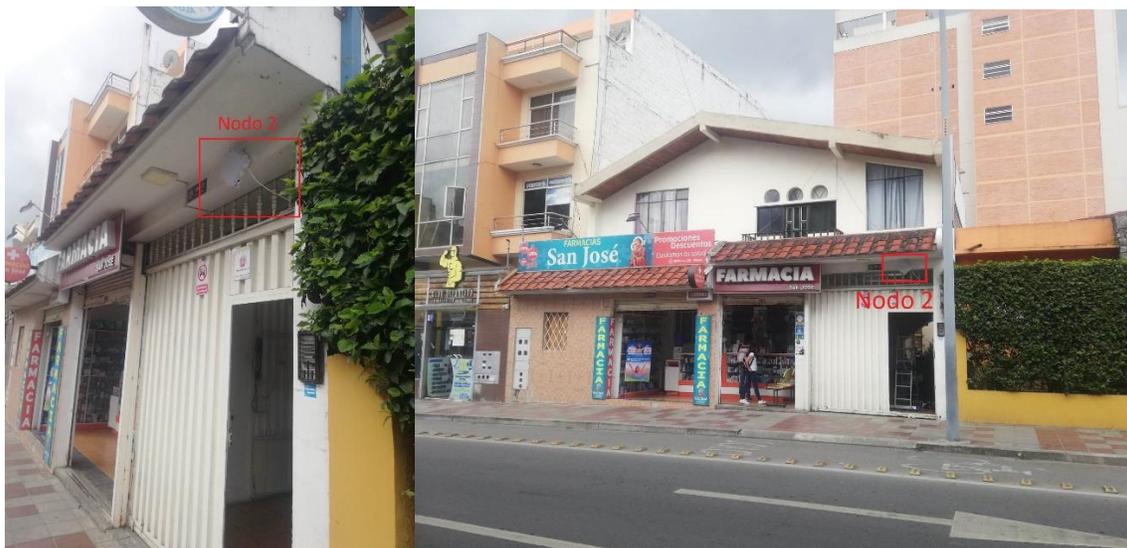
Figura 58.
Nodo 2 – primera implementación



Nota. Figura propietaria del autor.

La segunda etapa de prueba del nodo 2 fue realizada en el sector San Sebastián (Farmacia San José Lourdes), con dirección entre calles Juan José Peña y Lourdes, el lugar de implementación es una casa particular.

Figura 59.
Nodo 2 – segunda implementación



Nota. Figura propietaria del autor.

6.5 Desempeño de la red

Debido a los distintos factores que se establecen en el ambiente, como lo son las obstrucciones de los edificios en el enlace de radio, se llegan a perder paquetes disminuyendo la eficiencia de cualquier comunicación, es por ello que mediante los datos estadísticos tomados en los periodos de la implementación se toma una muestra y se filtran datos de horas pico.

- Mañana: desde las 7h00 a 9h00, son horarios de circulación peatonal y tráfico vehicular en donde las personas deben realizar actividades laborales, es el inicio de la jornada.
- Medio día: desde las 11h00 hasta la 13h00, se observa un patrón significativo de movilidad urbana, con un flujo notable de estudiantes y trabajadores desplazándose hacia sus residencias para el almuerzo, lo que resalta la importancia de considerar estos desplazamientos.

- Tarde: desde las 17h00 hasta las 19h00, existe un desplazamiento de personas y vehículos rumbo a sus residencias, provocando un aumento significativo de movilidad a considerar.

Se consideran periodos de 2 horas debido a la forma de obtención de datos que tienen los nodos finales, que es la de tomar 10 minutos de muestras y descansar 20 minutos, dando en general 2 ciclos de trabajo en 1 hora con un total de 60 paquetes por hora. En cuyo caso la hora de obtención de datos no empieza de forma sincronizada, es por ello que se toma muestras de 2 horas para el análisis de contaminación en horas pico.

Con la ayuda del software de Microsoft Excel, se realizan filtros para el análisis de paquetes perdidos y valores contaminantes en horas pico de la red, obteniendo resultados de:

Figura 60.

Niveles de eficiencia muestras de 5 días datos estimados contra datos obtenidos

fecha	equipo	Pqt. teoricos	Prom. Pqt. Enviados	Taza de exito %
28/05/2023	nodo 1 mes 1	1440	1305	90,63
30/05/2023	nodo 1 mes 1	1440	1282	89,03
02/06/2023	nodo 1 mes 1	1440	1249	86,74
08/06/2023	nodo 1 mes 1	1440	1315	91,32
28/06/2023	nodo 1 mes 1	1440	1119	77,71
02/07/2023	nodo 1 mes 2	1440	1346	93,47
08/07/2023	nodo 1 mes 2	1440	1191	82,71
14/07/2023	nodo 1 mes 2	1440	1172	81,39
24/07/2023	nodo 1 mes 2	1440	1315	91,32
25/07/2023	nodo 1 mes 2	1440	1340	93,06
fecha	equipo	Pqt. teoricos	Prom. Pqt. Enviados	Taza de exito %
28/05/2023	nodo 2 mes 1	1440	1239	86,04
31/05/2023	nodo 2 mes 1	1440	1242	86,25
03/06/2023	nodo 2 mes 1	1440	1243	86,32
20/06/2023	nodo 2 mes 1	1440	1251	86,88
22/06/2023	nodo 2 mes 1	1440	1250	86,81
06/07/2023	nodo 2 mes 2	1440	1321	91,74
08/07/2023	nodo 2 mes 2	1440	1258	87,36
10/07/2023	nodo 2 mes 2	1440	1252	86,94
15/07/2023	nodo 2 mes 2	1440	1178	81,81
29/07/2023	nodo 2 mes 2	1440	1202	83,47

Nota. Figura propietaria del autor. La tasa promedio de éxito de envío de paquetes ronda entre el 80 y 90%, en las muestras de días tomadas en los cuatro sectores. Se tiene una pérdida

significativa de datos, debido a varios factores, como son los obstáculos, interferencias radio eléctricas y las limitaciones en recepción.

Figura 61.
Datos contaminantes en horas pico de los cuatro sectores - Mañana

n1 -m1 - Mayorista		28/05/2023		n1 -m2 - Cabo Minaci		01/07/2023	
Hora	>7:00 - <9:00			Hora	>7:00 - <9:00		
Datos	101			Datos	96		
Contaminante	Promedio			Contaminante	Promedio		
	dB		52,85		dB		53,74
	CO		9,80		CO		11,33
	SO2		13,83		SO2		18,52
	O3		0,73		O3		0,72
	NO2		4,40		NO2		4,38
	PM		0,28		PM		2,84
n2 -m1 - Puerta de la C		28/05/2023		n2 -m2 - San Sebastia		06/07/2023	
Hora	>7:00 - <9:00			Hora	>7:00 - <9:00		
Datos	104			Datos	118		
Contaminante	Promedio			Contaminante	Promedio		
	dB		35,41		dB		54,77
	CO		2,99		CO		10,10
	SO2		1,29		SO2		14,65
	O3		0,15		O3		0,67
	NO2		1,97		NO2		4,23
	PM		0,00		PM		0,03

Datos contaminantes en horas pico de los cuatro sectores – Medio día

n1 -m1 - Mayorista		28/05/2023		n1 -m2 - Cabo Minaci		01/07/2023	
Hora	>11:00 - <13:00			Hora	>11:00 - <13:00		
Datos	103			Datos	86		
Contaminante	Promedio			Contaminante	Promedio		
	dB		54,65		dB		58,35
	CO		9,69		CO		9,89
	SO2		13,71		SO2		14,01
	O3		0,68		O3		0,88
	NO2		4,23		NO2		4,85
	PM		0,13		PM		1,50
n2 -m1 - Puerta de la C		28/05/2023		n2 -m2 - San Sebastia		06/07/2023	
Hora	>11:00 - <13:00			Hora	>11:00 - <13:00		
Datos	104			Datos	94		
Contaminante	Promedio			Contaminante	Promedio		
	dB		37,12		dB		55,58
	CO		3,30		CO		9,38
	SO2		1,53		SO2		12,60
	O3		0,14		O3		0,68
	NO2		1,94		NO2		4,25
	PM		0,00		PM		0,08

Datos contaminantes en horas pico de los cuatro sectores - Tarde

n1 -m1 - Mayorista		28/05/2023		n1 -m2 - Cabo Minaci		01/07/2023	
Hora	>17:00 - <19:00			Hora	>17:00 - <19:00		
Datos	109			Datos	109		
Contaminante	Promedio			Contaminante	Promedio		
	dB	52,89			dB	54,82	
	CO	9,05			CO	10,23	
	SO2	11,74			SO2	15,03	
	O3	0,73			O3	0,81	
	NO2	4,40			NO2	4,64	
	PM	0,01			PM	2,61	
n2 -m1 - Puerta de la c		28/05/2023		n2 -m2 - San Sebastia		06/07/2023	
Hora	>17:00 - <19:00			Hora	>17:00 - <19:00		
Datos	103			Datos	102		
Contaminante	Promedio			Contaminante	Promedio		
	dB	37,13			dB	57,71	
	CO	2,78			CO	10,19	
	SO2	1,10			SO2	14,95	
	O3	0,15			O3	0,67	
	NO2	1,98			NO2	4,24	
	PM	0,00			PM	0,05	

Nota. Figura propietaria del autor.

En cada uno de los periodos tomados la cantidad de paquetes tomados ronda los 100, en lugar de los 120, esto debido a dos factores, el primero a la perdida de paquetes durante la transmisión y segundo debido a que la transmisión no empieza en las zonas horarias establecidas, pude comenzar antes o después de las horas pico tomadas. Al manejar datos medioambientales, es importante considerar que generalmente habrá un margen moderado de pérdida de paquetes debido a las condiciones variables presentes tanto en la implementación como durante el proceso de recopilación de datos.

Si se considera como una pérdida modera un margen del 5%, se estima un total de 3 paquetes perdidos por cada proceso de envío que son en total 60 paquetes en el lapso de 1 hora, estableciendo este valor se estimaría un total de 57 paquetes procesados de forma exitosa durante todo el ciclo de envío.

Para analizar la contaminación en horarios con mayor movilidad vehicular y peatonal, se procesan datos en periodos de 2 horas. Durante estos periodos, el prototipo (nodo final) puede estar en dos situaciones: aún no ha comenzado su ciclo de envío de paquetes o ya lo ha iniciado. Esto resulta en la recolección de datos que varía entre 86 y 118 paquetes por

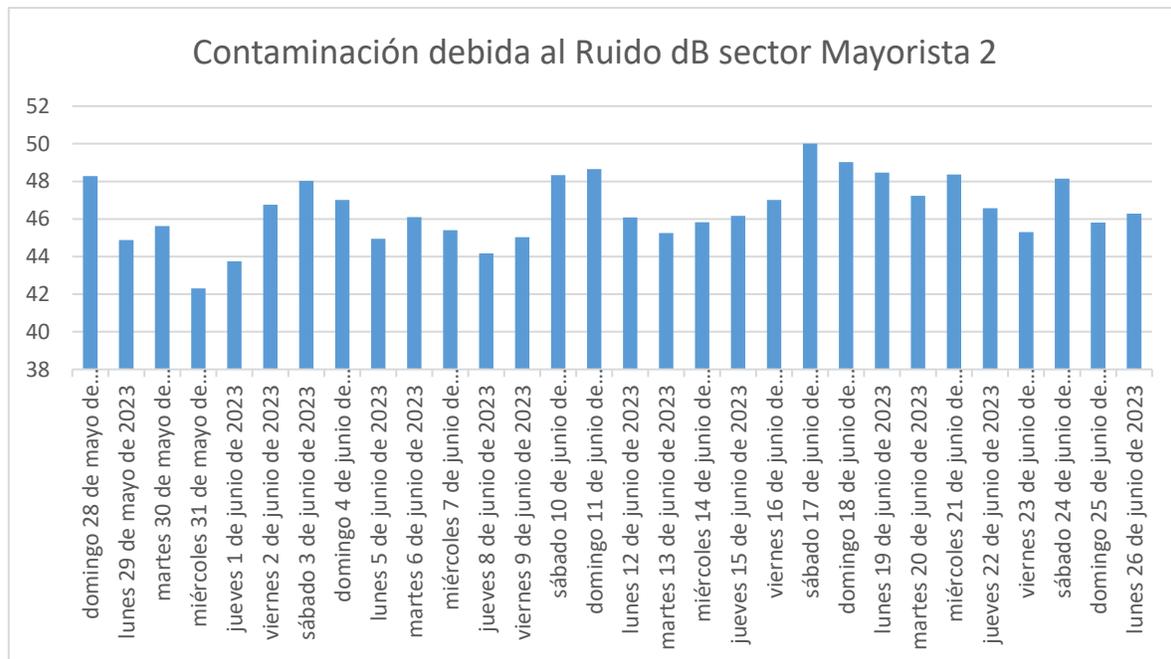
sector. Teóricamente, deberían capturarse 120 paquetes en dos ciclos, pero con un margen de error del 5%, se esperaría 114 paquetes. Esta variación permite analizar el promedio de contaminación durante periodos específicos, proporcionando valores cuantitativos de contaminación en esos horarios.

6.6 Datos contaminantes

Los mismo reflejan los resultados obtenidos de cada periodo de muestreo en los lugares escogidos para la implementación.

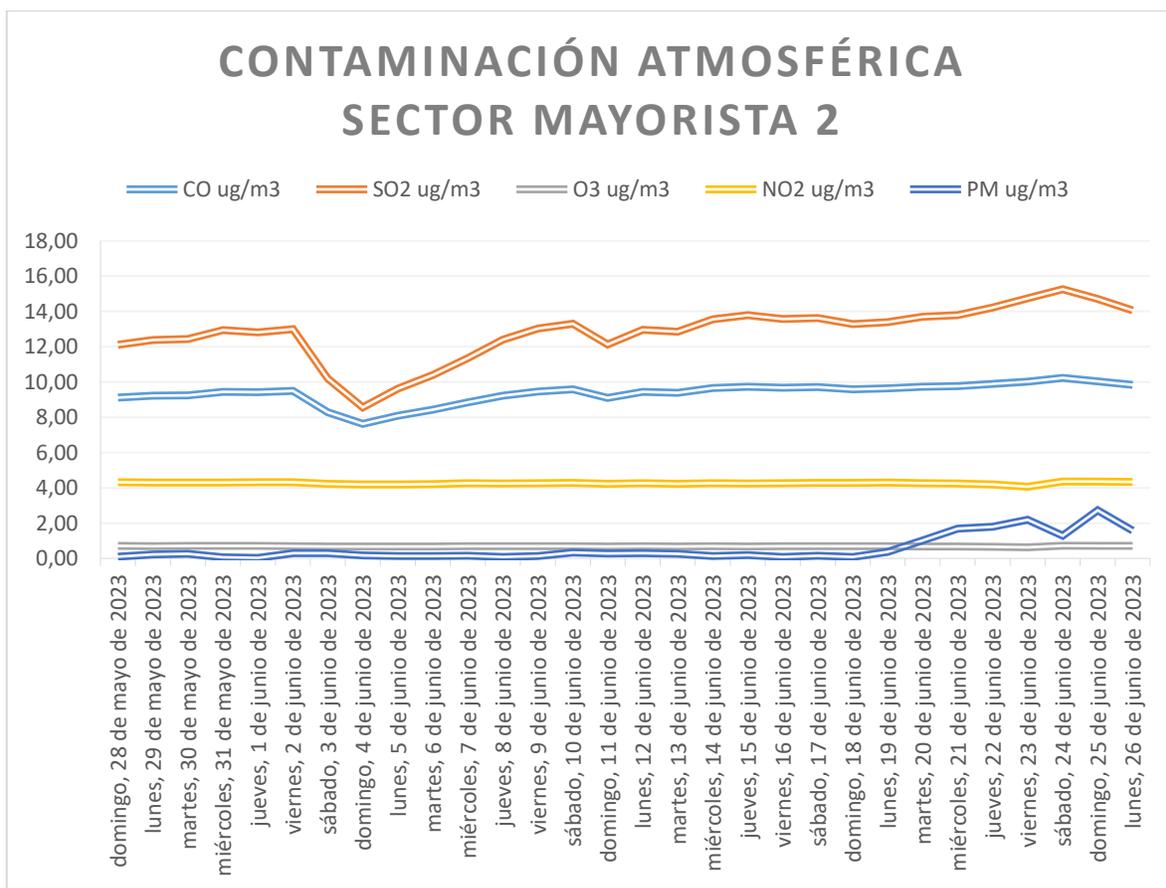
Tras la implementación de los nodos durante un periodo de 30 días transcurridos desde su puesta sobre el lugar, se llegan a considerar estos datos obtenidos como datos contaminantes debido a: CO, SO₂, NO₂, O₃, PM_{2.5} y ruido. Para lo cual se resume todos estos datos mediante figuras ilustrativas las cuales toman todos los datos capturados en un día y calculando el promedio de contaminación del mismo día, todo esto hasta culminar con el plazo máximo previsto para obtener información pertinente del lugar.

Figura 62.
Contaminación ruido Nodo 1 (mayorista 2) – mes 1



Nota. Figura propietaria del autor. Durante la etapa de muestreo los datos obtenidos en un lugar concurrente (Mayorista ciudad de Loja) donde las personas son la principal fuente de contaminación, se muestran datos de promedios entre 42,30 dB y 50,01 dB, la contaminación debida al ruido sobre este sector se clasifica como ruido bajo y ambiente ruidoso. Cabe recalcar que la exposición prolongada al ruido por encima de los 50 dB puede provocar alteraciones en el comportamiento humano (estrés). Del mismo modo se logra evidenciar el comportamiento del ruido el cual llega a ser mayor en días como: viernes, sábados y domingos, dando picos elevados durante esos tres días en particular, llegando a deducir que por estas fechas la concurrencia de las personas sobre el sector es mayor.

Figura 63.
Contaminación atmosférica Nodo 1 (Mayorista 2) – mes 1



Nota. Figura propietaria del autor.

La contaminación debida al Monóxido de Carbono (CO) sobre el sector el Mayorista ronda por los 7.63 ug/m³ a 10.23 ug/m³, lo cual especifica un aumento en comparación a las directrices que proporciona la OMS sobre este contaminante en un periodo de 24 horas, el cual debe ser menor a 4 ug/m³ para estar fuera de los efectos que causa este contaminante sobre el organismo, entre ellos se tiene: náuseas, vómitos, dolor de cabeza, desmayos, pérdida de visión, etc. Los valores obtenidos del contaminante CO llegan a ser peligrosos para los residentes permanentes del lugar, los cuales tendrían una exposición continua del mismo llegando a provocar afecciones sobre la salud.

La contaminación debida al Dióxido de Azufre (SO₂), mantiene un valor por debajo de lo que especifica las directrices de la OMS, la cual señala que para un periodo de 24 horas este contaminante en promedio debe ser menor a los 40 ug/m³, dando como resultado del muestreo valores entre 8.56 ug/m³ y los 15.26 ug/m³. Los resultados reflejan la poca industrialización existente sobre el lugar, debido a que el contaminante es producido por el humo de fábricas, volcanes y automotores, en el último se puede especificar como productos petrolíferos que tras su combustión se genera dicho contaminante. Llega a producir problemas respiratorios, paros cardiacos, entre otras afecciones. Y sobre el ambiente llega a producir lluvias acidas cuando este se combina con demás compuestos en la atmosfera.

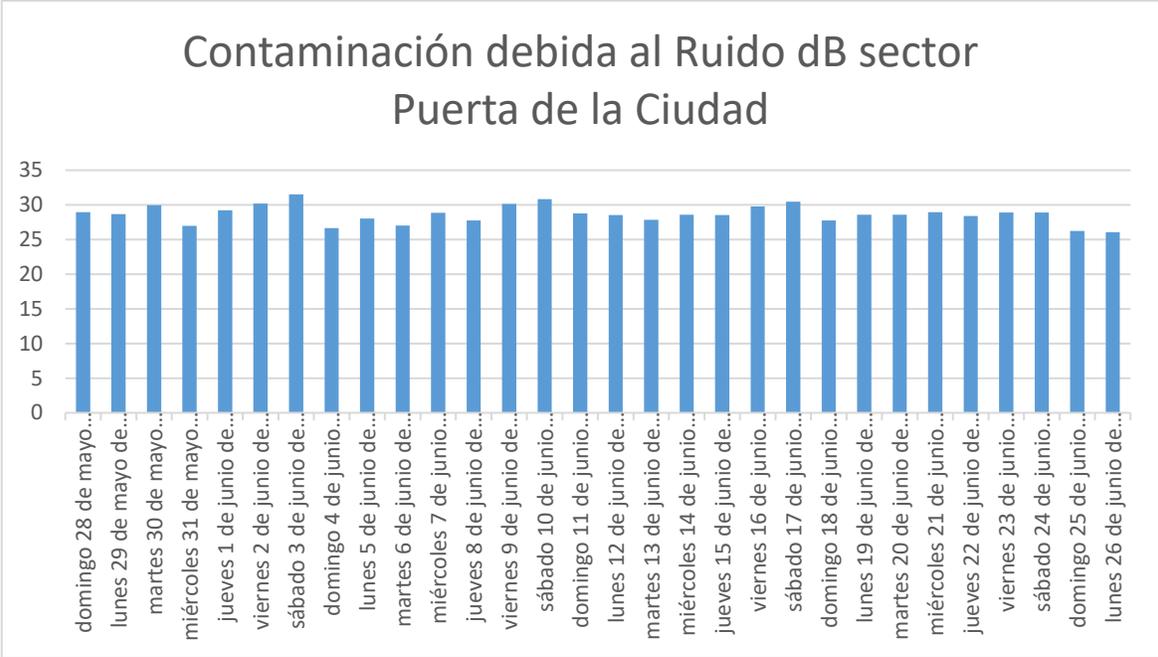
La contaminación debida al Ozono (O₃), se mantiene sobre los 0.63 ug/m³ y 0.72 ug/m³, llegando a no tener prácticamente niveles que signifiquen un riesgo para la salud de las personas, el mismo para un periodo de 8 horas tiene que ser inferior a los 100 ug/m³ según directrices de la OMS. El ozono es conocido por oxidar tanto material vivo como inerte, por eso la existencia del mismo es vital en la atmosfera para evitar que los rayos UV pasen a la tierra llegando a provocar daños en la piel y por lo tanto en la salud de las personas, del mismo modo la existencia del mismo perjudica a los organismos vivientes que se exponen a esta, comprometiendo el sistema respiratorio a corto y largo plazo.

