



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA:

“SISTEMA IoT PARA MEDICIÓN DE CO_2 EN ÁREAS URBANAS”

Trabajo de titulación previo a la obtención del título en ingeniero en
Mecatrónica

Línea de investigación: Producción industrial y tecnología sostenible.

AUTOR:

Sonia Johana Antamba Churuchumbi

DIRECTOR:

Ing. Carlos Xavier Rosero Chandi PhD.

Ibarra – Ecuador 2025



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1003798780		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Antamba Churuchumbi Sonia Johana		
DIRECCIÓN:	Vía Zuleta - Comunidad el Chilco		
EMAIL:	sjantambac@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:		TELÉFONO MÓVIL:	0986605485

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	SISTEMA IoT PARA MEDICIÓN DE CO_2 EN ÁREAS URBANAS
AUTOR (ES):	Antamba Churuchumbi Sonia Johana
FECHA: DD/MM/AAAA	25/07/2025
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	☒ PREGRADO ☐ POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	INGENIERO EN MECATRÓNICA
ASESOR /DIRECTOR:	MSc. Cosme Damian Mejía Echeverría Ing. Carlos Xavier Rosero Chandi PhD.

2. CONSTANCIAS

El autor (es) manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 25 días del mes de julio de 2025

EL AUTOR:

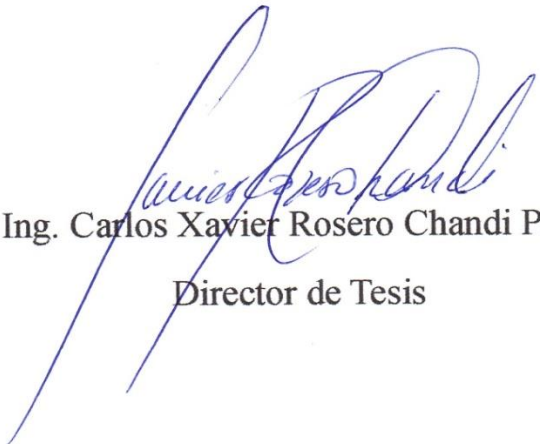
Sonia Johana Antamba Churuchumbi



Universidad Técnica del Norte
Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas
Certificación del director del trabajo de grado

En mi calidad de director del trabajo de grado “SISTEMA IoT PARA MEDICIÓN DE CO_2 EN ÁREAS URBANAS”, presentado por el egresado Sonia Johana Antamba Churuchumbi, que opta por el título de ingeniero en Mecatrónica, certifico que el mencionado proyecto fue realizado bajo mi dirección.

Ibarra, 25 de julio de 2025

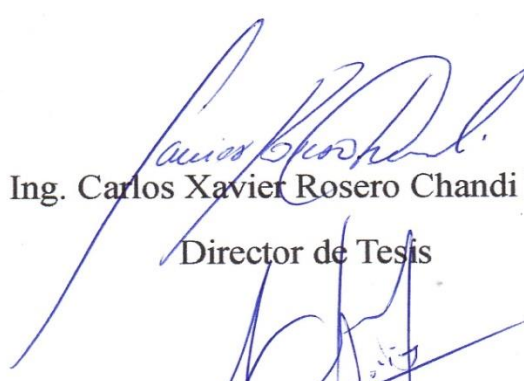

Ing. Carlos Xavier Rosero Chandi PhD.

Director de Tesis



Universidad Técnica del Norte
Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas
Certificación del director del trabajo de grado

El Tribunal Examinador del trabajo “SISTEMA IoT PARA MEDICIÓN DE CO_2 EN ÁREAS URBANAS”. Elaborado por “Sonia Johana Antamba Churuchumbi”, previo a la obtención del título de Ingeniero en Mecatrónica, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:


Ing. Carlos Xavier Rosero Chandi PhD.

Director de Tesis


MSc. Cosme Damian Mejia Echeverria.