Para los datos contaminantes debidos al Dióxido de Nitrógeno (NO₂) su rango opera entre los 4.06 ug/m³ y 4.36 ug/m³ indicando que está por debajo de los 25 ug/m³ como marca las directrices de la OMS en un periodo de 24 horas. Esto no tendría afecciones graves

e inmediatas para la salud humana, adicional, el sector donde se obtiene estos valores de contaminación cuenta con pocas fuentes de generación de dicho contaminante, encontrándose con frecuencia en zonas industriales, calles con mucho tráfico, entre otros debidos a la quema de combustibles fósiles.

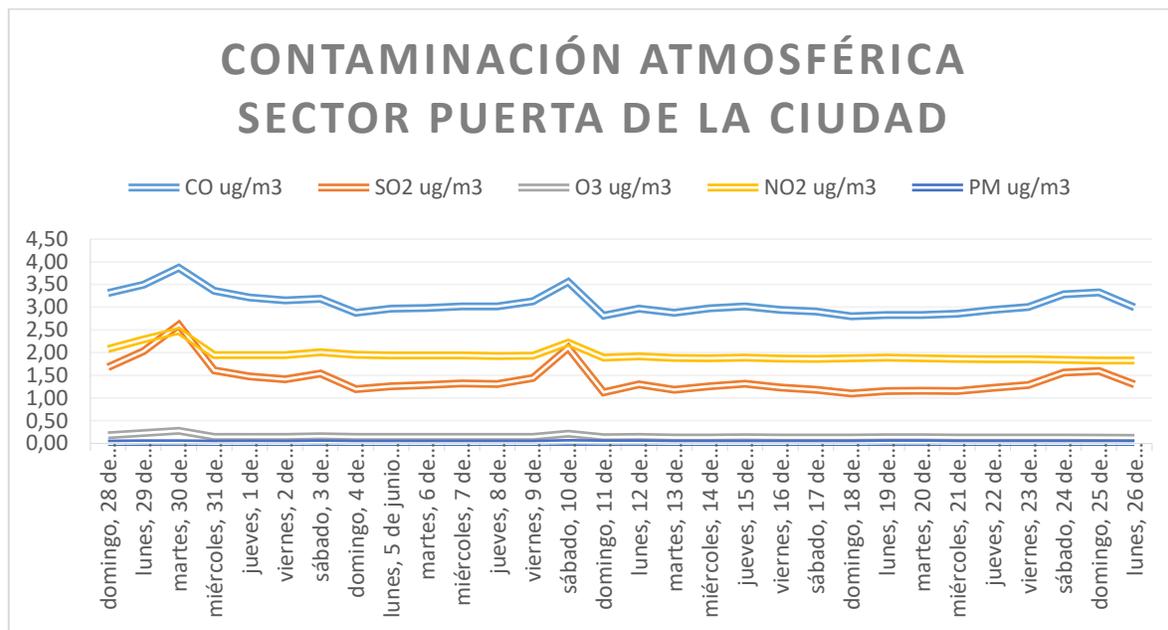
Y por último la contaminación debida al Material Particulado 2.5 micras (PM2.5) considera valores desde los 0.03 ug/m3 hasta los 2.72 ug/m3 lo cual son valores por debajo del rango especificado de la OMS el cual debe ser menor a 15 ug/m3 para el PM2.5 en un periodo de 24 horas.

Figura 64.
Contaminación ruido Nodo 2 (Puerta de la ciudad) – mes 1



Nota. Figura propietaria del autor. Los datos relacionados con el sector rondan desde los 26.07 dB hasta los 31.52 dB promedio durante un periodo de 24 horas clasificando al ruido como Ruido muy bajo y ruido bajo, esto implica que el nivel de concurrencia tanto de las personas como el de los vehículos automotores es bajo, por lo cual no existe riesgo que perjudique la salud de las personas a su alrededor.

Figura 65.
Contaminación atmosférica Nodo 2 (Puerta de la ciudad) – mes 1



Nota. Figura propietaria del autor.

Empezando con el contaminante Monóxido de Carbono (CO) el cual se obtendrían valores contaminantes que rondan los valores de 2.81 ug/m3 hasta los 3.87 ug/m3, que según directrices de la OMS estaría por debajo de los 4 ug/m3 en un periodo de 24 horas, indicando que el sector no es un riesgo para la salud de las personas que habitan sobre el mismo o llegan a circular el mismo.

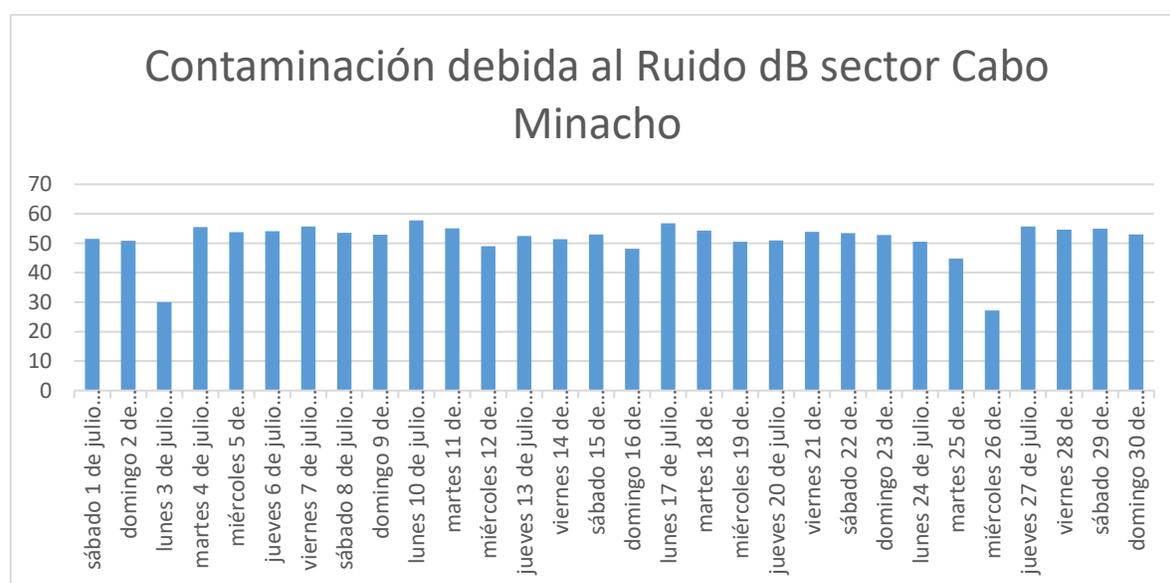
Para el contaminante Dióxido de Azufre (SO2) el cual sus valores de contaminación rondan los valores de 1.13 ug/m3 hasta los 2.61 ug/m3, el mismo estaría por debajo de lo que señala la OMS en sus directrices la cual debe ser menor a los 40 ug/m3. Esto indicaría la poca existencia de riesgo hacia las personas sobre su salud y la calidad de vida que se llega considerar como buena sobre el sector.

Ahora considerando la contaminación debida al Ozono (O3), la cual sus valores contaminantes rondarían los 0.13 ug/m3 hasta los 0.28 ug/m3, valores sumamente bajos en comparación a los 100 ug/m3 considerados por la OMS como un promedio durante un periodo de 8 horas.

La contaminación debida al Dióxido de Nitrógeno (NO₂), es de 1.83 ug/m³ hasta los 2.48 ug/m³ el cual no se encontraría por encima de lo que dicta las directrices de la OMS de 25 ug/m³ en un periodo de 24 horas.

Y por último la contaminación debida al Material Particulado 2.5 micras (PM_{2.5}), estarían por los valores de 0.00 y 0.01 ug/m³, la existencia de partículas en el aire es muy baja, la OMS indica mediante sus directrices que la misma debe ser menor a 15 ug/m³ en un periodo de 24 horas para no tener afecciones sobre la salud.

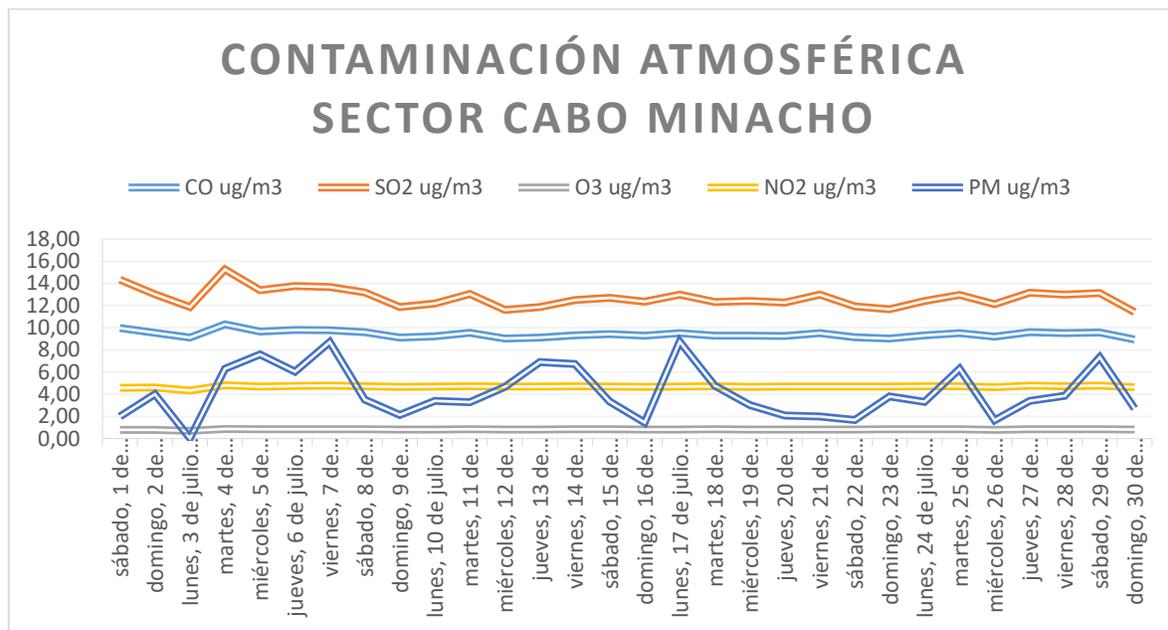
Figura 66.
Contaminación ruido Nodo 1 (Cabo Minacho) – mes 2



Nota. Figura propietaria del autor.

Durante la etapa de muestreo los datos obtenidos en el sector Cabo Minacho donde los vehículos automotores son la principal fuente de contaminación, se muestran datos de promedios entre 27.19 dB y 57.80 dB, la contaminación debida al ruido sobre este sector se clasifica entre ruido muy bajo y ambiente ruidoso. El sector mantiene un promedio que esta por arriba de los 50dB en donde dos días de todo el mes considera valores de ruido por debajo de los 30dB

Figura 67.
Contaminación atmosférica Nodo 1 (Cabo Minacho) – mes 2



Nota. Figura propietaria del autor.

La contaminación debida al Monóxido de Carbono (CO) sobre el sector Cabo Minacho ronda por los 8.94 ug/m3 a 10.30 ug/m3, lo cual se encuentra por encima de lo que señala las directrices de la OMS sobre este contaminante en un periodo de 24 horas, en donde señala debe ser menor a 4 ug/m3 para no disminuir la calidad de vida de las personas.

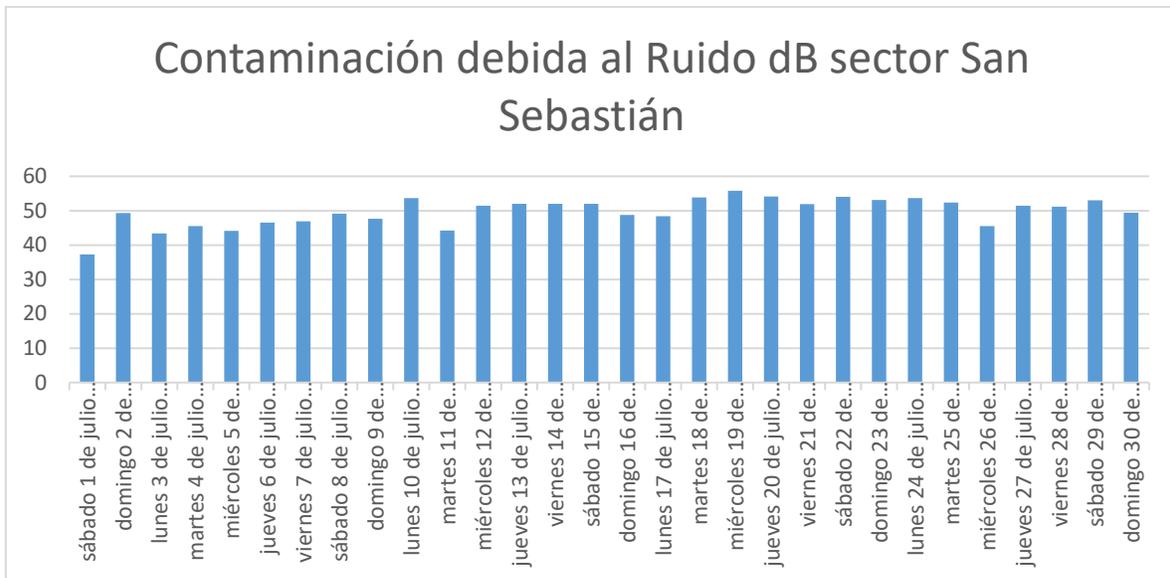
La contaminación debida al Dióxido de Azufre (SO2), da como resultado valores entre 11.41 ug/m3 y los 15.26 ug/m3. Esto mantiene un valor por debajo de lo que especifica las directrices de la OMS, la cual señala que para un periodo de 24 horas este contaminante en promedio debe ser menor a los 40 ug/m3.

La contaminación debida al Ozono (O3), se mantiene sobre los 0.7 ug/m3 y 0.87 ug/m3, llegando a no tener prácticamente niveles que signifiquen un riesgo para la salud de las personas, el mismo para un periodo de 8 horas tiene que ser inferior a los 100 ug/m3 según directrices de la OMS.

Para los datos contaminantes debidos al Dióxido de Nitrógeno (NO₂) su rango opera entre los 4.33 ug/m³ y 4.81 ug/m³ indicando que está por debajo de los 25 ug/m³ como marca las directrices de la OMS en un periodo de 24 horas.

Y por último la contaminación debida al Material Particulado 2.5 micras (PM_{2.5}) considera valores desde los 0.03 ug/m³ hasta los 8.70 ug/m³ lo cual son valores por debajo del rango especificado de la OMS el cual debe ser menor a 15 ug/m³ para el PM_{2.5} en un periodo de 24 horas.

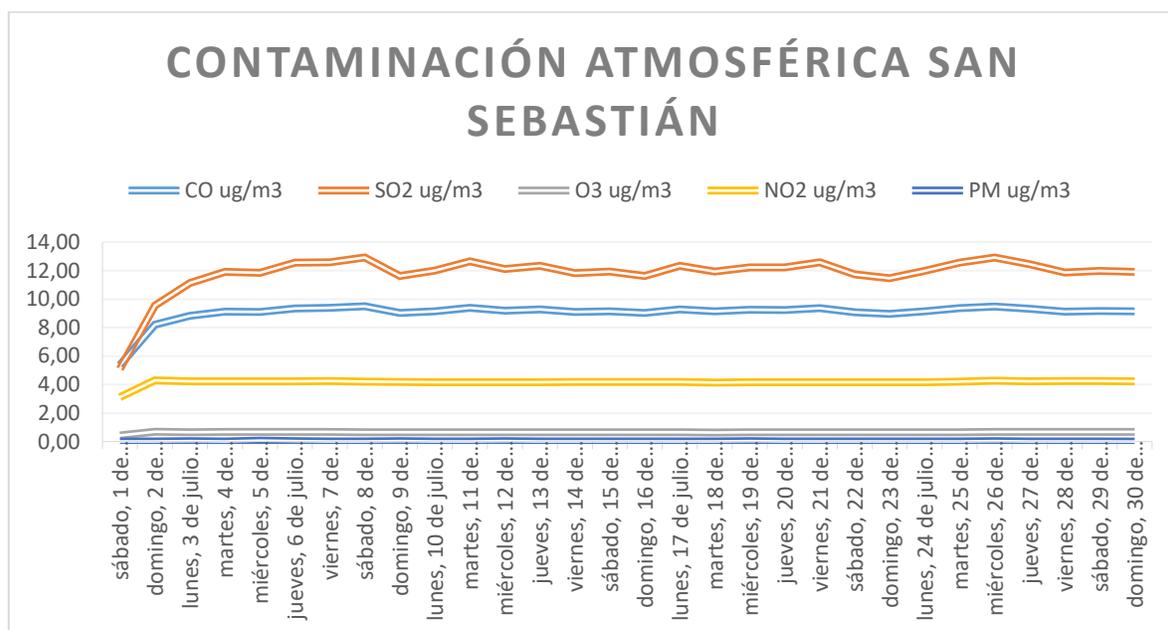
Figura 68.
Contaminación ruido Nodo 2 (San Sebastián) – mes 2



Nota. Figura propietaria del autor.

Los datos relacionados con el sector rondan desde los 37.29 dB hasta los 55.76 dB promedio durante un periodo de 24 horas clasificando al ruido como Ruido bajo y ambiente ruidoso, dando como promedio valores por encima de 45 dB esto implica que el nivel de circulación tanto de las personas como el de los vehículos automotores es moderado, teniendo en cuenta que durante el muestreo existen picos que sobrepasan los 60 dB en ciertos periodos de tiempo, debido a que las calles mantienen recorridos del transporte urbano.

Figura 69.
Contaminación atmosférica Nodo 2 (San Sebastián) – mes 2



Nota. Figura propietaria del autor.

El Monóxido de Carbono (CO) el cual señala valores contaminantes que rondan los 5.36 ug/m3 hasta los 9.50 ug/m3, que según directrices de la OMS estaría por encima de los 4 ug/m3 en un periodo de 24 horas, indicando que el sector presenta un riesgo para la salud de las personas que habitan sobre el mismo o llegan a circular el sector.

Para el contaminante Dióxido de Azufre (SO2) el cual sus valores de contaminación rondan los valores de 5.10 ug/m3 hasta los 12.92 ug/m3, el mismo estaría por debajo de lo que señala la OMS en sus directrices la cual debe ser menor a los 40 ug/m3.

La contaminación debida al Ozono (O3) registra valores contaminantes desde los 0.43 ug/m3 hasta los 0.69 ug/m3, valores sumamente bajos en comparación a los 100 ug/m3 considerados por la OMS como un promedio durante un periodo de 8 horas.

La contaminación debida al Dióxido de Nitrógeno (NO2), es de 3.12 ug/m3 hasta los 4.30 ug/m3 el cual no se encontraría por encima de lo que dicta las directrices de la OMS de 25 ug/m3 en un periodo de 24 horas.

Y por último la contaminación debida al Material Particulado 2.5 micras (PM2.5), estarían por los valores de 0.00 y 0.07 ug/m3, la existencia de partículas en el aire es muy baja, la OMS indica mediante sus directrices que la misma debe ser menor a 15 ug/m3 en un periodo de 24 horas para no tener afecciones sobre la salud.

Tabla 26.
Resumen de contaminación sobre sectores valores máximos y mínimos

Sector	Ruido (dB)		CO (ug/m3)		SO2 (ug/m3)		O3 (ug/m3)		NO2 (ug/m3)		MP2.5 (ug/m3)	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Mayorista 2	42.30	50.01	7.63	10.23	8.56	15.26	0.63	0.72	4.06	4.36	0.03	2.72
Puerta de la ciudad	26.07	31.52	2.81	3.87	1.13	2.61	0.13	0.28	1.83	2.48	0.00	0.01
Cabo Minacho	27.19	57.80	8.94	10.30	11.41	15.26	0.7	0.87	4.33	4.81	0.03	8.70
San Sebastián	37.29	55.76	5.36	9.50	5.10	12.92	0.43	0.69	3.12	4.30	0.00	0.07

Nota. Tabla propietaria del autor.

7 Discusión

La economía puesta en el proceso de construcción de los nodos es un impedimento para el debido proceso de implementación, el diseño de los nodos se basa su funcionamiento mediante energías renovables como lo son el uso de paneles solares. En el sistema se llega a consumir alrededor de 500mAh y los paneles necesarios para su debida alimentación se calculan alrededor de los 20W (5V a 4A) para evitar cualquier inconveniente, esto debido al clima (nublado, lluvioso, soleado, etc.) y al lugar (con o sin obstrucciones con vista hacia el sol).

La disponibilidad es crucial a la hora de implementar un nodo o colocar el Gateway (el cual se tendrá una salida hacia internet), con respecto al nodo se debe tener los permisos necesarios para colocar en los postes de la EERSSA (Empresa Eléctrica Regional del Sur S.A.) o en su defecto en casas particulares. Para el último caso se agenta citas anticipadas a la implementación, esto con el fin de acordar términos de uso tanto de la energía eléctrica como del espacio en la pared, se evita emitir el permiso para el uso de los postes de la EERSSA debido a que el nodo no cuenta con alimentación por paneles solares y al periodo de aceptación de dicho permiso limita la finalización del estudio en el plazo previsto. A la hora de colocar el Gateway se debe tener en cuenta un punto estratégico elevado que llegue a cubrir las zonas críticas de estudio, que cuente con acceso a la energía eléctrica y una salida hacia internet.

El diseño del prototipo debe tener en consideración factores como: alimentación, zona de sensores y ser impermeable al agua y humedad, esto debido a que los componentes deben trabajar en condiciones de ambientales adversas (Zonas donde existe calor, frio y humedad).

Después de recopilar información sobre polución en diferentes áreas, se encuentran resultados que varían según el tráfico vehicular y peatonal, así como en áreas extensas de la ciudad (espacios abiertos, parques, zonas residenciales poco frecuentadas). De acuerdo con la teoría, gran parte de la contaminación está concentrada en áreas con alto tráfico vehicular, movimiento peatonal y sectores industriales. Cada uno de estos sectores quema combustibles fósiles, consume oxígeno y combina diversos gases para formar nuevos compuestos. Dado

que la ciudad aún se encuentra en desarrollo, la presencia de contaminación atmosférica es relativamente baja en comparación con ciudades altamente contaminadas con mayor actividad humana. Tal como lo señala la OMS, estos materiales contaminantes no solo afectan negativamente la salud y acortan la esperanza de vida, sino que también generan un impacto directo en el entorno.

La presencia de contaminación debida al monóxido de carbono (CO) en las áreas analizadas excede los límites establecidos por las directrices de la OMS, que fija un valor de referencia de 4 ug/m³. En el transcurso del día, el promedio se mantiene en alrededor de 10.30 ug/m³, con un pico máximo durante las 24 horas de actividad humana. Esto indica una contaminación constante, con aumentos por encima de estos niveles durante las horas diurnas, que coinciden con el período de mayor tráfico vehicular y peatonal. En caso de que los valores superen los 35 ug/m³ durante una hora o 100 ug/m³ durante 15 minutos, se podrían manifestar problemas respiratorios directos en individuos expuestos, lo que podría ocasionar complicaciones en la respiración y, en casos más graves, afectar al sistema cardiovascular.

A medida que se recopilan valores en relación al SO₂, se puede inferir que el impacto del contaminante no es significativo, ya que su nivel promedio máximo es de 15.26 ug/m³ durante un período de 24 horas. Este valor se sitúa por debajo del umbral de 40 ug/m³ establecido en las directrices, lo que demuestra que la presencia del contaminante, que principalmente proviene de la combustión de vehículos, es baja en gran medida o lo que significa que no se corre peligro inmediato con el mismo. Es importante señalar que esta medición es un promedio a lo largo de extensos intervalos de tiempo, aunque existen ocasiones en las que los niveles pueden elevarse por encima de los 18 ug/m³. Esto suele ser consecuencia de la quema espontánea de una gran cantidad de vehículos en lapsos breves, lo cual puede observarse durante los horarios de operación de los autobuses urbanos o durante los momentos de mayor tráfico en las horas de entrada y salida laboral.

La concentración de NO₂ en la ciudad es mínima, dado que su pico máximo durante una jornada completa alcanza únicamente 4.81 ug/m³. Este valor es notablemente inferior a

los límites promedio establecidos para este contaminante a lo largo de 24 horas, que indican niveles por debajo de 25 ug/m³. Esto sugiere que las fuentes que contribuyen a su formación son limitadas, ya que este gas se origina principalmente por la combustión en vehículos y procesos industriales a temperaturas extremadamente elevadas. Esto implica que la generación del contaminante se atribuye principalmente al tráfico vehicular.

La producción de O₃ se resulta principalmente de la combinación de NO_x y compuestos orgánicos volátiles, estos últimos conformados por carbono e hidrógeno. Estos compuestos se encuentran en emisiones vehiculares, combustibles de cocina, calefacción, entre otros. La baja presencia de NO₂ sugiere que, al mezclarse con las emisiones de tráfico, alcanza valores máximos de 0.87 ug/m³, inferior al límite de la OMS de 60 ug/m³. Esto indica que la contaminación por ozono tiene escaso impacto en la salud pública debido a la limitada cantidad de NO₂. En resumen, las fuentes principales de NO₂ son las fábricas que trabajan sobre altas temperaturas y que, al combinarse con los compuestos orgánicos volátiles, forman O₃.

El impacto ocasionado por el PM_{2.5} en los sectores analizados se sitúa en un máximo promedio de 8.70 durante un período de 24 horas. Considerando que esta partícula es más común en ciudades en forma de polvo, vapor y humo, se sugiere que el entorno no favorece la acumulación de contaminación. En consecuencia, la población no enfrenta riesgos inmediatos para su salud respiratoria, ya que los resultados son inferiores al límite de 15 ug/m³. Esta presencia que se registra de PM_{2.5} se vincula con una mala combustión vehicular (exceso de humo en tubos de escape), lo que origina partículas con diámetros mayores a 2.5 micrómetros, y con la quema de combustibles por parte de las personas, como el tabaco y la preparación de alimentos en restaurantes y puestos ambulantes.

La relación observada con el ruido en áreas densamente pobladas, donde se registra un nivel promedio de 50 dB durante un día completo. La mayor parte de este ruido se sitúa entre 55 dB y un máximo de 65 dB, específicamente entre las 07:00 y las 20:00, coincidiendo con las horas de mayor actividad humana y, por consiguiente, la generación de un mayor nivel de ruido. Después de este intervalo, el ruido gradualmente disminuye a un promedio de

30 dB durante la noche. Esta situación conlleva a la presencia constante de ruido en el ambiente, lo cual puede causar contaminación y resultar en posibles daños al sistema nervioso humano, así como en la inducción de estrés durante períodos prolongados.

En relación a los enlaces de radio establecidos para cada sector medido, se consideran pérdidas significativas en la transmisión de paquetes, primero se realiza una simulación empleando el software de XIRIO para tener en cuenta el nivel de calidad en la señal que se tendría una vez implementada la red. Dando un valor de error entre la simulación y la medición 23,53% en el sector Mayorista a un de SF7 y 2,15% en el sector Cabo Minacho a un SF9. Estos valores reflejan que tan parecido se encuentra el enlace entre simulación y medición. También se realiza el análisis de paquetes perdidos que serían del 20% en el peor de los casos y del 10% en el mejor de los casos para un periodo de 24 horas, teniendo una pérdida significativa de paquetes, lo cual se podría considerar que existen parámetros de interferencia que provocan la mala comunicación entre nodo y Gateway.

8 Conclusiones

- Tanto los contaminantes atmosféricos como acústicos pueden encontrarse en la naturaleza y ser generados artificialmente. En la actualidad, la intervención humana ha causado un aumento significativo de estos contaminantes debido a la quema de combustibles fósiles, el uso de productos químicos, la mala gestión de desechos, el tráfico vehicular excesivo y la concentración en zonas urbanas, entre otras actividades. Estas acciones contribuyen a la disminución de la esperanza de vida y pueden afectar el sistema nervioso de las personas. La Organización Mundial de la Salud ha reconocido la presencia de estos contaminantes y ha establecido directrices para la contaminación causada por gases en diferentes períodos de tiempo. En el caso específico del ruido, su impacto en la salud depende de la duración y nivel de exposición. Se clasifica desde niveles muy bajos (inferiores a 30 dB) hasta niveles insoportables (140 dB).
- Las tecnologías LPWAN, también conocidas como Redes inalámbricas de baja potencia, ofrecen varias ventajas, como su bajo consumo de energía, capacidad para transmitir datos a largas distancias y costos de implementación reducidos. Esto permite que el sistema genere información relevante tanto en el envío como en la recepción de datos. Por otro lado, las WSN (Red de Sensores Inalámbrica) son un sistema que permite recopilar información de múltiples sensores y enviarla a través de un mismo medio, denominado nodo, que transmite todos los datos recolectados hacia el Gateway. Desde este punto, los datos se presentan en una plataforma IoT para este caso The ThingSpeak, la cual tiene la capacidad de mostrar y almacenar datos por un período de hasta 6 meses.
- Al emplear LoRa como tecnología LPWAN, se garantiza un control completo del sistema sin depender de terceros, lo que permite brindar soporte en tiempo real y ampliar el número de dispositivos según las necesidades. Al combinar esta tecnología con las WSN (Red de sensores inalámbricos), se logra recolectar datos pertinentes para el proyecto, cumpliendo así el objetivo de implementar un sistema eficiente y capaz de funcionar en entornos desfavorables.

- En el diseño del prototipo se considera para entornos poco favorables según el ambiente, esto debido a que no se tiene control sobre el entorno, se especifica un sistema capaz de recolectar datos contaminantes atmosféricos y acústicos, que sea impermeable al agua y humedad, capaz de enviar información a grandes distancias y que no tenga la necesidad de intervención humana por largos periodos de tiempo. El diseño esta propuesto para que sea alimentado mediante paneles solares y del mismo modo cualquier otra fuente de alimentación que entregue entre 5V a 24V con una corriente superior a 500mA.
- Después de utilizar la plataforma IoT The Things Speak y recopilar datos durante un período de 30 días en cuatro ubicaciones distintas, se ha encontrado evidencia de contaminación causada por monóxido de carbono (CO). Los niveles de CO se mantienen en un rango promedio entre 9 ug/m³ y 10 ug/m³, lo cual excede los 4 ug/m³ recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para un período de 24 horas, provocando la manifestación de señales en la salud tales como mareos, sensación de malestar estomacal, debilidad entre otros síntomas y en situaciones de exposición prolongada, incluso podría generar problemas en el sistema nervioso y cardiovascular. Es importante señalar que los resultados provienen de tres de los cuatro lugares muestreados. El cuarto lugar, conocido como sector Puerta de la ciudad, presenta una menor contaminación debido a la moderada afluencia de transeúntes y vehículos automotores, además de ser uno de los lugares con más espacio abierto, lo que permite una mejor circulación del aire y una menor presencia de contaminación atmosférica. Cabe mencionar que las variables restantes como lo son el Dióxido de Azufre (SO₂), Ozono (O₃), Dióxido de Nitrógeno (NO₂) y el Material Particulado (MP_{2.5}), no presentan ningún riesgo a la salud pública, mantienen valores promedios por debajo de lo que establecen las directrices de la OMS.
- De igual manera, la contaminación acústica es evidente en tres de los cuatro lugares, mostrando niveles promedio superiores a los 50 dB, lo cual se debe considerar como una fuente de contaminación. Esta situación se debe a que el nivel de ruido se

mantiene constante durante un período de 24 horas, lo que significa que hay ruidos ininterrumpidos a lo largo del día. En ciertos momentos, los niveles de ruido pueden incluso superar los 65 dB, pero esto solo ocurre en ciertos períodos del día. La presencia de personas y vehículos en estos lugares puede disminuir los niveles de ruido en ciertos sectores que no son de gran interés para las actividades humanas en días específicos. Por ejemplo, en el sector Mayorista 2, los valores de ruido más altos se registraron los días viernes, sábados y domingos, que son días de mayor circulación humana en esa área.

- Cada sector del radioenlace muestra una pérdida significativa de paquetes, por lo que es necesario considerar para el caso de estudio en simulaciones considere nuevas fuentes de ruido o de pérdidas por obstrucciones. La pérdida de información debe ser mínima para que el sistema sea considerado 100% fiable, con valores actuales de efectividad del 80% en el peor de los casos y del 90% se lo llega a considerar como un sistema moderadamente confiable.

9 Recomendaciones

En relación con la calibración de los sensores, es necesario llevar a cabo este proceso considerando varios factores, como el entorno, la propiedad que se está midiendo y la sensibilidad del dispositivo. Cuando se trata de sensores que cuentan con una hoja de calibración que abarca desde aire limpio hasta la presencia del gas contaminante, esta característica resulta conveniente, ya que permite evitar la exposición previa del sensor a un ambiente controladamente contaminado. Puede ser beneficioso utilizar herramientas como Microsoft Excel y WebPlotDigitizer (un analizador de lecturas en gráficos con tendencias exponenciales), para el análisis de las curvas de calibración proporcionadas por el fabricante. Estas gráficas permiten obtener ecuaciones de calibración que son valiosas al momento de implementar el software necesario.

Considerar el consumo de energía de cada dispositivo que se ponga en marcha. Esto es crucial, ya que, según el período de muestreo, se calculará un consumo diario de energía que tiene un impacto significativo al utilizar una fuente de energía alternativa, como la energía solar en este caso. Además, esta consideración abarca aspectos como los costos operativos, las áreas donde se implementará y el período de funcionamiento. Este último factor limita la capacidad de poner en marcha el prototipo, el cual está diseñado para operar las 24 horas del día, siete días a la semana, durante un período de 30 días.

Se recomienda la previa adquisición de permisos para la colocación de los nodos sobre el sector, ya sea con empresa pública, privada o persona natural, evitando de esta manera un incremento en el tiempo para la implementación de los nodos. Cabe destacar que se debe tomar en cuenta si se emplea una energía renovable o directamente desde una fuente de alimentación alterna, limitando de dicha manera cuales son aquellos lugares en donde conviene la instalación de estos nodos.

De la misma forma, el uso de un dispositivo especializado en la medición de variables contaminantes atmosféricas para calibrar los sensores de una forma fácil y sencilla, de lo contrario se usa los datos concernientes en datasheets descritos por los fabricantes de los sensores, convirtiendo todo ello en algo meramente matemático.

Se recomienda en casos de implementación sobre sectores que se tiene noción de contaminación existente, llevar las debidas precauciones para implementar, medir y circular en el sector. Muchos contaminantes muestran sus efectos tras haber estado durante un periodo prolongado de exposición, llegando a deteriorar la salud.

Las alturas manejadas en los nodos finales son de 3 metros, por motivos de máximo aprovechamiento en la obtención de las variables debido a contaminantes atmosféricos, en donde el NO₂, O₃, SO₂ y MP_{2.5} son variables con mayor densidad a la del aire por ello tienden a bajar, sin embargo, la variable de CO es menos densa que el aire por ello tiende a subir. Es por lo mismo que se recomienda que en función a la variable contaminante a estudiar se tome los debidos parámetros de densidad para la colocación de cada nodo.

La altura manejada en el nodo principal (Gateway), debe ser lo más elevada posible con el fin de disminuir las perdidas por propagación en zonas urbanas y rurales, teniendo en cuenta: potencias, zonas de fresnel y distancias del radio enlace. Para este tema de estudio la altura de antena es de referencia provista desde el software RadioMobile es de 2140 metros sobre el nivel del mar para el nodo principal, uno de los puntos más bajos es el del sector mayorista de 2052 metros sobre el nivel del mar, para lo cual se tendría una altura de referencia de 88 metros vista desde el Gateway hacia el nodo final del sector mayorista.

Dado que la pérdida de información es significativa, con una efectividad del 80% en el peor de los casos y del 90% en el mejor, es recomendable mejorar la calidad de la comunicación en la recepción. Esto se puede lograr configurando manualmente un SF más alto en todos los sitios, desde un SF8 para el más cercano hasta un SF10 para el más lejano, en lugar de dejarlo en automático según las librerías de la placa de desarrollo Cubecell. Esta configuración mejoraría el rendimiento y reduciría la pérdida de datos.

10 Bibliografía

- Alegre Alberto. (2022, October 24). *Análisis del impacto en la salud humana de la contaminación del aire*. CLUSTER IAQ. <https://www.revistapq.com/texto-diario/mostrar/3939288/analisis-impacto-salud-humana-contaminacion-aire>
- Álvarez Isabel. (2017). *Contaminación ambiental por ruido*.
- ATSDR. (2012). *RESUMEN DE SALUD PÚBLICA Monóxido de Carbono*. www.atsdr.cdc.gov/es
- Bernal Enrique. (2020). *Internet of Things (IoT) DISEÑO DE UNA RED DE IoT PARA EL HOGAR* [UNIVERSIDAD COOPERATIVA DE COLOMBIA FACULTAD DE INGENIERÍA SEMINARIO DE REDES Y TELECOMUNICACIONES SECCIONAL BOGOTÁ D.C.]. https://repository.ucc.edu.co/bitstream/20.500.12494/17670/1/2020_diseno_red_iot.pdf
- CDMX. (2016). *¿Qué es Ozono? Dirección de Monitoreo Atmosférico*, 1.
- China-total. (2022). *MQ136 Semiconductor Sensor*. <http://china-total.com/product/meter/gas-sensor/MQ136.pdf>
- Cigna. (2022). *Niveles de ruido perjudiciales | Cigna*. <https://www.cigna.com/es-us/knowledge-center/hw/niveles-de-ruido-perjudiciales-tf4173>
- CNEL EP. (2021). *CNEL EP expone tarifa residencial y tips de consumo eléctrico - CNEL EP*. <https://www.cnelep.gob.ec/cnel-ep-expone-tarifa-residencial-y-tips-de-consumo-electrico/>
- COITAOC. (2021). *ESTADO DEL ARTE Y TENDENCIAS DEL IoT e IoE | 1*. <https://coitaoc.org/wp-content/uploads/2021/06/Estado-del-Arte-IoT.pdf>
- Contaminante - Enciclopedia de Energía*. (2022, November 21). https://energyeducation.ca/Enciclopedia_de_Energia/index.php/Contaminante

- Cuidemos el Planeta. (2018). *CONTAMINANTES ¿Qué es la contaminación ambiental?*
- EasyEDA. (2023). *EasyEDA – Simulador de circuitos y diseño de circuitos impresos online*.
<https://easyeda.com/es>
- EPhysLab. (2020). *Tema 1 Conceptos previos*. https://ephyslab.uvigo.es/wp-content/uploads/2022/06/Tema-1_Conceptos_previos.pdf
- Geekflare. (2022, August 16). *11 plataformas y herramientas de Internet de las cosas (IoT) de código abierto*. <https://geekflare.com/es/iot-platform-tools/>
- Grupo CYM. (2024). *Ficha técnica Sonómetro DT-8852*.
[https://www.grupocym.pe/cms/_imgs/ficha/FICHA-TECNICA-SONOMETRO-DE-RUIDO-PROFESIONAL-CEM-\(TIPO-EXTECH-HD600\)-DT-8852.pdf](https://www.grupocym.pe/cms/_imgs/ficha/FICHA-TECNICA-SONOMETRO-DE-RUIDO-PROFESIONAL-CEM-(TIPO-EXTECH-HD600)-DT-8852.pdf)
- Guaca, N. A., & Hurtado, M. A. (2020). *EXPOTECH 2020 Ciencia, Ingeniería y Sociedad “Tecnologías exponenciales para la consolidación de la industria 4.0” Selección de tecnologías LPWAN para la implementación de un sistema IoT aplicado a la lombricultura*.
<https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/memorias/article/view/4170/4152>
- Guambuquete Manuel. (2021). *Repositorio Nacional en ciencia y tecnología*.
- Hammer Elektronik. (2024). *Detector de monóxido de carbono AS8700A*.
<https://www.hammerelectronic.dk/images/AS8700A%20CO%20vejl..PDF>
- Heltec. (2022). *AB02S User Manual*.
- Hernández Silvia. (2020). *Estudio a detalle de LoRaWAN* [Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación Universitat Politècnica de València].
<https://openaccess.uoc.edu/bitstream/10609/106369/7/shernandezc6TFM0120memoria.pdf>
- Huawei Electronics. (2022). *MQ-131_final*.