Asesor de Tesis

Dedicatorias

A quienes creyeron en mí, este logro es suyo, dedico este trabajo a:

A mis padres María Churuchumbi y Luis Antamba quienes sacrificaron muchas cosas por ver cristalizar este sueño.

A mi hermana Ibeth Antamba por llenarme de fe cuando ya la tenía perdida.

A mis dos hermanas pequeñas, Narcisa y Sarita, quienes con su compañía y amor alegran mi vida.

Sonia

Agradecimientos

El éxito individual es, en realidad, un mosaico de contribuciones ajenas.

Primero, quiero agradecer a Dios por brindarme sabiduría y fortaleza, incluso en los momentos más difíciles, permitiéndome salir victoriosa ante cada desafío.

A mis padres, María y Luis, quienes con amor y sacrificio renunciaron a muchos de sus sueños para ver cumplidos los míos, sin importar las dificultades del camino.

A mis hermanas, Ibeth, Narcisa y Sarita, por ser mi apoyo incondicional a lo largo de toda mi carrera, sosteniéndome cuando más lo necesitaba.

Al Ingeniero Xavier Rosero, mi tutor de trabajo de grado, por su invaluable paciencia y vasto conocimiento, pilares fundamentales en la elaboración de este proyecto académico.

A mis amigos Edwin A., Alejandro Ch., Gabriel V. y Everson V., quienes creyeron en mí incluso antes de que yo misma lo hiciera.

Finalmente, a todas las personas que de una u otra forma fueron parte de mi camino en la universidad, gracias por su apoyo y compañía en esta etapa tan significativa de mi vida.

Sonia

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del Problema	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo General	2
1.2.2. Objetivos Específicos	2
1.3. Justificación	3
1.4. Alcance	3
2. Revisión Bibliográfica	4
2.1. Antecedentes	4
2.2. Dióxido de Carbono	6
2.2.1. Fuentes de Emisión de Dióxido de Carbono	6
2.3. Impacto del Dióxido de Carbono en la Salud Humana	8
2.4. Medición de Dióxido de Carbono en Áreas Urbanas	8
2.4.1. Tecnologías para la Medición de Dióxido de Carbono	9
2.4.2. Sensores Infrarrojos No Dispersivos (NDIR)	9
2.4.3. Sensores Semiconductores de Óxido Metálico (MOS)	9
2.4.4. Sensores Electroquímicos	10
2.4.5. Comparación entre las Tecnologías de Medición de Dióxido de Carbono	11
2.4.6. Valores Referenciales de Concentración de CO ₂ para Lugares Exteriores	11
2.5. Redes de Comunicación	12
2.5.1. Redes de Corto Alcance	12

2.5.2.	Redes de Largo Alcance	12
2.5.2.1.	LoRa	13
2.5.2.2.	LoRaWAN	13
2.5.2.3.	Arquitectura LoRAWAN	13
2.5.2.4.	Dispositivos LoRaWAN	14
2.5.2.5.	The Things Network (TTN)	15
2.5.2.6.	The Things Stack	16
3.	Metodología	18
3.1.	Enfoque Metodológico	18
3.2.	Diseño de la Investigación	19
3.3.	Requerimientos del Sistema IoT a Diseñar	19
3.4.	Esquema General del Sistema de Medición de Dióxido de Carbono	19
3.5.	Descripción del Sistema IoT para la Medición de Dióxido de Carbono	20
3.6.	Especificaciones Técnicas de los Componentes del Sistema de Medición de Dióxido de Carbono	20
3.6.1.	Sensor MH-Z19C	21
3.6.1.1.	Parámetros de Selección	21
3.6.1.2.	Conexión del Sensor MH-Z19C al Arduino Nano	22
3.6.1.3.	Funcionamiento del Sensor MH-Z19C	23
3.6.1.4.	Consumo Eléctrico	23
3.6.2.	Arduino Nano	23
3.6.2.1.	Consumo Eléctrico del Arduino Nano	25
3.6.3.	Fuente de Alimentación	25
3.6.3.1.	Regulador de Voltaje	26
3.6.4.	Dispositivo de Enlace (LoRaWAN)	27
3.6.4.1.	Parámetros de Selección	28
3.6.4.2.	Pines de Conexión	29
3.6.4.3.	Funcionamiento del Nodo LSN50	29