- INSST. (2014). *Dióxido de azufre*.
<https://www.insst.es/documents/94886/289651/DLEP+86+DIOXIDO+DE+AZUFRE.pdf/d339b938-aa66-4f09-a056-39c2866676af>
- INSST. (2018). *Dióxido de nitrógeno*.
<https://www.insst.es/documents/94886/431980/DLEP+116++Dióxido+de+nitrógeno++Año+2018.pdf/b295ec76-11fc-43fb-9834-31e8336d99bc?version=1.0&t=1551310405104>
- Junta de Castilla y Leo. (2019, July 12). *Niveles altos de Ozono Troposférico al sur de Castilla y León*. <https://tietarteve.com/niveles-altos-de-ozono-troposferico-al-sur-de-castilla-y-leon/>
- knaufinsulation. (2023). *Acústica / Knauf Insulation*.
<https://www.knaufinsulation.es/documentacion/prestaciones/acustica>
- Lenntech. (2023). *datos ozono*. <https://www.lenntech.es/datos-ozono.htm>
- Linares Cristina, D. J. (2008, September 1). *¿Qué son las PM2,5 y cómo afectan a nuestra salud?* <https://www.ecologistasenaccion.org/17842/que-son-las-pm25-y-como-afectan-a-nuestra-salud/>
- Linde. (2023). *Monóxido de Carbono_tcm316-612755*.
- LoRa (Long Range). (2022). *LoRa - Redes de Computadores I*.
<https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel878/redes1-2019-1/vf/lora/arquitetura.html>
- Makerfocus. (2022). *Batería recargable de litio Makerfocus 3.7V 3000mAh 1S 3C LiPo Batter - MakerFocus*.
<https://www.makefocus.com/collections/battery/products/makerfocus-3-7v-3000mah-lithium-rechargeable-battery-1s-3c-lipo-battery-pack-of-4>
- Mantilla Enrique, Castell Núria, Salvador Rosa, Azorín Cesar, Millán Millán, Miró José Vicente, & Lucía Juan. (2022). *OZONO TROPOSFÉRICO Y CALIDAD DEL AIRE*.

<https://agroambient.gva.es/documents/20549779/161512949/Ozono+troposférico+y+c alidad+del+aire.+Libro+completo/c0ae3c3e-5588-433f-a0b6-daf473a9c0a9>

Martínez José Luis. (2018, July 13). *PRORED - Zonas de Fresnel en un radioenlace*.
<https://www.prored.es/zonas-de-fresnel-en-un-radioenlace/>

MAXIM. (2022). *MAX9814 MAXIM / Alldatasheet*. www.maxim-ic.com.

Medina Jorge. (2010). *Conciencia Tecnológica*. 50–53.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94415753009>

Medina Santiago. (2018). *Sensores Automotrices*.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11558.98883>

Mikrotik. (2022). *MikroTik Routers and Wireless - Products: wAP LR9 kit*.
https://mikrotik.com/product/wap_lr9_kit#fndtn-specifications

OMS. (2005). *MP-2005 - WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa*.

OMS. (2021a). *Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire Resumen ejecutivo*.

OMS. (2021b). *Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire Resumen ejecutivo*. <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/346062/9789240035461-spa.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

OpenSky. (2024). *Detector de monóxido de carbono SMART SENSOR AS8700A - Open Sky Colombia*. <https://www.openskycolombia.com/equipos/detector-de-monoxido-de-carbono-smart-sensor-as8700a/>

Pascua Eugenio. (2021, November 20). *5 cosas que debe saber sobre el mercado LPWAN en 2021*. <https://iot-analytics.com/5-things-to-know-lpwan-market/>

PB Psiborg. (2022). *Wireless Sensor Network in IoT - PsiBorg*. <https://psiborg.in/wireless-sensor-network-in-iot/>

Planes Ana. (2020). *Estudio experimental de tecnologías LPWAN en entornos industriales*
4.0. www.etsit.upv.es

Ponce Castillo, E. A., Ledesma Buele, J. S., Puchaicela Cuenca, R., & Miraba Cajamarca, K. J. (2022). Estudio comparativo de modelos de propagación con el análisis de la intensidad de la señal LTE de las estaciones base con el área de cobertura en Riobamba -Ecuador. *ConcienciaDigital*, 5(3), 273–296.
<https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v5i3.2323>

Quispe Julio, Roque Cesar, Rivera Gladys, Rivera Freddy, & Romaní Alfonso. (2021). Impacto de la contaminación sonora en la salud de la población de la ciudad de Juliaca, Perú. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 5(1), 331–337.
https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v5i1.228

RAK Wireless. (2022). *900-930MHz 8dBi Fiberglass Antenna Datasheet Overview Features*.

Rocha Laura. (2018, June 23). *¿Por qué es letal el monóxido de carbono?* - Infobae.
<https://www.infobae.com/sociedad/2018/06/23/por-que-es-letal-el-monoxido-de-carbono/>

Romero Amondaray, L., Artigas Fuentes, F. J., & Anias Calderón, C. (2020). Redes de Sensores Inalámbricos Definidas por Software: revisión del estado del arte. In *RIELAC* (Vol. 41, Issue 2).

SHARP. (2014). *GP2Y1010AU0F*.
https://global.sharp/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/gp2y1010au_e.pdf

SOLTEC. (2024). *Decibelímetro Digital Data Logger - DT-8852 - CEM*.
<https://soltecinstrumentos.com.ar/productos/decibelimetro-digital-data-logger-dt-8852-cem/>

Soshine. (2022). *Mini panel solar monocristalino de 6W con puerto USB 5V y DC 6V /6W* - Soshine. <http://www.soshine.com.cn/a797.aspx>

Winsen. (2014). *Ozone Gas Sensor (Model : MQ131 Low Concentration) Manual*.
www.winsen-sensor.com

Xirio Online. (2024). *Herramienta de planificación ONLINE XIRIO*. <https://www.xirio-online.com/web/home/Login.aspx>

11 Anexos

Anexo 1. Diseño de red

Tabla 27.
Datos del enlace Gateway – Nodo Final

Lugar	Dirección	Distancia GW–NF	Peor Fresnel	Nivel Rx simulado dBm	Calificación Puntos/10	Disponibilidad
Monumento “El León”	Av. Universitaria y Alonso de Mercadillo	1.96 km P: 8	0.6 P: 9	-74.3 P: 10	9.00	NO
Centro	Av. Universitaria y calle 10 de agosto	1.54 km P: 9	0.0 P: 0	-80.2 P: 9	6.00	NO
Parque Bolívar	Av. Universitaria y calle Imbabura	1.25 km P: 9	-1.2 P: 0	-98.4 P: 9	6.00	NO
Parque Bolívar	Calle 18 de noviembre y calle Cristóbal Colon	1.39 km P: 9	-0.3 P: 0	-89.8 P: 9	6.00	NO
Redondel Pileta Paz	Av. Cuxibamba y Av. Gran Colombia	0.81 km P: 10	0.7 P: 9	-67.8 P: 10	9.66	NO
Terminal	Av. 8 de diciembre	1.09 km P: 10	-1.0 P: 0	-101.4 P: 8	6.00	NO
Terminal Estaciones	Calle Victoriano Palacios	1.03 km P: 10	0.3 P: 3	-73.2 P: 10	7.66	NO
Sub centro de salud #1	Av. Universitaria y Av. Cuxibamba	0.91 km P: 10	-0.7 P: 0	-97.7 P: 9	6.33	NO
Catedral	Calle 10 de agosto	1.72 km P: 9	1.2 P: 10	-73.0 P: 10	9.66	NO
Barrio Manuel Carrión	Av. Manuel Carrión y calle Padre Bolívar Bailon	0.22 km P: 10	-0.6 P: 0	-78.1 P: 10	6.66	NO
Mayorista 1	Av. Cuxibamba y calle Guaranda	0.69 km P: 10	0.6 P: 9	-67.1 P: 10	9.66	NO
Mayorista 2	Av. Gran Colombia y calle Guaranda	0.76 km P: 10	0.8 P: 10	-66.1 P: 10	10	SI

Mayorista 3	Calle Machala y calle Ancón	0.86 km P: 10	0.9 P: 10	-66.8 P: 10	10	NO
El pedestal Redondel	Av. Manuel Carrión y Av. Paltas	1.24 km P: 9	-0.2 P: 0	-84.1 P: 9	6.00	NO
Puerta de la ciudad	Entre Av. Antonio José, 18 de noviembre y calle Pasaje Rodríguez	0.97 km P: 10	0.2 P: 3	-74.3 P: 10	7.66	SI
Barrio Ramon Pinto	Calle Cristóbal Colon y calle Ramon Pinto	1.28 km P: 9	-1.5 P: 0	-113.3 P:	5.33	NO
San Sebastián	Entre calle Lourdes y Juan José Peña referencia Farmacia San José	2.38 km P: 3	0.9 P: 10	-69.0 P: 10	7.66	SI
Cabo Minacho	Entre calle Eduardo Kigman y Gonzanama	2.70 km P: 3	1.0 P: 10	-74.3 P: 10	7.66	SI

Nota. Tabla propietaria del autor con información concluyente del software Radio Mobile. El fin de esta tabla es la de descartar lugares para la implementación del nodo final, cabe recalcar que la selección de estos lugares se debe a la actividad y flujo constante de tráfico vehicular y peatonal sobre el sector. La información recopilada será utilizada para calcular las pérdidas de propagación en un entorno urbano mediante la aplicación del modelo de propagación de Okumura Hata. Los resultados obtenidos se presentan en la **Tabla 19,** "Cálculos de propagación lugares estratégicos".

Tabla 28.
Cálculos de propagación lugares estratégicos

Lugar RX	Potencia TX dBm	G. TX dBi	G. RX dBi	Distancia km	Htx m	Hrx m	H antena Tx 6m	H antena Rx 3m	Frecuencia MHz	LBF dBm	Factor corrección	Okumura hata dBm	Potencia Rx dBm	Sensibilidad dBm	Cal. Simulada /10	Prx Real dBm	Cal. medida /10
Monumento "El León"	23	8	3	1,96	2139	2072	73	3	915	97,52	3,85	126,98	-92,98	-135	9.00	-	8.33
Redondel Pileta Paz	23	8	3	0,81	2139	2049	96	3	915	89,85	3,85	112,85	-78,85	-135	9.66	-94; -96	9.33
Terminal Estaciones	23	8	3	1,03	2139	2050	95	3	915	91,94	3,85	116,25	-82,25	-135	7.66	-	6.66
Catedral	23	8	3	1,72	2139	2074	71	3	915	96,39	3,85	125,31	-91,31	-135	9.66	-	8.66
Mayorista 1	23	8	3	0,69	2139	2052	93	3	915	88,46	3,85	110,81	-76,81	-135	9.66	-82; -95	9.33
Mayorista 2	23	8	3	0,76	2139	2052	93	3	915	89,29	3,85	112,15	-78,15	-135	10	-	9.00
Mayorista 3	23	8	3	0,86	2139	2053	92	3	915	90,37	3,85	113,93	-79,93	-135	10	-	9.33
Puerta de la ciudad	23	8	3	0,97	2139	2056	89	3	915	91,41	3,85	115,81	-81,81	-135	7.66	-	7.00
San Sebastián	23	8	3	2,38	2139	2081	64	3	915	99,21	3,85	130,66	-96,66	-135	7,66	-	7.00
Cabo Minacho	23	8	3	2,7	2139	2099	46	3	915	100,31	3,85	134,86	-100,86	-135	7,66	-	7.00

Nota. Tabla propietaria del autor, la calificación final determina que tan factible resulta el lugar para la colocación de un nodo sobre el mismo, adicional el único parámetro que llega a alterarse es el de la potencia en recepción (Prx), el cual es uno de los tres parámetros principales para puntuar el mejor lugar.

- Ptx: potencia transmisión
- G. TX y G. Rx: Ganancia transmisión y recepción (antenas)
- Htx y Hrx: alturas de transmisión y recepción sobre el nivel del mar (en este caso para los cálculos se puede considerar al Gateway como transmisor y al nodo como receptor).
- Htx 6m: alturas debidas al enlace, son alturas producto de la resta entre antena en transmisión sobre el nivel del mar y antena de recepción sobre el nivel del mar, adicional se suma la torre donde fue colocada.
- Hrx 3m: alturas debidas al enlace, son de forma constante, se considera que la altura promedio del nodo final sea de 3 metros.
- Frec.: es la frecuencia de operación dada de forma constante en 915MHz.
- FSPL: Free Space Path Loss – pérdidas de trayecto en el espacio libre, son perdidas sin ninguna obstrucción (perdidas de forma ideal), utilizadas para comparar las perdidas ideales con pérdidas con obstrucciones (Lb).
- Lb: Loss Budget – presupuesto de pérdidas, calculado con el modelo de propagación Okumura Hata en zonas urbanas.
- Factor de Corrección (A): parámetro debido al modelo de propagación de Okumura Hata.
- Prx: Potencia de recepción calculada.
- Prx: Potencia de recepción medida (llamada también RSSI estos datos son obtenidos mediante el envío de paquetes desde nodo final hasta Gateway).
- Cal.: es la calificación debida a los parámetros de potencia en recepción, zonas de Fresnel y distancia.

Anexo 2. Códigos de implementación en Arduino

Librerías usadas

```
#include "LoRaWan_APP.h"
#include <Wire.h>
#include "HT_SSD1306Wire.h"
```

Códigos iniciales para enlace LoRa

Estos códigos basan el enlace bajo la frecuencia de la región 915MHz, un modo de trabajo del nodo en clase A y un estado de comandos AT desactivado debido a que se usa el protocolo OTAA para el enlace.

```
/* OTAA para*/
uint8_t devEui[] = { 0x70, 0xB3, 0xD5, 0x7E, 0xD0, 0x05, 0x9B, 0x2B };
uint8_t appEui[] = { 0xA5, 0xA2, 0xDA, 0xD1, 0x2A, 0xDA, 0x12, 0x32 };
uint8_t appKey[] = { 0xDE, 0x31, 0x50, 0x64, 0x2A, 0x3E, 0xBA, 0xFB, 0x1F, 0x8A,
                    0x3A, 0x52, 0x91, 0xC8, 0xFA, 0x44 };

/* ABP para*/
uint8_t nwkSKey[] = { 0x15, 0xb1, 0xd0, 0xef, 0xa4, 0x63, 0xdf, 0xbe, 0x3d, 0x11,
                    0x18, 0x1e, 0x1e, 0xc7, 0xda, 0x85 };
uint8_t appSKey[] = { 0xd7, 0x2c, 0x78, 0x75, 0x8c, 0xdc, 0xca, 0xbf, 0x55, 0xee,
                    0x4a, 0x77, 0x8d, 0x16, 0xef, 0x67 };
uint32_t devAddr = (uint32_t)0x007e6ae1;

/*LoraWan channelsmask, default channels 0-7*/
uint16_t userChannelsMask[6] = { 0x00FF, 0x0000, 0x0000, 0x0000, 0x0000, 0x0000
};

/*LoraWan region, select in arduino IDE tools*/
LoRaMacRegion_t loraWanRegion = ACTIVE_REGION;

/*LoraWan Class, Class A and Class C are supported*/
DeviceClass_t loraWanClass = LORAWAN_CLASS;

/*the application data transmission duty cycle. value in [ms].*/
uint32_t appTxDutyCycle = 5000; //(1*60*60*1000)(hora*minutos*segundos*miliseg)
```

```

/*OTAA or ABP*/
bool overTheAirActivation = LORAWAN_NETMODE;
/*ADR enable*/
bool loraWanAdr = LORAWAN_ADR;
/* set LORAWAN_Net_Reserve ON, the node could save the network info to flash,
   when node reset not need to join again */
bool keepNet = LORAWAN_NET_RESERVE;
/* Indicates if the node is sending confirmed or unconfirmed messages */
bool isTxConfirmed = LORAWAN_UPLINKMODE;
/* Application port */
uint8_t appPort = 2;
uint8_t confirmedNbTrials = 4;

```

Declaración de variables globales

Estas variables establecen un valor constante a todo el programa a la hora de la ejecución, los mismos consideran valores de voltajes, resistencia, pines analógicos y digitales, valores de variables contaminantes, etc.

```

//-----DECLARACION DE PINES SENSORES
const int pinMQ136 = ADC1; //pin mq136 (CO y SO2)
const int pinMQ131 = ADC2; //pin mq131 (O3 y NO2)
const int pinPM2 = ADC3; //pin PM2.5 GP2Y (PM2.5)
const int ledpow = GPIO6; //pin led GP2Y (PM2.5)
const int pinMIC = GPIO7; //pin max9418 (micrófono - ruido)

//-----DECLARACION DE VARIABLES
int val_mq136; //valores de 0 - 4095
int val_mq131; //valores de 0 - 4095
int val_pm2; //valores de 0 - 4095

```

```

const float v_modulo = 3.3; //voltaje del cubecell me entrega 5V//3.3V
const float RL_mq136 = 2; //Resistencia de carga de 47kohms
const float RL_mq131 = 2; //Resistencia de carga de 10kohms

float Rs_mq136 = 0;
float Rs_mq131 = 0;

float R0_mq136 = 0.30; //ctt aire limpio
float R0_mq131 = 0.27; //ctt aire limpio

//obtención de contaminantes en partes por millon
float ppmCO = 0;
float ppmSO2 = 0;
float ppmO3 = 0;
float ppmNO2 = 0;
float ppmPM2 = 0;
float ppm = 0;

//obtención de contaminantes en mg/m3
float CO = 0;
float SO2 = 0;
float O3 = 0;
float NO2 = 0;
float PM2 = 0;

// Valor de a*x^b donde a y b se obtienen de la curva de calibración
const float pcCO[3] = { -2.0027, 11.2234 }; // a - b
const float pcSO2[3] = { -1.3039, 6.3001 }; // a - b
const float pcO3[3] = { -1.2415, 5.9999 };

```

```

const float pcNO2[3] = { -1.9999, 11.2209 };
////temporizadores para el sensor pm2.5
int samplingTime = 280;
int deltaTime = 40;
int sleepTime = 9680;

//Declaración de variables micrófono MAX9814
#define ADC_BITS 12
#define ADC_REF 5.0
#define ADC_RESOLUTION (1 << ADC_BITS)
float db = 0;

// Definir el tiempo de recolección de datos
unsigned long tiempo_de_recoleccion = 10000; //30seg //300000; // 5 minutos en
milisegundos //
unsigned long t_trama = 15000;//15000
unsigned long t_descanzo = 30*60*1000; //2*60*1000; //2min //(50*60*1000);
int ciclos = 0;

```

Función para el envío de paquetes

La misma funciona creando datos hexadecimales de 4 bytes y los va colocando en orden para su envío, desde los datos del ruido hasta los datos del material particulado.

```

// FUNCION PARA LA RECOLECCION DE VALORES Y SU ENVIO A TRAVES DE LORAWAN
static void prepareTxFrame(uint8_t port) {

    //envio de variable RUIDO
    unsigned char *puc;
    puc = (unsigned char *)&db;
    appDataSize = 24;

```

```
appData[0] = puc[0];
appData[1] = puc[1];
appData[2] = puc[2];
appData[3] = puc[3];

//envio de variable monóxido de carbono
puc = (unsigned char *)&CO;
appData[4] = puc[0];
appData[5] = puc[1];
appData[6] = puc[2];
appData[7] = puc[3];

//envio de variable dióxido de azufre
puc = (unsigned char *)&SO2;
appData[8] = puc[0];
appData[9] = puc[1];
appData[10] = puc[2];
appData[11] = puc[3];

//envio de variable ozono
puc = (unsigned char *)&O3;
appData[12] = puc[0];
appData[13] = puc[1];
appData[14] = puc[2];
appData[15] = puc[3];

//envio de variable dióxido de nitrógeno
puc = (unsigned char *)&NO2;
appData[16] = puc[0];
```

```

appData[17] = puc[1];
appData[18] = puc[2];
appData[19] = puc[3];

//envio de variable material particulado
puc = (unsigned char *)&PM2;
appData[20] = puc[0];
appData[21] = puc[1];
appData[22] = puc[2];
appData[23] = puc[3];

Serial.print("decibelios: ");
Serial.print(db);
Serial.print("    CO: ");
Serial.print(CO);
Serial.print("    SO2: ");
Serial.print(SO2);
Serial.print("    O3:");
Serial.print(O3);
Serial.print("    NO2: ");
Serial.print(NO2);
Serial.print("    PM2.5: ");
Serial.println(PM2);
}

```

Función de inicio

La misma comprende parámetros el estado de librerías, sus clases y el estado de pins desde el arranque del módulo LoRa.

```
void setup() {
```

```

Serial.begin(115200);
delay(100);
display.init(); //se inicia el display
millis(); //se inicializa un temporizador
pinMode(pinMIC, INPUT);    ///pin digital a ADC para el micrófono
pinMode(ledpow, OUTPUT);   /// enciende led del sensor pm2.5 polvo GP2Y1014AU0F
pinMode(Vext, OUTPUT);     // el pin vext funciona como alimentación
digitalWrite(Vext, LOW); // Establecer el nivel lógico del pin Vext a LOW = ON
digitalWrite(ledpow, LOW); // Establecer el nivel lógico del pin ledpow a LOW =
ON

// configuraciones estandar para el enlace LORAWAN
#if (AT_SUPPORT)
    enableAt();
#endif
deviceState = DEVICE_STATE_INIT;
LoRaWAN.ifskipjoin();
}

```

Bucle infinito

La función permitirá que el programa siempre se corra y nunca se detenga, bajo las consideraciones que se haya propuesto, aquí es donde todas las funciones que se han creado convergen para funcionar en conjunto.

```

void loop() {
    //encender sensores
    digitalWrite(Vext, LOW);
    ///-----se tiene un ciclo de 1hora-----
    //se envian 60 paquetes durante 30min y se descanzan 30minpara recargar la
    bateria
}

```

```

if (ciclos < 60) {
    digitalWrite(ledpow, LOW);
    digitalWrite(Vext, LOW); // encendido de sensores
    appTxDutyCycle = t_trama; // se agrega un t=25seg - separación entre paquete
    nodofinal();
} else { //se descanzan 30min
    digitalWrite(ledpow, HIGH);
    digitalWrite(Vext, HIGH); // apagado de sensores habilitar en caso de
    usar paneles solares

    appTxDutyCycle = t_descanzo; // - 15000 - 2*60*1000; // 1*60*60*1000; // 1 hora -
    15 segundos lectura del primer intervalo - 2min precalentamiento

    nodofinal();
    ciclos = 0;
}
}

```

Función de estados de LoRa

Cuando el enlace se establece la función entra en proceso con 5 posibles estados.

1. DEVICE_STATE_INIT. – el programa corrobora las configuraciones estén correctas, que tipo de configuración se establece y modos de operación.
2. DEVICE_STATE_JOIN. – el dispositivo envía paquetes de ingreso hacia el Gateway.
3. DEVICE_STATE_SEND. – el enlace se establece y la recolección de datos contaminantes entra en proceso, una vez obtenido estos datos se procede a empaquetarlos y enviarlos mediante el protocolo OTAA.
4. DEVICE_STATE_CYCLE. –se establece el periodo de inactividad (estado de bajo consumo), el mismo agrega un lapso corto de tiempo imperceptible para evitar interferencias con algún otro dispositivo que envíe paquetes bajo la misma red,
5. DEVICE_STATE_SLEEP. – entra en modo de bajo consumo cuando el tiempo se agota comienza el proceso nuevamente.

```

// Función procesamiento de datos y su envío
void nodofinal() {
    unsigned long tiempo_de_inicio = millis();
    switch (deviceState) {
        case DEVICE_STATE_INIT:
            {
#ifdef LORAWAN_DEVEUI_AUTO
                LoRaWAN.generateDeveuiByChipID();
#endif
#ifdef AT_SUPPORT
                getDevParam();
#endif
                printDevParam();
                LoRaWAN.init(loraWanClass, loraWanRegion);
                deviceState = DEVICE_STATE_JOIN;
                break;
            }
        case DEVICE_STATE_JOIN:
            {
                LoRaWAN.join();
                break;
            }
        case DEVICE_STATE_SEND:
            {
                float prom_db = 0, prom_CO = 0, prom_SO2 = 0, prom_O3 = 0, prom_NO2 = 0,
                prom_PM2 = 0;
                int r = 0, rb = 0;
                while (millis() - tiempo_de_inicio < tiempo_de_recoleccion) {
                    db = max9814();

```

```

CO, SO2, O3, NO2, PM2 = leerSensores();
prom_db = prom_db + db;
prom_CO = prom_CO + CO;
prom_SO2 = prom_SO2 + SO2;
prom_O3 = prom_O3 + O3;
prom_NO2 = prom_NO2 + NO2;
prom_PM2 = prom_PM2 + PM2;
if (db > 1) {
    rb = rb + 1;
}
r = r + 1;
displayInof(); //funcion muestra en el display datos
delay(1); // Esperar 1 segundo entre cada lectura de sensor
}
if (rb > 0) {
    db = prom_db / rb;
} else {
    db = 0;
}

CO = prom_CO / r;
SO2 = prom_SO2 / r;
O3 = prom_O3 / r;
NO2 = prom_NO2 / r;
PM2 = prom_PM2 / r;
prepareTxFrame(appPort);
enviando();
LoRaWAN.send();// se envian los datos
deviceState = DEVICE_STATE_CYCLE;

```

```

        ciclos = ciclos + 1; //incremento de datos hasta completar maximo -- 60
        break;
    }
    case DEVICE_STATE_CYCLE:
    {
        //paquetes enviados y se escoge un tiempo de descanso
        exito();
        txDutyCycleTime = appTxDutyCycle + randr(0, APP_TX_DUTYCYCLE_RND);
        LoRaWAN.cycle(txDutyCycleTime);
        deviceState = DEVICE_STATE_SLEEP;
        break;
    }
    case DEVICE_STATE_SLEEP: //entra en modo de sueño
    {
        LoRaWAN.sleep();
        break;
    }
    default:
    {
        deviceState = DEVICE_STATE_INIT; //inicia nuevamente el proceso de
recolección
        break;
    }
}
}

```

Función de presentación pantalla OLED

La misma muestra de forma visual en una mini pantalla OLED los datos relacionados a la contaminación.

```
void displayInof() {
    display.clear();
    display.setFont(ArialMT_Plain_10);
    //display.drawString(0, 0, "----- SQA & N -----");
    display.drawString(0, 0, "decibelios: " + String(db) + " db");
    display.drawString(0, 10, "CO: " + String(CO) + " ug/m3");
    display.drawString(0, 20, "SO2: " + String(SO2) + " ug/m3");
    display.drawString(0, 30, "O3: " + String(O3) + " ug/m3");
    display.drawString(0, 40, "NO2: " + String(NO2) + " ug/m3");
    display.drawString(0, 50, "PM2: " + String(PM2) + " ug/m3");
    display.drawString(100, 50, "UNL");
    display.display();
}
```

Función visualización de mensaje en transmisión

Muestra en la mini pantalla OLED un pequeño mensaje de envío de y de culminación de paquetes.

```
void enviando() {
    display.setFont(ArialMT_Plain_16);
    display.clear();
    display.drawString(30, 20, "Enviando....");
    display.display();
    delay(2500);
}
```

```
void exito() {
    display.setFont(ArialMT_Plain_16);
```

```

display.clear();
display.drawString(30, 20, "LISTO..!!");
display.display();
delay(2500);
display.clear();
display.display();
}

```

Función convertidora de datos digitales a análogos

Al no disponer de suficientes pines ADC en la placa HTCC AB02S se procede a usar un pin digital y convertir esos datos digitales en valores de 0 a 4095.

```

unsigned int readAnalog(int pin) {
    unsigned int result = 0;

    for (int i = 0; i < ADC_BITS; i++) {
        digitalWrite(pin, HIGH);
        delayMicroseconds(20);
        result |= digitalRead(pin) << i;
        digitalWrite(pin, LOW);
        delayMicroseconds(20);
    }

    return result;
}

```

Función para leer datos de Ruido

Con la ayuda de la función readAnalog(), se logra obtener datos relacionados a la contaminación acústica.

```

float max9814() {

```

```

float analogValue;
for (int m = 0; m < 100; m++) {
    analogValue = analogValue + readAnalog(pinMIC);
}
analogValue = analogValue / 100.0;
float voltage = (analogValue * ADC_REF) / ADC_RESOLUTION;
if (voltage == 0) {
    voltage = voltage + 0.000889; //0.001 1125 //0.0000002 2515 //0.000889
}
db = 20 * log10((voltage)*1125); //1125 //14142--raizde5//2515 raiz5//447214
raizde5//200000
if (db < 0) {
    db = 0;
}
return db;
}

```

Función leer valores contaminantes debidas a los gases

La misma contempla 5 variables: CO, SO2, O3, NO2 y PM, las cuales fueron calibradas debidamente con sus respectivas curvas descritas en los datasheets de cada una de ellas en los sensores MQ136, MQ131 y GP2Y1010F.

```

//Función obtiene variables contaminantes atmosfericas
float leerSensores() {
    digitalWrite(ledpow, LOW); // power on the LED
    delayMicroseconds(samplingTime);
    val_pm2 = analogRead(pinPM2);
    delayMicroseconds(deltaTime);
    digitalWrite(ledpow, HIGH); // turn the LED off
    delayMicroseconds(sleepTime);
}

```

```

val_mq136 = analogRead(pinMQ136);
val_mq131 = analogRead(pinMQ131);

float voltage_mq136 = (val_mq136 / 4095.0) * v_modulo;
float voltage_mq131 = (val_mq131 / 4095.0) * v_modulo;
float voltage_pm2 = (5.0 * val_pm2 / 4095.0);

Rs_mq136 = ((v_modulo - voltage_mq136) * RL_mq136)/voltage_mq136;
Rs_mq131 = ((v_modulo - voltage_mq131) * RL_mq131)/voltage_mq131;

float Ratio_mq136 = Rs_mq136 / (R0_mq136);
float Ratio_mq131 = Rs_mq131 / (R0_mq131);

ppmCO = calculo_ppm(pcCO[0], pcCO[1], Ratio_mq136);
ppmSO2 = calculo_ppm(pcSO2[0], pcSO2[1], Ratio_mq136);
ppmO3 = calculo_ppm(pcO3[0], pcO3[1], Ratio_mq131);
ppmNO2 = calculo_ppm(pcNO2[0], pcNO2[1], Ratio_mq131);

CO = 0.0409 * ppmCO * 28.01; // 0.0409*ppm*28.01g/mol
SO2 = 0.0409 * ppmSO2 * 64.066; // 0.0409*ppm*44.01g/mol
O3 = 0.0409 * ppmO3 * 48; // 0.0409*ppm*48g/mol
NO2 = 0.0409 * ppmNO2 * 46.0055; // 0.0409*ppm*48g/mol

PM2 = 0;

if (voltage_pm2 > 0.5595 && voltage_pm2 <= 3.57 ){
    PM2 = (voltage_pm2 - 0.5595)/0.006;
}

if (voltage_pm2 > 3.57 && voltage_pm2 <= 3.66){
    PM2 = (voltage_pm2 - 3.4453)/0.0003;
}

```

```

}
if (voltage_pm2 > 3.66){
    PM2 = 800;
}
return CO, SO2, O3, NO2, PM2;
}

```

Función para calcular las partes por millón del sensor

Con la ayuda de las curvas de calibración descritas en el datasheet de cada sensor, se obtiene valores de a y b los cuales indicaran el comportamiento y la existencia de la contaminación según la variación del voltaje leído del sensor.

```

float calculo_ppm(float a, float b, float ratio){
    ppm = exp((ratio - b) / a);
    return ppm;
}

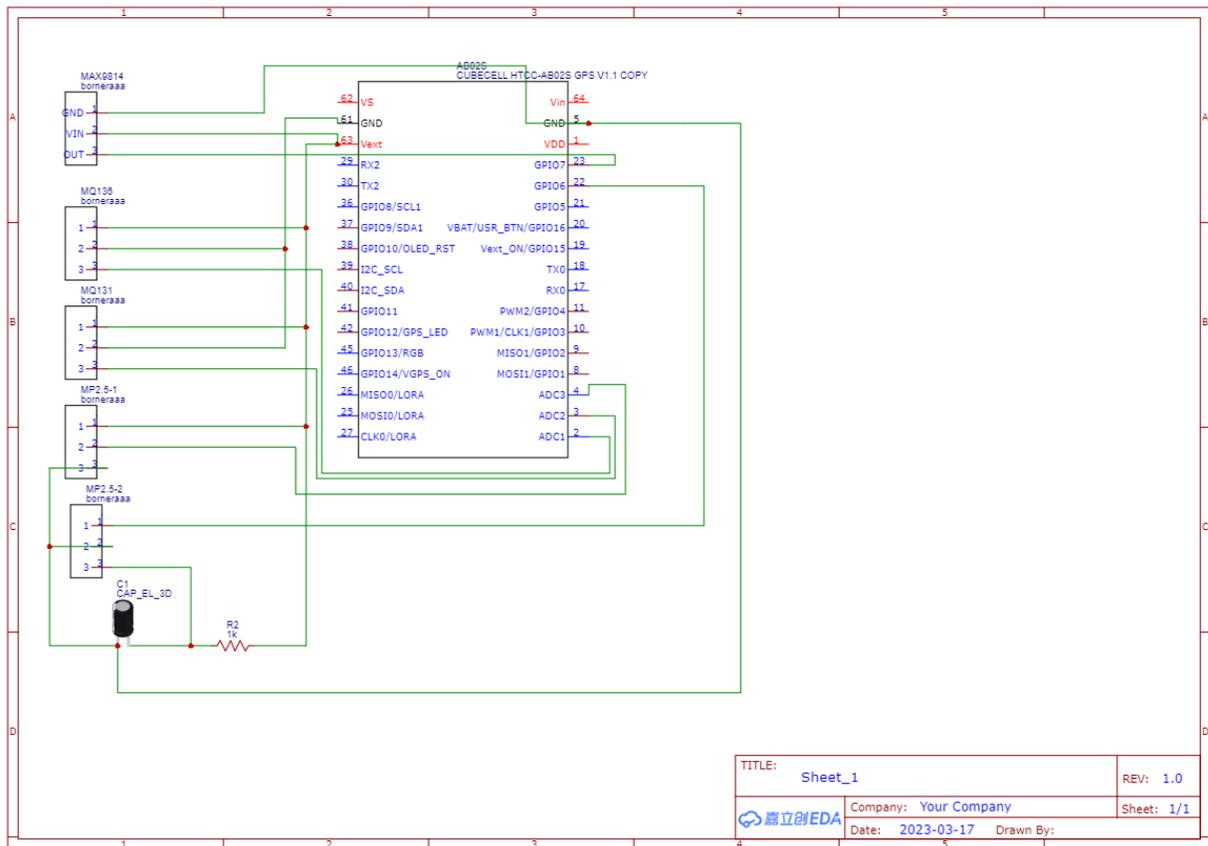
```

Anexo 3. Construcción prototipo nodo final

Diseño PCB baquelita

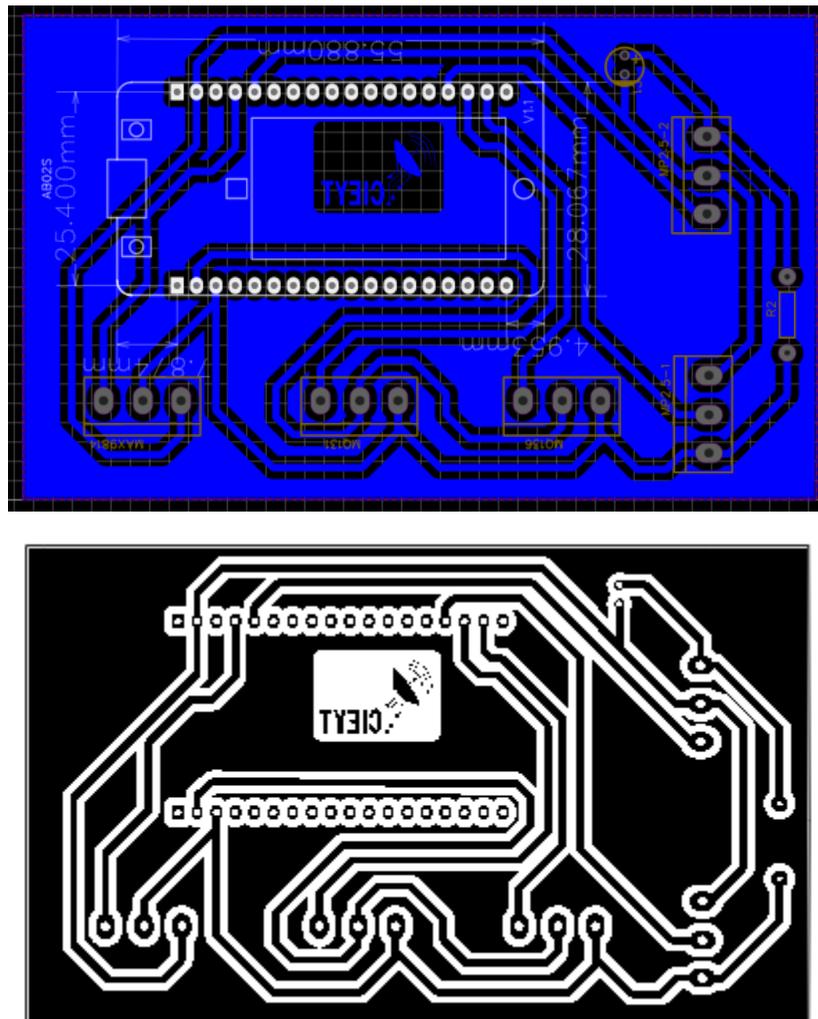
Con la ayuda de la herramienta online para la creación, diseño y facturación de placas PCB denominada EasyEDA, se crea un diseño que satisface las necesidades del prototipo. Esta herramienta con una extensa librería de toda clase de dispositivos electrónicos entre ellos el módulo CubeCell AB02S con las medidas exactas del mismo.

Figura 70.
Esquemático prototipo



Nota. Figura obtenida de la herramienta online EasyEDA (EasyEDA, 2023).

Figura 71.
Diseño PCB prototipo



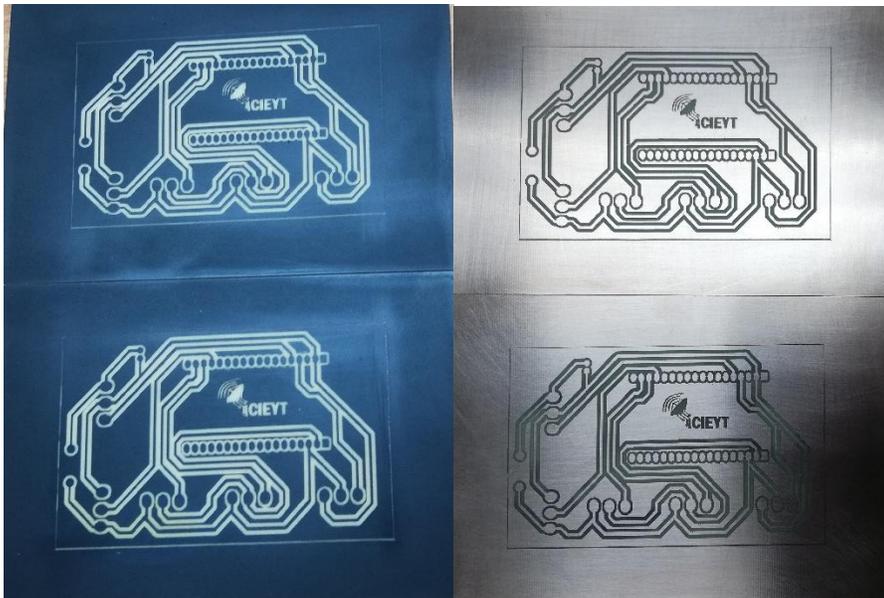
Nota. Figura obtenida de la herramienta online EasyEDA (EasyEDA, 2023).

El diseño consta de 5 salidas de señal hacia los pines ADC1 (sensor MQ136), ADC2 (sensor MQ131), ADC3 (sensor MP2.5 GP2Y), GPIO6 (sensor MP2.5 GP2Y power LED) y GPIO7 (MAX9814). Adicional con alimentación hacia el pin VEXT (3.3V) y una salida a GND. Dado a la escasez que existe de pines ADC en el módulo CubeCell AB02S se transforma al pin GPIO7 mediante código como un pin lector de señales analógicas, dicha función esta descrita en el código denominada *readAnalog(int pin)*.

Quema de baquelita e implementación de diseño

Previo al proceso de quemado de la baquelita la cual se realiza mediante la utilización de una cortadora y grabadora laser CNC encontrada en la I2TEC de la Universidad Nacional de Loja, se procede a pintar la baquelita con spray color negro mate, debido a que la misma cuenta con una propiedad antirreflejante la cual evita que el láser pueda quemar la pintura en lugar de reflejar el rayo. Adicionalmente el diseño del PCB debe ser volteado verticalmente, debido a que es el reflejo visto desde arriba, este proceso no aplica en el método del planchado.

Figura 72.
Quema de PCB – método del laser



Nota. Figura propietaria del autor

Materiales principales

El nodo final considera, caja de paso plástica de 20x20x10cm, módulos sensores, modulo LoRa (HTCC AB02S) entre otros materiales y herramientas.

Figura 73.
Materiales principales para la construcción nodo final



MATERIALES ELECTRONICOS

15 Jumpers hembra y macho,
5 Borneras 3 pines,
1 Baquelita 10x15cm un lado
1 Crema estañadora
1 metro de estaño
1 Sensor MQ136
1 Sensor MQ131
1 Sensor PM2.5 GP2Y
1 Modulo MAX9814
1 Regulador de voltaje 24V max
INPUT y 5V – 5A OUTPUT
1 Placa de desarrollo Cubecell
AB02S

MATERIALES eléctricos

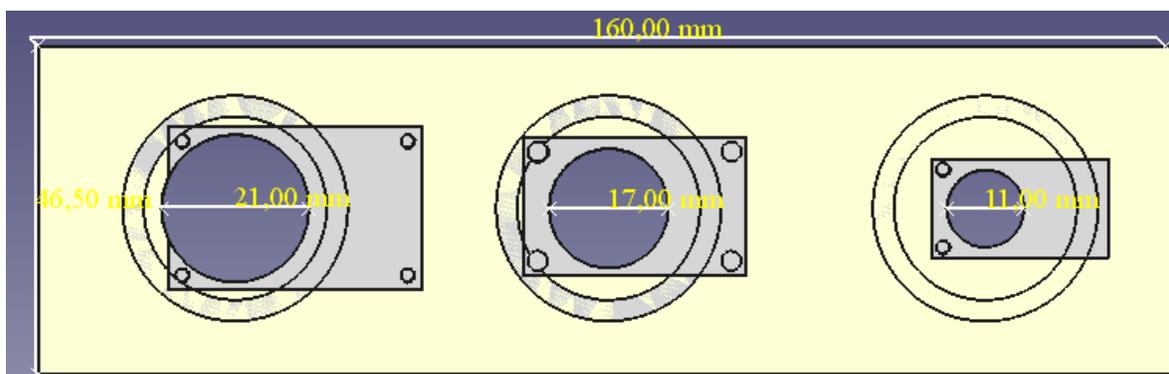
1 extensión de corriente de 5m
1 cable USB a micro USB de 15cm
de largo mínimo
1 cargador de 5v – 24V y mínimo
500mA con salida CC
1 batería Lipo 3000mA con
conector jst 1.25
1 Caja de paso de 20x20x10cm

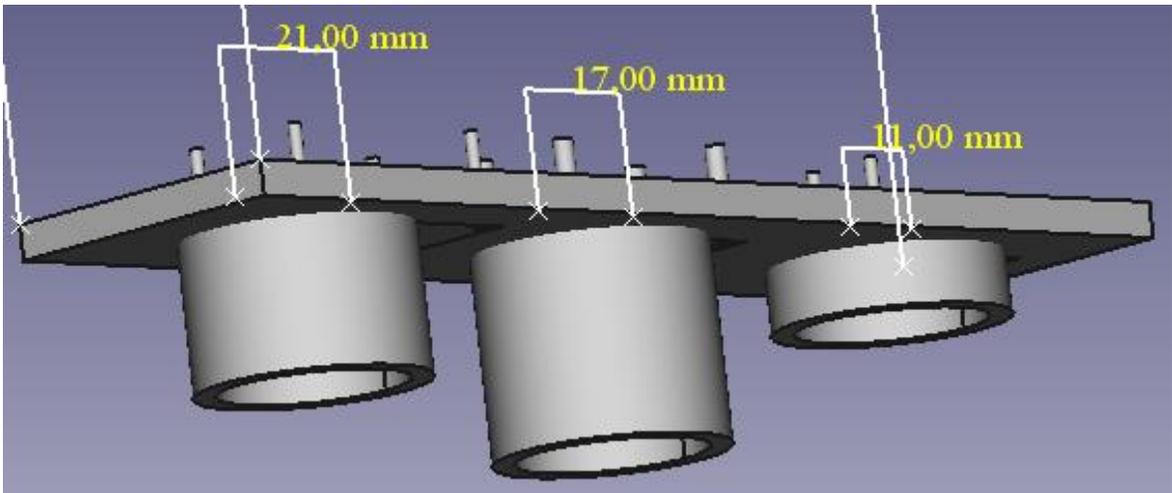
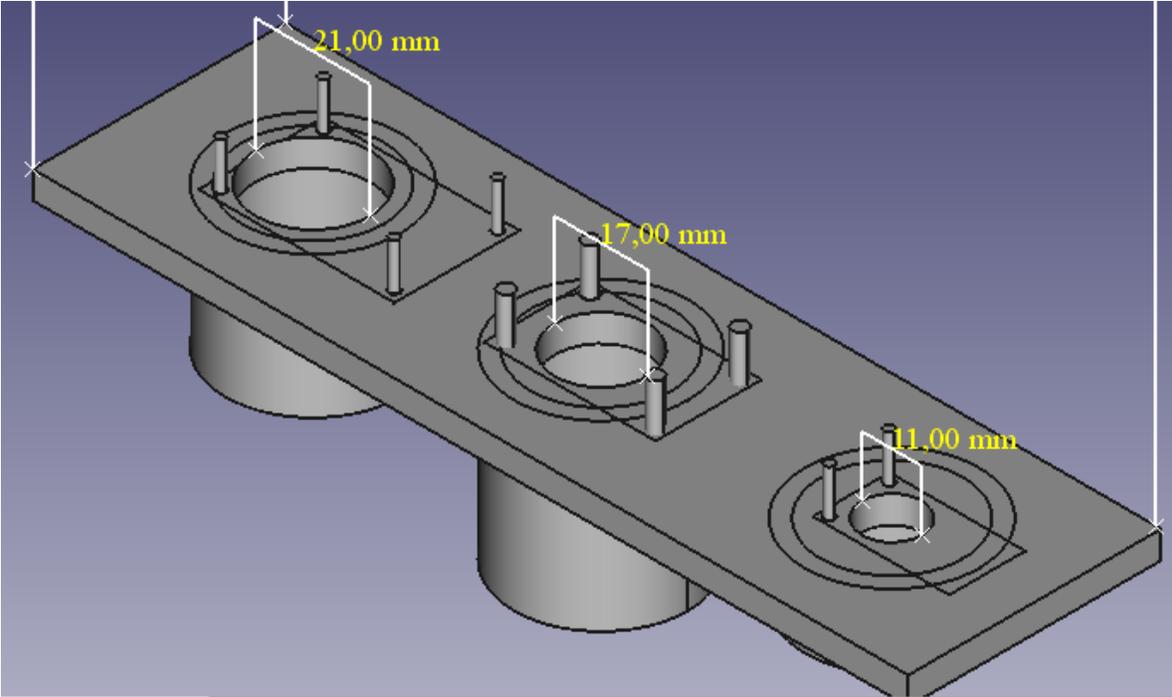
Herramientas

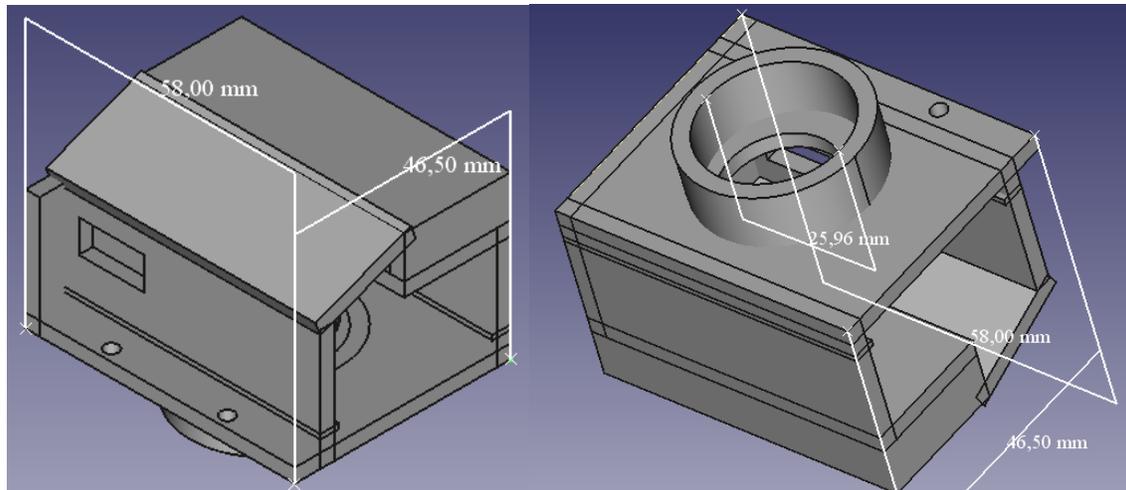
Taladro, brocas de (6mm pared,
2mm y 1mm hierro,
Destornillador estrella y plano
Tornillos, y taco feshesher
4 pernos y 4 tuercas
Cinta doble fase
Rapidografo

Nota. Figura propietaria del autor.

Figura 74.
Diseños en 3D con el software FreeCad para soporte de los sensores

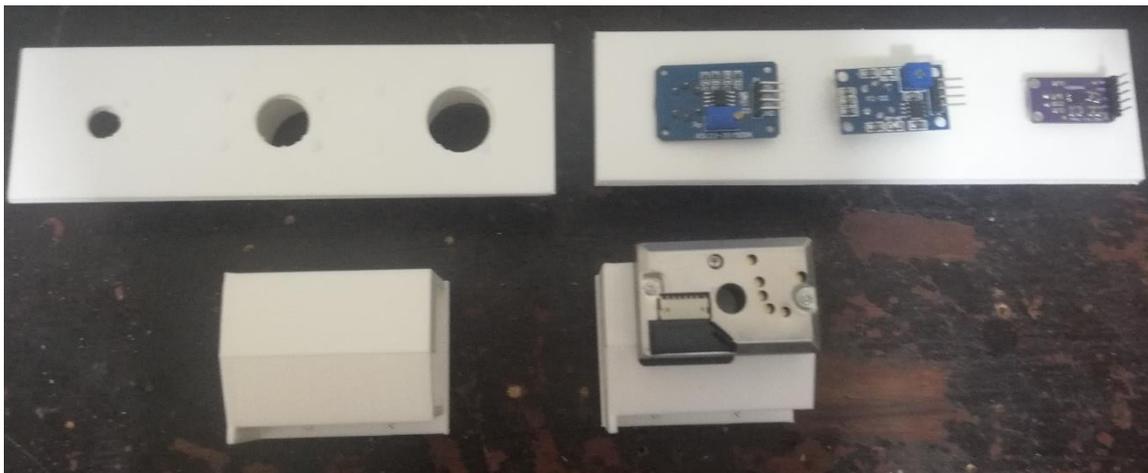






Nota. Diseñados en el software de FreeCad en el cual estos soportes son hechos a la medida para la caja de 20x20x10cm, los mismos albergan los 4 sensores: MQ136, MQ131, MP2.5 GP2Y y el MAX9814, Figura propietaria del autor.

Figura 75.
Impresión de soportes 3D – resultado final

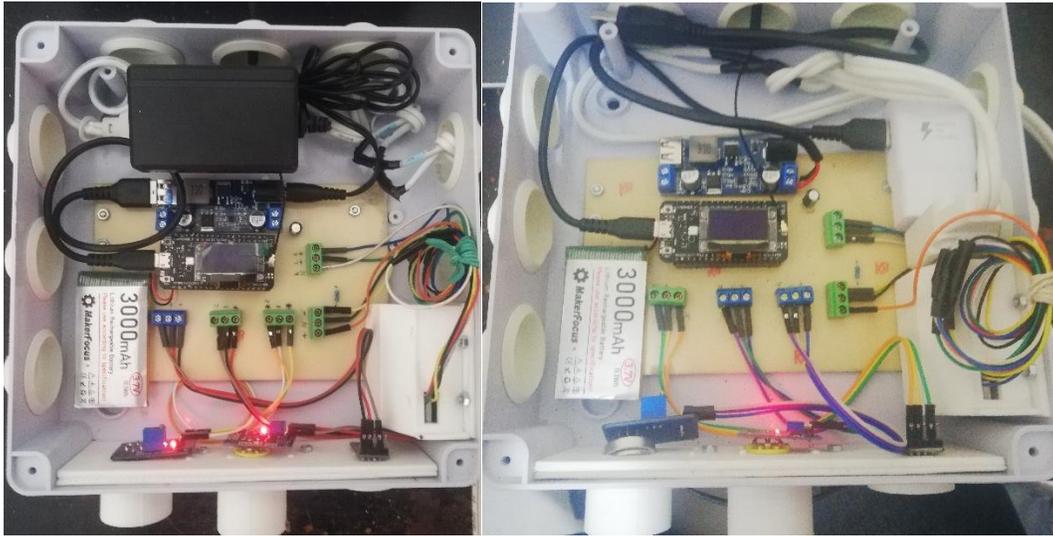


Nota. Figura propietaria del autor.

Resultado final armado del prototipo (Nodo Final)

Con el uso de materiales y herramientas descritas en los apartados anteriores se realiza el debido armado de cada componente, cabe recalcar que la fuente de poder (cargador de 5 – 24V) puede diferir a conveniencia según el coste, teniendo en cuenta las propiedades de corriente que deben ser mayores a los 500mA o 0.5A y un rango de voltajes de 5 – 24V.

Figura 76.
Nodo Final armado

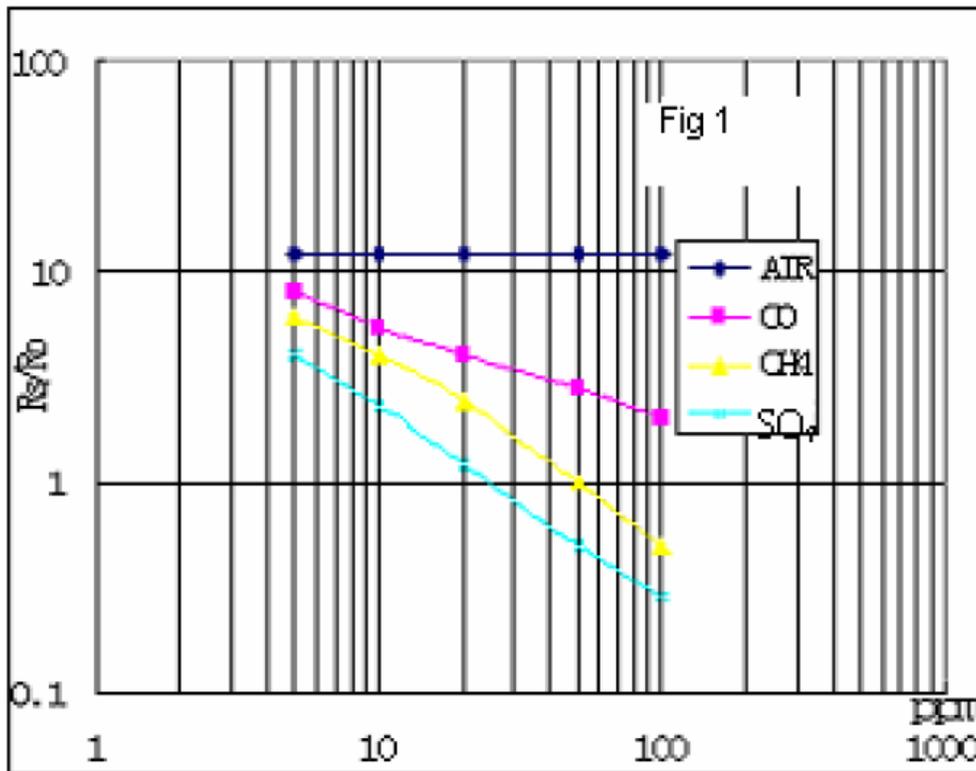


Nota. Nodo final 1 y 2. Las fuentes de poder (cargadores) se consideraron de dos tipos, de 24V a 800mA y de 5V a 800mA Figura propietaria del autor.

Anexo 4. Curvas de calibración

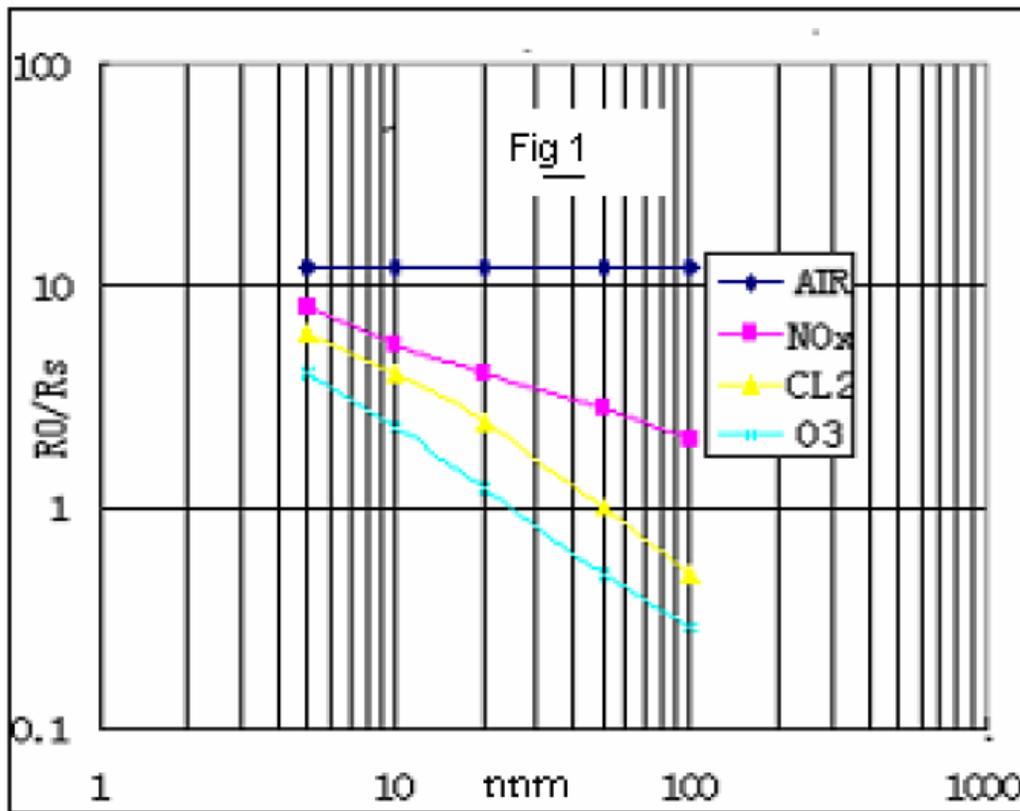
Estos datos los proporciona el fabricante en su hoja de especificaciones de cada sensor de gas, en donde establecen valores en relación a ppm (partes por millón) y RS/RO (ratio – resistencia en función del contaminante medido entre resistencia del sensor en aire limpio), esta relación específica cual es el valor de ppm cada que exista una variable contaminante en el aire, esta es comparada con la constante en aire limpio RO.

Figura 77.
Curva de calibración sensor MQ136



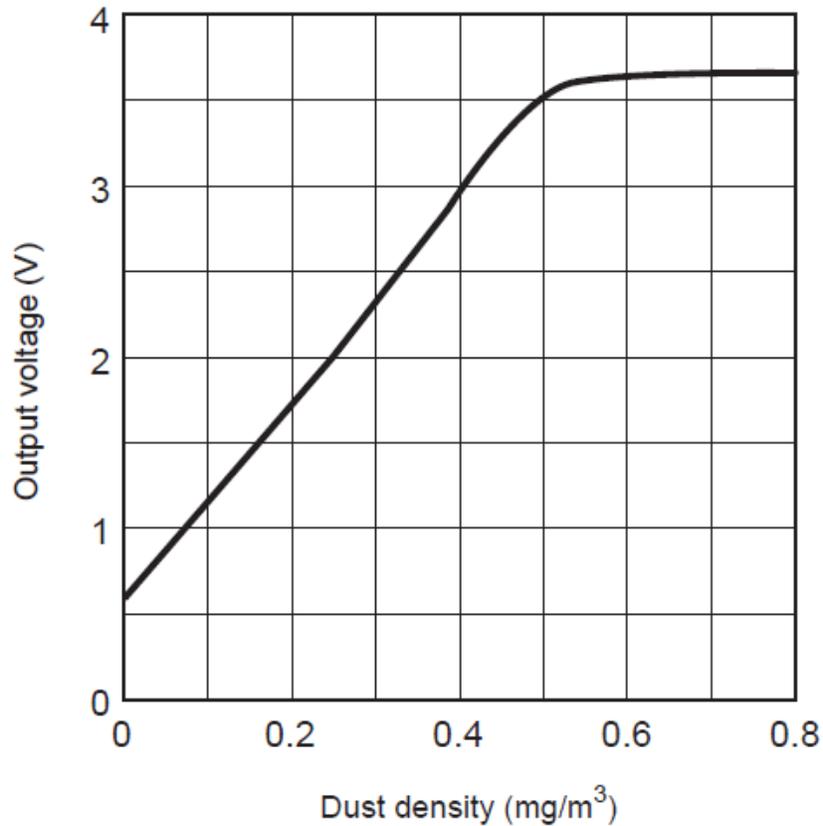
Nota. La figura muestra curvas de calibración concernientes al CO y SO₂, con las cuales serían de interés para este proyecto, la cual hace relación a R₀ (resistencia en aire limpio) y R_s (resistencia según la variación de voltaje entregado por el sensor) para las partes por millón (ppm) encontradas en el entorno (tomada de bit.ly/3MVdfzI) (China-total, 2022).

Figura 78.
Curva de calibración sensor MQ131



Nota La figura muestra curvas de calibración concernientes al O₃ y NO₂, con las cuales serían de interés para este proyecto, la cual hace relación a R₀ (resistencia en aire limpio) y R_s (resistencia según la variación de voltaje entregado por el sensor) para las partes por millón (ppm) encontradas en el entorno (tomada de bit.ly/3IVP4Qm) (Huawei Electronics, 2022).

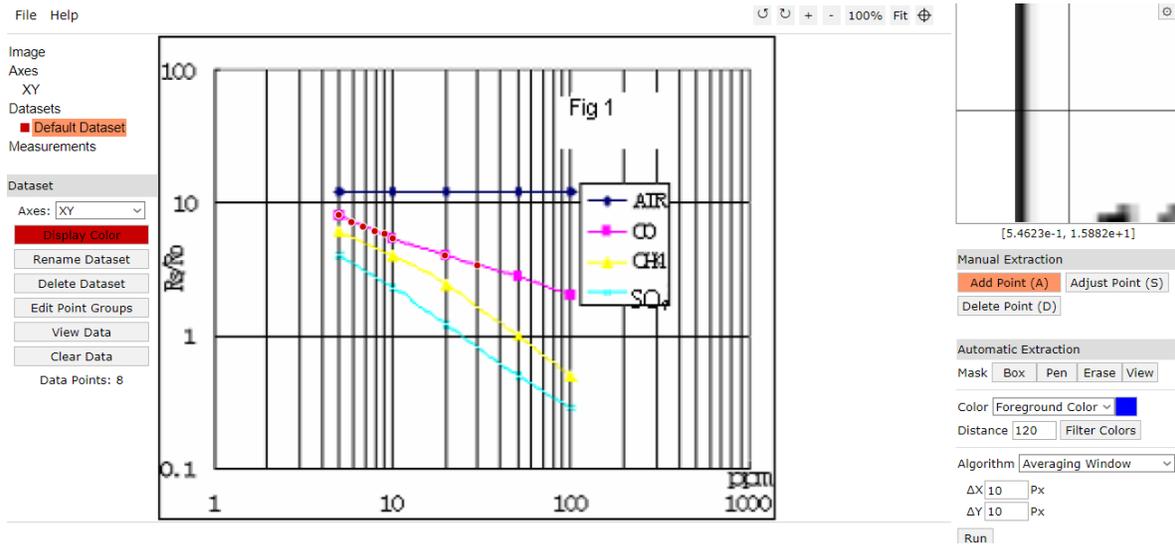
Figura 79.
Curva de calibración sensor GP2Y1010AU0F



Nota. La figura muestra la curva de calibración del material particulado en mg/m³ en relación al voltaje (tomada de bit.ly/45J66ec)(SHARP, 2014).

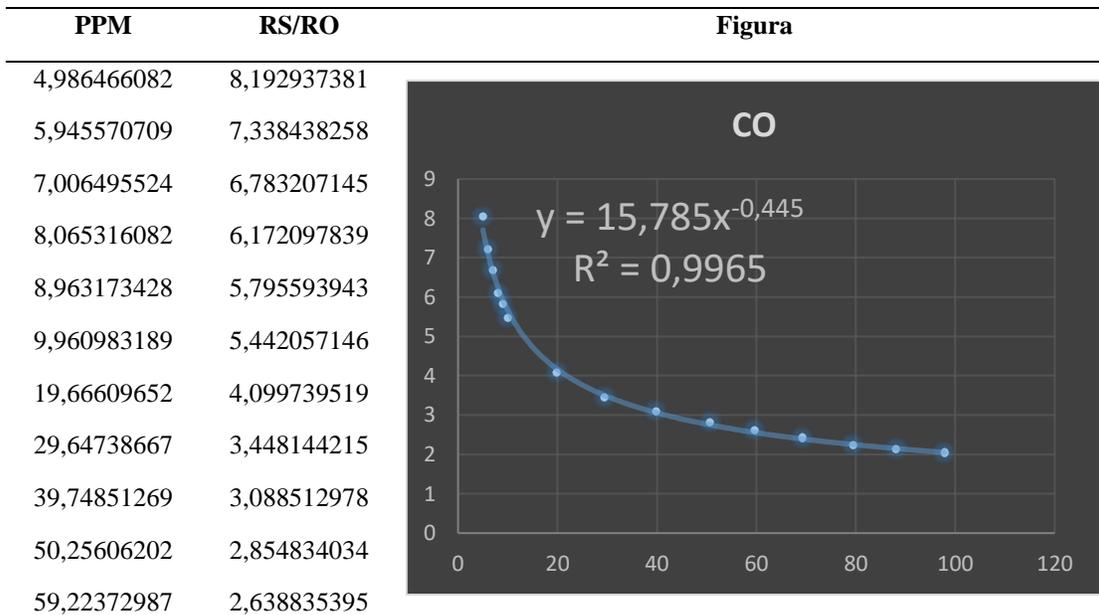
Con la ayuda de una herramienta en línea encontrada en: “apps.automeris.io/wpd/” denominada como WebPlotDigitizer se puede llegar a tener valores aproximados de cada curva. Su proceso es sencillo, se coloca la imagen de la curva, y se va señalando cada intersección logarítmica que se presenta en el paso de la curva, en este caso para el sensor MQ136 las curvas de interés son la del CO y SO₂, para el sensor MQ131 son la del O₃ y del NO₂ y para el sensor GP2Y1010F la del PM.

Figura 80.
Herramienta para la obtención de valores en la curva



Nota. Figura obtenida de la herramienta “apps.automeris.io/wpd/”. Estos valores reflejan el punto máximo y mínimo de la relación RS/RO, del mismo modo establece valores máximo y mínimo en función de las partes por millo (ppm). Los datos son necesarios al momento de conseguir la relación existente entre voltaje y los niveles de contaminantes mediante código expuesto con anterioridad

Tabla 29.
Curva CO (MQ136)



68,97785379	2,477863901
78,47599704	2,290387073
87,21220151	2,184780168
99,22118608	2,051506479

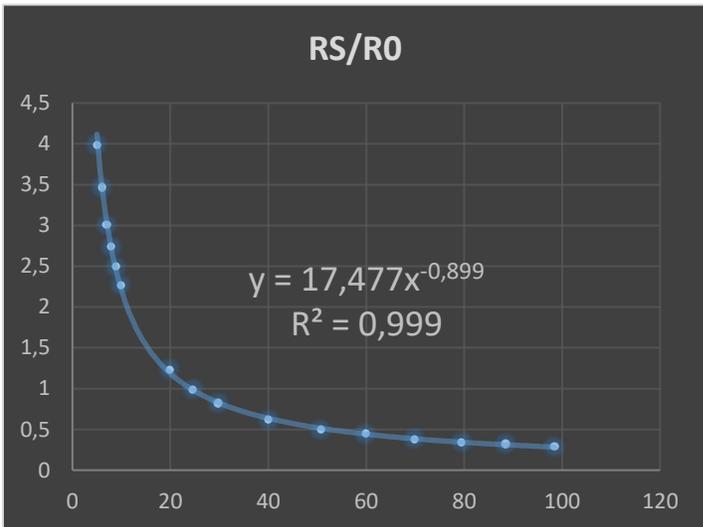
Nota. Tabla propietaria del autor con información concluyente de (China-total, 2022). El sensor logra captar a partir de los 5ppm hasta 100ppm entre más bajo sea este valor de RS/RO mayor es la contaminación debida al monóxido de carbono (CO). Adicional la gráfica muestra dos resultados donde $y = 15.785x^{-0.445}$ ($a = 15.785$ y $b = -0.445$) es la ecuación de comportamiento y $R^2 = 0.9965$ indica el nivel de factibilidad de la ecuación en relación a los datos obtenidos de los datasheets (es más factible entre más se acerca a 1).

Tabla 30.
Curva SO2 (MQ136)

PPM	RS/RO	Figura
4,986466082	4,099739519	
6,015710485	3,558384283	
7,006495524	3,137495731	
7,971279066	2,810264211	
8,963173428	2,557083293	
9,960983189	2,363612673	
19,89809706	1,239921177	
24,28840418	0,994768663	
29,64738667	0,823602279	
39,74851269	0,620455596	
50,25606202	0,505676111	
59,22372987	0,445864334	
68,97785379	0,38698962	
79,40177677	0,346627748	
88,24104207	0,320401662	
99,22118608	0,286984717	

Nota. Tabla propietaria del autor con información concluyente de (China-total, 2022). El sensor logra captar a partir de los 5ppm hasta 100ppm entre más bajo sea este valor de RS/RO mayor es la contaminación debida al dióxido de azufre (SO2). Adicional la gráfica muestra dos resultados donde $y = 18.328x^{-0.909}$ ($a = 18.328$ y $b = -0.909$) es la ecuación de comportamiento y $R^2 = 0.9972$ indica el nivel de factibilidad de la ecuación en relación a los datos obtenidos de los datasheets (es más factible entre más se acerca a 1).

Tabla 31.
Curva O3 (MQ131)

PPM	RS/RO	Figura
4,996088663	3,987312286	
6,037010314	3,462294924	
7,040487629	3,006164643	
8,018803828	2,736145586	
8,919540171	2,490245924	
9,921454441	2,266445468	
19,93689558	1,228912212	
24,66739497	0,986414633	
29,80678044	0,817037849	
40,0626549	0,615925069	
50,75507245	0,494413056	
59,89592279	0,443014317	
69,85187726	0,378645458	
79,55819686	0,339254392	
88,49481144	0,318636806	
98,43525823	0,290000653	

Nota. Tabla propietaria del autor con información concluyente de(Huawei Electronics, 2022). El sensor logra captar a partir de los 5ppm hasta 100ppm entre más bajo sea este valor de RS/RO mayor es la contaminación debida al ozono (O3). Adicional la gráfica muestra dos resultados donde $y = 17.447x^{-0.889}$ ($a = 17.447$ y $b = -0.889$) es la ecuación de comportamiento y $R^2 = 0.999$ indica el nivel de factibilidad de la ecuación en relación a los datos obtenidos de los datasheets (es más factible entre más se acerca a 1).

Tabla 32.
Curva NO2 (MQ131)

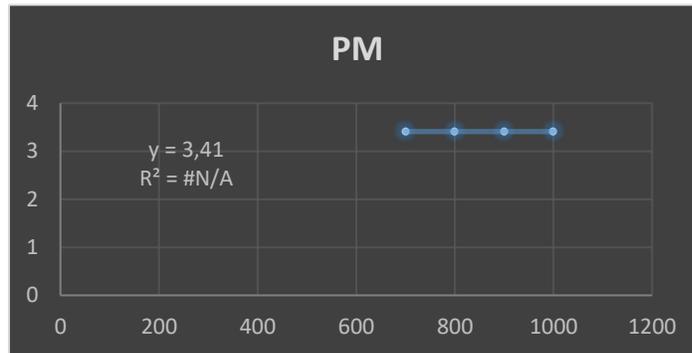
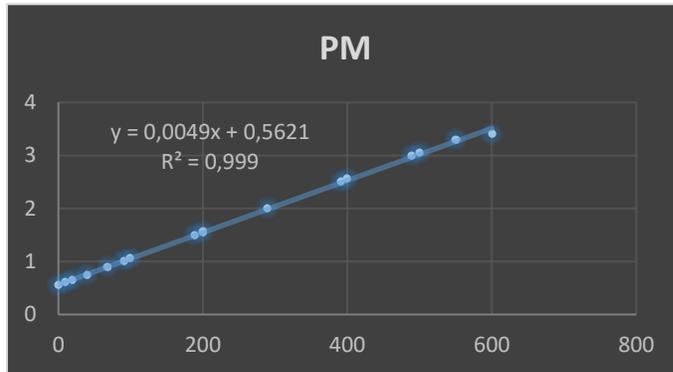
PPM	RS/RO	Figura
5	8,094636205	
6,037010314	7,253515932	
7,040487629	6,707058969	
8,018803828	6,104618999	
8,919540171	5,824554846	
9,921454441	5,470577831	
19,93689558	4,063338908	
29,4562924	3,420569001	
39,59157143	3,065878245	
50,75507245	2,8355158	
59,89592279	2,581033347	
69,85187726	2,424436892	
80,5048264	2,241727079	
88,49481144	2,138824801	
100	2,040701043	

Nota. Tabla propietaria del autor con información concluyente de(Huawei Electronics, 2022). El sensor logra captar a partir de los 5ppm hasta 100ppm entre más bajo sea este valor de RS/RO mayor es la contaminación debida al dióxido de nitrógeno (NO2). Adicional la gráfica muestra dos resultados donde $y = 15.78x^{-0.445}$ ($a = 15.78$ y $b = -.0445$) es la ecuación de comportamiento y $R^2 = 0.9955$ indica el nivel de factibilidad de la ecuación en relación a los datos obtenidos de los datasheets (es más factible entre más se acerca a 1).

Tabla 33.
Curva PM (GP2Y1010F)

PPM	RS/RO	Figura
0	0,55144033	
9,95934959	0,60082305	
19,9186992	0,65020576	
39,8373984	0,74897119	
68,2926829	0,89711934	

91,0569106	1,00411523
99,5934959	1,05349794
189,227642	1,49794239
200,609756	1,55555556
290,243902	2
391,260163	2,50205761
399,796748	2,55144033
489,430894	2,99588477
500,813008	3,05349794
550,609756	3,30041152
600,406504	3,39917695
700	3,41
800	3,41
900	3,41
1000	3,41



Nota. Tabla propietaria del autor con información concluyente de (SHARP, 2014). El sensor logra captar a partir de los 0.0018mg/m³ hasta 0.8mg/m³ entre más alto sea este valor de RS/RO mayor es la contaminación debida al material particulado (PM). Adicional la gráfica muestra dos resultados donde $y = 0.0049x + 0.5621$ ($a = 15.78$ y $b = -.0445$) es la ecuación de comportamiento y $R^2 = 0.999$ indica el nivel de factibilidad de la ecuación en relación a los datos obtenidos de los datasheets (es más factible entre más se acerca a 1). Esta curva de calibración fue dividida en dos ecuaciones para mejorar su comportamiento, en donde al llegar a un nivel superior a los 700ug/m³ su valor es constante en el voltaje.

Anexo 5. Instalación de antena y equipo Mikrotik (Gateway)

Figura 81.

Vista general de la zona de cobertura de la antena



Nota. Figura propietaria del autor, instalación de la antena desde el barrio San José alto en una torre de telecomunicaciones a 6m sobre el nivel del suelo.

Figura 82.

Configuración de IP estática sobre caja de telecomunicaciones



Nota. Figura propietaria del autor, esta caja de telecomunicaciones alberga acometida de energía, router administrable y cables de red, adicional se muestra lugar donde se configura la salida a internet del Gateway y se visualiza una vista de la torre de la antena junto con su zona de cobertura.

Anexo 6. Cálculo de la desviación estándar para el ruido

Tabla 34

Calculo de comportamiento del nodo final vs DT-8852

Tiempo	Ruido DT8822	Ruido Nodo Final	$X_{i1} - X_1$	$X_{i2} - X_2$	$(X_{i1} - X_1)^2$	$(X_{i2} - X_2)^2$
0:00:00	41,4	38,1	-16,1667	-16,1025	261,3611	259,2905
0:00:30	50,8	47,8	-6,7667	-6,4025	45,7878	40,9920
0:01:00	52,6	49,4	-4,9667	-4,8025	24,6678	23,0640
0:01:30	60,3	56,7	2,7333	2,4975	7,4711	6,2375
0:02:00	59,1	55,6	1,5333	1,3975	2,3511	1,9530
0:02:30	51,3	48,2	-6,2667	-6,0025	39,2711	36,0300
0:03:00	60,9	57,2	3,3333	2,9975	11,1111	8,9850
0:03:30	54,2	50,9	-3,3667	-3,3025	11,3344	10,9065
0:04:00	61,2	57,5	3,6333	3,2975	13,2011	10,8735
0:04:30	61,7	58,0	4,1333	3,7975	17,0844	14,4210
0:05:00	54,0	50,8	-3,5667	-3,4025	12,7211	11,5770
0:05:30	83,5	80,2	25,9333	25,9975	672,5378	675,8700
0:06:00	76,8	73,7	19,2333	19,4975	369,9211	380,1525
0:06:30	75,1	72,1	17,5333	17,8975	307,4178	320,3205
0:07:00	60,7	57,1	3,1333	2,8975	9,8178	8,3955
0:07:30	57,4	54,0	-0,1667	-0,2025	0,0278	0,0410
0:08:00	62,6	58,8	5,0333	4,5975	25,3344	21,1370
0:08:30	59,3	55,7	1,7333	1,4975	3,0044	2,2425
0:09:00	64,2	60,3	6,6333	6,0975	44,0011	37,1795
0:09:30	55,3	52,0	-2,2667	-2,2025	5,1378	4,8510
0:10:00	55,4	52,1	-2,1667	-2,1025	4,6944	4,4205
0:10:30	51,6	48,5	-5,9667	-5,7025	35,6011	32,5185
0:11:00	56,9	53,5	-0,6667	-0,7025	0,4444	0,4935
0:11:30	55,3	52,0	-2,2667	-2,2025	5,1378	4,8510
0:12:00	59,6	56,0	2,0333	1,7975	4,1344	3,2310
0:12:30	55,9	52,5	-1,6667	-1,7025	2,7778	2,8985
0:13:00	59,5	55,9	1,9333	1,6975	3,7378	2,8815
0:13:30	50,4	47,4	-7,1667	-6,8025	51,3611	46,2740
0:14:00	39,4	36,2	-18,1667	-18,0025	330,0278	324,0900
0:14:30	70,0	67,2	12,4333	12,9975	154,5878	168,9350
0:15:00	79,1	75,9	21,5333	21,6975	463,6844	470,7815
0:15:30	36,4	33,5	-21,1667	-20,7025	448,0278	428,5935
0:16:00	34,1	31,4	-23,4667	-22,8025	550,6844	519,9540
0:16:30	80,9	77,7	23,3333	23,4975	544,4444	552,1325
0:17:00	77,6	74,5	20,0333	20,2975	401,3344	411,9885
0:17:30	84,9	81,5	27,3333	27,2975	747,1111	745,1535
0:18:00	34,5	31,7	-23,0667	-22,5025	532,0711	506,3625
0:18:30	36,8	33,9	-20,7667	-20,3025	431,2544	412,1915

0:19:00	41,9	38,5	-15,6667	-15,7025	245,4444	246,5685
0:19:30	54,2	50,9	-3,3667	-3,3025	11,3344	10,9065
0:20:00	51,5	48,4	-6,0667	-5,8025	36,8044	33,6690
0:20:30	52,0	48,9	-5,5667	-5,3025	30,9878	28,1165
0:21:00	62,8	59,0	5,2333	4,7975	27,3878	23,0160
0:21:30	58,6	55,1	1,0333	0,8975	1,0678	0,8055
0:22:00	61,8	58,1	4,2333	3,8975	17,9211	15,1905
0:22:30	61,5	57,8	3,9333	3,5975	15,4711	12,9420
0:23:00	52,9	49,7	-4,6667	-4,5025	21,7778	20,2725
0:23:30	60,0	56,4	2,4333	2,1975	5,9211	4,8290
0:24:00	55,1	51,8	-2,4667	-2,4025	6,0844	5,7720
0:24:30	33,1	30,5	-24,4667	-23,7025	598,6178	561,8085
0:25:00	55,9	52,5	-1,6667	-1,7025	2,7778	2,8985
0:25:30	52,1	49,0	-5,4667	-5,2025	29,8844	27,0660
0:26:00	64,1	60,3	6,5333	6,0975	42,6844	37,1795
0:26:30	55,4	52,1	-2,1667	-2,1025	4,6944	4,4205
0:27:00	59,1	55,6	1,5333	1,3975	2,3511	1,9530
0:27:30	50,3	47,3	-7,2667	-6,9025	52,8044	47,6445
0:28:00	52,8	49,6	-4,7667	-4,6025	22,7211	21,1830
0:28:30	55,2	51,9	-2,3667	-2,3025	5,6011	5,3015
0:29:00	61,4	57,7	3,8333	3,4975	14,6944	12,2325
0:29:30	60,9	57,2	3,3333	2,9975	11,1111	8,9850
0:30:00	64,7	60,8	7,1333	6,5975	50,8844	43,5270
0:30:30	51,5	48,4	-6,0667	-5,8025	36,8044	33,6690
0:31:00	78,9	75,7	21,3333	21,4975	455,1111	462,1425
0:31:30	84,4	81,0	26,8333	26,7975	720,0278	718,1060
0:32:00	76,2	73,2	18,6333	18,9975	347,2011	360,9050
0:32:30	40,9	37,6	-16,6667	-16,6025	277,7778	275,6430
0:33:00	40,8	37,5	-16,7667	-16,7025	281,1211	278,9735
0:33:30	44,1	40,6	-13,4667	-13,6025	181,3511	185,0280
0:34:00	75,2	72,2	17,6333	17,9975	310,9344	323,9100
0:34:30	70,0	67,2	12,4333	12,9975	154,5878	168,9350
0:35:00	41,4	38,1	-16,1667	-16,1025	261,3611	259,2905
0:35:30	40,6	37,4	-16,9667	-16,8025	287,8678	282,3240
0:36:00	53,2	50,0	-4,3667	-4,2025	19,0678	17,6610
0:36:30	64,1	60,3	6,5333	6,0975	42,6844	37,1795
0:37:00	53,7	50,5	-3,8667	-3,7025	14,9511	13,7085
0:37:30	55,1	51,8	-2,4667	-2,4025	6,0844	5,7720
0:38:00	59,9	56,3	2,3333	2,0975	5,4444	4,3995
0:38:30	64,3	60,4	6,7333	6,1975	45,3378	38,4090
0:39:00	61,0	57,3	3,4333	3,0975	11,7878	9,5945
0:39:30	53,0	49,8	-4,5667	-4,4025	20,8544	19,3820
0:40:00	62,4	58,7	4,8333	4,4975	23,3611	20,2275

0:40:30	56,3	52,9	-1,2667	-1,3025	1,6044	1,6965
0:41:00	57,4	54,0	-0,1667	-0,2025	0,0278	0,0410
0:41:30	51,2	48,1	-6,3667	-6,1025	40,5344	37,2405
0:42:00	56,6	53,2	-0,9667	-1,0025	0,9344	1,0050
0:42:30	56,5	53,1	-1,0667	-1,1025	1,1378	1,2155
0:43:00	64,9	61,0	7,3333	6,7975	53,7778	46,2060
0:43:30	61,9	58,2	4,3333	3,9975	18,7778	15,9800
0:44:00	64,6	60,7	7,0333	6,4975	49,4678	42,2175
0:44:30	60,5	56,9	2,9333	2,6975	8,6044	7,2765
0:45:00	51,6	48,5	-5,9667	-5,7025	35,6011	32,5185
0:45:30	58,9	55,4	1,3333	1,1975	1,7778	1,4340
0:46:00	60,1	56,5	2,5333	2,2975	6,4178	5,2785
0:46:30	53,2	50,0	-4,3667	-4,2025	19,0678	17,6610
0:47:00	54,5	51,2	-3,0667	-3,0025	9,4044	9,0150
0:47:30	62,4	58,7	4,8333	4,4975	23,3611	20,2275
0:48:00	58,9	55,4	1,3333	1,1975	1,7778	1,4340
0:48:30	77,6	74,5	20,0333	20,2975	401,3344	411,9885
0:49:00	83,9	80,5	26,3333	26,2975	693,4444	691,5585
0:49:30	41,5	38,2	-16,0667	-16,0025	258,1378	256,0800
0:50:00	41,8	38,5	-15,7667	-15,7025	248,5878	246,5685
0:50:30	38,9	35,8	-18,6667	-18,4025	348,4444	338,6520
0:51:00	63,6	59,8	6,0333	5,5975	36,4011	31,3320
0:51:30	57,2	53,8	-0,3667	-0,4025	0,1344	0,1620
0:52:00	53,7	50,5	-3,8667	-3,7025	14,9511	13,7085
0:52:30	51,6	48,5	-5,9667	-5,7025	35,6011	32,5185
0:53:00	59,4	55,8	1,8333	1,5975	3,3611	2,5520
0:53:30	61,7	58,0	4,1333	3,7975	17,0844	14,4210
0:54:00	58,2	54,7	0,6333	0,4975	0,4011	0,2475
0:54:30	57,7	54,2	0,1333	-0,0025	0,0178	0,0000
0:55:00	58,0	54,5	0,4333	0,2975	0,1878	0,0885
0:55:30	52,0	48,9	-5,5667	-5,3025	30,9878	28,1165
0:56:00	54,4	51,1	-3,1667	-3,1025	10,0278	9,6255
0:56:30	63,2	59,4	5,6333	5,1975	31,7344	27,0140
0:57:00	60,7	57,1	3,1333	2,8975	9,8178	8,3955
0:57:30	53,1	49,9	-4,4667	-4,3025	19,9511	18,5115
0:58:00	60,9	57,2	3,3333	2,9975	11,1111	8,9850
0:58:30	51,3	48,2	-6,2667	-6,0025	39,2711	36,0300
0:59:00	55,0	51,7	-2,5667	-2,5025	6,5878	6,2625
0:59:30	54,4	51,1	-3,1667	-3,1025	10,0278	9,6255

Nota. Tabla propietaria del autor.

Anexo 7. Cálculo de la desviación estándar para el monóxido de carbono (CO)

Tabla 35

Calculo de comportamiento del nodo final vs AS8700A

Tiempo	PPM	PPM nodo final	$X_{i1} - X_1$	$X_{i2} - X_2$	$(X_{i1} - X_1)^2$	$(X_{i2} - X_2)^2$
0:00:00	0	6	-22,6	-15,3	510,0	234,3
0:00:30	16	18	-6,6	-3,3	43,3	10,9
0:01:00	17	19	-5,6	-2,3	31,2	5,3
0:01:30	0	6	-22,6	-15,3	510,0	234,3
0:02:00	44	43	21,4	21,7	458,7	470,5
0:02:30	26	27	3,4	5,7	11,7	32,4
0:03:00	0	2	-22,6	-19,3	510,0	372,8
0:03:30	0	4	-22,6	-17,3	510,0	299,6
0:04:00	28	28	5,4	6,7	29,3	44,8
0:04:30	28	28	5,4	6,7	29,3	44,8
0:05:00	23	23	0,4	1,7	0,2	2,9
0:05:30	13	15	-9,6	-6,3	91,8	39,8
0:06:00	1	9	-21,6	-12,3	465,8	151,5
0:06:30	14	16	-8,6	-5,3	73,7	28,2
0:07:00	15	17	-7,6	-4,3	57,5	18,6
0:07:30	92	52	69,4	30,7	4818,7	942,0
0:08:00	37	36	14,4	14,7	207,8	215,8
0:08:30	1	6	-21,6	-15,3	465,8	234,3
0:09:00	1	11	-21,6	-10,3	465,8	106,3
0:09:30	15	17	-7,6	-4,3	57,5	18,6
0:10:00	113	64	90,4	42,7	8175,2	1822,6
0:10:30	0	2	-22,6	-19,3	510,0	372,8
0:11:00	21	21	-1,6	-0,3	2,5	0,1
0:11:30	0	4	-22,6	-17,3	510,0	299,6
0:12:00	0	0	-22,6	-21,3	510,0	454,0
0:12:30	45	44	22,4	22,7	502,5	514,9
0:13:00	0	3	-22,6	-18,3	510,0	335,2
0:13:30	122	77	99,4	55,7	9883,7	3101,6
0:14:00	0	4	-22,6	-17,3	510,0	299,6
0:14:30	125	76	102,4	54,7	10489,2	2991,2
0:15:00	123	70	100,4	48,7	10083,5	2370,9
0:15:30	28	29	5,4	7,7	29,3	59,2
0:16:00	0	3	-22,6	-18,3	510,0	335,2
0:16:30	41	40	18,4	18,7	339,2	349,4
0:17:00	27	27	4,4	5,7	19,5	32,4
0:17:30	25	25	2,4	3,7	5,8	13,6
0:18:00	23	24	0,4	2,7	0,2	7,2
0:18:30	16	18	-6,6	-3,3	43,3	10,9

0:19:00	0	1	-22,6	-20,3	510,0	412,4
0:19:30	17	19	-5,6	-2,3	31,2	5,3
0:20:00	1	10	-21,6	-11,3	465,8	127,9
0:20:30	0	3	-22,6	-18,3	510,0	335,2
0:21:00	1	12	-21,6	-9,3	465,8	86,6
0:21:30	1	11	-21,6	-10,3	465,8	106,3
0:22:00	14	15	-8,6	-6,3	73,7	39,8
0:22:30	17	19	-5,6	-2,3	31,2	5,3
0:23:00	46	45	23,4	23,7	548,3	561,3
0:23:30	44	43	21,4	21,7	458,7	470,5
0:24:00	24	24	1,4	2,7	2,0	7,2
0:24:30	37	36	14,4	14,7	207,8	215,8
0:25:00	33	32	10,4	10,7	108,5	114,3
0:25:30	76	49	53,4	27,7	2853,3	766,8
0:26:00	16	18	-6,6	-3,3	43,3	10,9
0:26:30	43	42	20,4	20,7	416,8	428,1
0:27:00	44	43	21,4	21,7	458,7	470,5
0:27:30	1	9	-21,6	-12,3	465,8	151,5
0:28:00	37	36	14,4	14,7	207,8	215,8
0:28:30	0	3	-22,6	-18,3	510,0	335,2
0:29:00	15	17	-7,6	-4,3	57,5	18,6
0:29:30	1	12	-21,6	-9,3	465,8	86,6
0:30:00	16	18	-6,6	-3,3	43,3	10,9
0:30:30	25	26	2,4	4,7	5,8	22,0
0:31:00	15	17	-7,6	-4,3	57,5	18,6
0:31:30	14	16	-8,6	-5,3	73,7	28,2
0:32:00	22	23	-0,6	1,7	0,3	2,9
0:32:30	38	37	15,4	15,7	237,7	246,2
0:33:00	21	22	-1,6	0,7	2,5	0,5
0:33:30	23	23	0,4	1,7	0,2	2,9
0:34:00	0	4	-22,6	-17,3	510,0	299,6
0:34:30	15	16	-7,6	-5,3	57,5	28,2
0:35:00	0	5	-22,6	-16,3	510,0	266,0
0:35:30	1	11	-21,6	-10,3	465,8	106,3
0:36:00	1	6	-21,6	-15,3	465,8	234,3
0:36:30	1	8	-21,6	-13,3	465,8	177,1
0:37:00	26	26	3,4	4,7	11,7	22,0
0:37:30	81	49	58,4	27,7	3412,5	766,8
0:38:00	89	55	66,4	33,7	4411,2	1135,1
0:38:30	16	17	-6,6	-4,3	43,3	18,6
0:39:00	137	74	114,4	52,7	13091,2	2776,4
0:39:30	17	19	-5,6	-2,3	31,2	5,3
0:40:00	25	25	2,4	3,7	5,8	13,6

0:40:30	32	32	9,4	10,7	88,7	114,3
0:41:00	14	16	-8,6	-5,3	73,7	28,2
0:41:30	1	10	-21,6	-11,3	465,8	127,9
0:42:00	27	28	4,4	6,7	19,5	44,8
0:42:30	16	18	-6,6	-3,3	43,3	10,9
0:43:00	14	16	-8,6	-5,3	73,7	28,2
0:43:30	43	42	20,4	20,7	416,8	428,1
0:44:00	28	29	5,4	7,7	29,3	59,2
0:44:30	0	0	-22,6	-21,3	510,0	454,0
0:45:00	17	19	-5,6	-2,3	31,2	5,3
0:45:30	25	26	2,4	4,7	5,8	22,0
0:46:00	17	19	-5,6	-2,3	31,2	5,3
0:46:30	1	7	-21,6	-14,3	465,8	204,7
0:47:00	0	8	-22,6	-13,3	510,0	177,1
0:47:30	0	4	-22,6	-17,3	510,0	299,6
0:48:00	128	77	105,4	55,7	11112,7	3101,6
0:48:30	1	10	-21,6	-11,3	465,8	127,9
0:49:00	0	4	-22,6	-17,3	510,0	299,6
0:49:30	18	20	-4,6	-1,3	21,0	1,7
0:50:00	25	26	2,4	4,7	5,8	22,0
0:50:30	1	8	-21,6	-13,3	465,8	177,1
0:51:00	0	2	-22,6	-19,3	510,0	372,8
0:51:30	15	17	-7,6	-4,3	57,5	18,6
0:52:00	14	16	-8,6	-5,3	73,7	28,2
0:52:30	40	39	17,4	17,7	303,3	313,0
0:53:00	1	10	-21,6	-11,3	465,8	127,9
0:53:30	1	9	-21,6	-12,3	465,8	151,5
0:54:00	1	6	-21,6	-15,3	465,8	234,3
0:54:30	0	1	-22,6	-20,3	510,0	412,4
0:55:00	15	17	-7,6	-4,3	57,5	18,6
0:55:30	14	15	-8,6	-6,3	73,7	39,8
0:56:00	17	19	-5,6	-2,3	31,2	5,3
0:56:30	1	9	-21,6	-12,3	465,8	151,5
0:57:00	34	33	11,4	11,7	130,3	136,7
0:57:30	18	20	-4,6	-1,3	21,0	1,7
0:58:00	0	6	-22,6	-15,3	510,0	234,3
0:58:30	0	3	-22,6	-18,3	510,0	335,2
0:59:00	0	1	-22,6	-20,3	510,0	412,4
0:59:30	0	5	-22,6	-16,3	510,0	266,0

Nota. Tabla propietaria del autor.

Anexo 8. Ficha técnica Sonómetro DT-8852

FICHA TÉCNICA

SONOMETRO DE RUIDO CEM DT-8852



GRUPO C&M

El medidor de ruido profesional de alta precisión DT - 8852 CLASS2 IEC61672-1 tiene un amplio rango dinámico. Aplicable al monitoreo de ruido ambiental, gestión de calidad empresarial, monitoreo de ruido de empresas industriales y mineras, protección de la salud en el hogar y otros campos.

DATO GENERAL.

- Marca: CEM
- Modelo: DT-8852
- Cod. Int: 17100

CARACTERÍSTICAS:

- Esta unidad confirma al IEC61672-1 clase 2 para medidores de nivel de sonido
- Medidas MAX y MIN.
- Pantalla de sobre rango.
- Pantalla de bajo rango.
- Ponderación A y C.
- Respuesta rápida y lenta.
- Salidas analógicas AC / DC para conexión a frecuencia.
- Analizador o grabador de eje X-Y.
- Función de registrador de datos
- Niveles de alarma ajustables.
- Memoria para 32700 lecturas.
- Duración de baterías 30 horas.

ESPECIFICACIONES:

- Rangos de nivel
Lo: 30dB ~ 80dB Med: 50dB ~ 100dB
Hi: 80dB ~ 130dB Automático: 30dB ~ 130dB
- Precisión: ± 1.4 dB
- Resolución: 0.1dB
- Rango de frecuencia: 31.5HZ ~ 8KHZ
- Rango dinámico: 50dB
- Tiempo ponderado: FAST (125mS), SLOW (1s)
- Micrófono: micrófono de condensador electret de 1/2 pulgadas
- Actualización de pantalla: 2 veces / seg.
- Salida analógica: salidas AC / DC, AC = 1Vrms, DC = 10mV / dB
- Fuente de alimentación: batería de 9 V, 006P o NEDA1604 o IEC
- Apagado automático, se apaga después de aprox. 15 minutos de inactividad.
- Temp. y humedad de operación: 0 ° C ~ 40 ° C, 10% RH ~ 90% RH
- Temp. y humedad de almacenamiento: -10 ° C ~ + 60 ° C, 10% HR ~ 75% HR



PESO Y TAMAÑO

- Dimensión :278 x 76 x 50 mm
- Peso: 350 g

CONTENIDOS DEL PAQUETE

- Manual de instrucciones castellano
- Manual de instrucciones en chino.
- Fuente de alimentación 9v externa.
- Destornillador para calibración.
- Parabrisas.
- Trípode
- Software Driver.
- Cable USB.

Nota. Ficha técnica obtenida de (Grupo CYM, 2024).

Anexo 9. Ficha técnica detector de monóxido de carbono AS8700A



Model: AS8700A

Carbon Monoxide Meter Instruction Manual



version: 02

1. Introduction:

The Carbon Monoxide Meter detects the percentage of carbon monoxide (CO) and measures concentration from 1 to 1000 parts per million (PPM). This meter indicates the percentage of carbon monoxide in two ways:
 a. PPM reading on the LCD display.
 b. Beeper tone.

2. Safety information:

Do not use the meter as a personal safety monitor. Learn and recognize the effects of CO poisoning:

0-1 PPM	Normal background level
9 PPM	ASHRAE Standard 62-1989 for living areas
50 PPM	OSHA enclosed space 8 hours average level
100 PPM	OSHA exposure limit
200 PPM	Mild headache, fatigue, nausea and dizziness
800 PPM	Dizziness, nausea and convulsions. Death within 2 to 3 hours

U.S. Department of Labor, Occupational Safety & Health Administration (OSHA) Regulation 1917.24 states: The CO concentration in any enclosed space shall be maintained at not more than 50 PPM (0.005%). Remove employees from enclosed space if the CO concentration exceeds 100 PPM (0.01%).

3. What the meter does:

The meter indicates the CO level by LCD display and beeper tone.

The beeper indicates when CO level is above setting level (default 100ppm).

4. Specifications:

Operating temperature	0°C ~ +50°C
Storing temperature	-30°C ~ +60°C
Operating humidity	0%RH~99%RH (non-condensing)
Measurement range	0 ~ 1000PPM
Resolution	1PPM
Accuracy	±10%
Response Time	<60 Seconds
Power supply	3*AAA batteries
Auto power shut off	Meter auto shutdown after 10 minutes without operation
Sensor type	Stabilized electrochemical Gas-specific (CO)
Typical sensor life	3 years

5. Diagram:

- ① LCD display
- ② ON/OFF button
- ③ °C/°F switch button
- ④ Backlight button
- ⑤ Mode button
- ⑥ Battery door



6. Turn on/off

6.1 Press the on/off button to turn on or off this meter. Press on/off button in calibration mode would go back to detect mode.

6.2 Modes Introduction

The meter would get into detect mode when turn on, the CO level would be showing as the scanner mode. There is 4 modes in detect mode (Scan, Max, Min and Hold), press the mode button to switch into different mode

- Hold: Keep showing the same level when switch to this mode
- Max: Keep scanning and showing the maximum level
- Min: Keep scanning and showing the minimum level
- Scan: Keep scanning and showing the current level

6.3 Backlight button

Press the backlight button would turn on the backlight, the icon would show at the same time; Press again to turn off.

6.4 Temperature unit switch

In detect mode, press the °C/°F button to switch the temperature unit.

6.5 Enable/disable auto power off setup

Press and hold the °C/°F button to get into auto power off setting; Monitor would show ON (Enable) or OFF (Disable) as the function is on or off. Press the °C/°F button to switch, press and hold °C/°F button to return.

6.6 Indication level setup

Press and hold the mode button in detect mode to get into indication level setup; Press the °C/°F button to switch between digits, press the backlight button to change the number. Press and hold the mode button to return.

7. Battery replacement:

7.1 When the battery power is not sufficient, the indicator will appear on the LCD display. Please replace new 3x1.5v AAA battery.

7.2 If the unit will not being use for a long time, please remove the battery to prevent the damage result form a battery leak.

8. Notes:

- 8.1 Common sources of CO:
 Poorly maintained fossil fuelled boilers, heaters or fireplaces.
 Dirty or blocked chimneys and flue exhausts.
 Poorly maintained gas, oil, or kerosene appliances. Internal combustion engines (e.g. Vehicles, lawnmowers, blowers).
- 8.2 Co and appliance Malfunctions:
 The following table identifies typical problems that can produce high level of carbon monoxide.

Specific Declarations

- a. We reserve the rights of the update and amendment of the product design and the manual which are subject to change without further notification.
- b. Dispose of battery should in accordance with local laws and regulations.

Appliance	Fuel	Typical problem
Gas furnaces (Room heaters)	Oil, natural gas, or LPG (liquefied petroleum gas)	1. Cracked heat exchanger 2. Not enough air to burn fuel properly 3. Defective / blocked flue 4. Maladjusted burner 5. Building not properly pressurized
Central heating furnaces	Coal or Kerosene	1. Cracked heat exchanger 2. Not enough air to burn fuel properly 3. Defective grate
Room heaters Centra heaters	Kerosene	1. Improper adjustment 2. Wrong fuel (not K-1) 3. Wrong wick or wick height 4. Not enough air to burn fuel 5. System not properly vented
Water heaters	Natural gas or LPG	1. Not enough air to burn fuel properly 2. Defective / blocked flue 3. Maladjusted burner 4. Building not properly pressurized
Ranges Ovens	Natural gas or LPG	1. Not enough air to burn fuel 2. Maladjusted burner 3. Misuse as a room heater 4. System not properly vented
Stoves Fireplaces	Gas, wood, coal	1. Not enough air to burn fuel properly 2. Defective / blocked flue 3. Green or treated wood 4. Cracked heat exchanger 5. Cracked firebox

version: 6-S8700A-0016-04



Nota. Ficha técnica obtenida de (Hammer Electronik, 2024).

Anexo 10. Certificado de traducción del resumen



Loja, 08 de enero de 2024

Lic. Karina Yajaira Martínez Luzuriaga

LICENCIADA EN CIENCIAS DE LA EDUCACIÓN MENCIÓN INGLÉS

CERTIFICO:

Yo, Karina Yajaira Martínez Luzuriaga con cédula de identidad Nro. 1104902679, Licenciada en Ciencias de la Educación Mención Inglés por la Universidad Técnica Particular de Loja, con número de registro 1031-2022-2574017 en la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación, señalo que el presente documento es fiel traducción del idioma español al idioma inglés del resumen del Trabajo de Titulación denominado "Implementación de una red de sensores para la medición de la calidad de aire y niveles de ruido en entornos abiertos de la ciudad de Loja." elaborado por el Sr. Milto Ronaldo Obaco Medina, con cédula de identidad Nro. 1900819929, estudiante egresado de la carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad Nacional de Loja.



Lic. Karina Yajaira Martínez Luzuriaga

C.I. 1104902679

REGISTRO SENESCYT N°: 1031-2022-2574017