3.6.5.	Configuración del Nodo Sensor LSN50 para la Recepción y Envío de	
	Datos	31
3.6.5.1.	Comandos AT	31
3.6.5.2.	Filtro Pasa Bajo	32
3.7.	Esquema de Conexión	35
3.8.	Gateway	35
3.8.0.1.	Configuración del Gateway	36
3.9.	Servidor IOT	37
3.9.1.	Registro en la plataforma de TTN	37
3.9.1.1.	Registro del Gateway	38
3.9.1.2.	Registro del Nodo Sensor LSN50	39
3.10.	Decodificación de Datos TTS	41
3.10.1.	Regresión Lineal	42
3.10.2.	Código Decodificador en Payload	42
3.11.	Integración entre TTN y la Interfaz Gráfica	43
3.11.1.	Registro en la Cuenta	44
3.11.2.	Registro del Dispositivo LoRawan	45
3.11.3.	Colocación de la API en TTN	47
3.12.	PCB	48
3.13.	Caja Hermética	49
4.	Implementación y Pruebas	50
4.1.	Implementación del Sistema	50
4.1.1.	Integración de Componentes	51
4.1.2.	Área de Ubicación del Sistema	52
4.1.2.1.	Ubicación	52
4.2.	Resultados	54
4.2.1.	Visualización de Datos en TTN y Servidor	54
4.2.2.	Análisis de la información	55
4.2.3.	Intensidad de Señal Recibida	56

4.2.4. Relación Señal Ruido	57
5. Conclusiones, Recomendaciones y Trabajo a Futuro	58
5.1. Conclusiones	59
5.2. Recomendaciones	59
5.3. Trabajo a Futuro	60
Anexos	70
A. Circuito Esquemático del Montaje	70
B. Plano PCB	71
C. Código Arduino	72
D. Código Payload	76

Índice de figuras

2.1. Molécula de CO_2 [1].	6
2.2. Vehículo expulsando CO_2 [2].	7
2.3. Mezcla de cemento durante la construcción [3].	7
2.4. Bus expulsando finas partículas de Dióxido de Carbono [4].	8
2.5. Sensor Infrarrojo [5].	9
2.6. Sensor óxido metálico [6].	10
2.7. Sensor Electroquímico [7].	10
2.8. Dispositivos conectados a la red mediante el protocolo LoRAWAN [8].	13
2.9. Elementos que conforman el protocolo LoRaWAN [9].	14
2.10. Mapa de localización de gateways a nivel mundial para la conexión con The Things Network [10].	16
2.11. Interfaz The Things Stack.	16
2.12. Arquitectura TTS [11].	17
3.1. Diagrama de bloques del sistema de medición.	20
3.2. Sensor MH-Z19C [12].	21
3.3. Conexión de pines, sensor MH-Z19C y Arduino Nano.	22
3.4. Código de Arduino para el procesamiento de la señal.	23
3.5. Diagrama de flujo del funcionamiento del sensor MH-Z19C basado en [12]. . .	24
3.6. Placa Arduino que se usa en el sistema de medición.	25
3.7. Fuente de alimentación de 1.2V.	26
3.8. Regulador de voltaje MP1584 con una salida de 5V.	27

3.9. Dispositivo con protocolo LoRaWAN que permite la transmisión de datos [13].	27
3.10. Pines para conexión con su respectiva etiqueta [13].	29
3.11. Diagrama de funcionamiento del nodo sensor LSN50.	30
3.12. Puerto Serial que permite la configuración por comandos AT.	31
3.13. Filtro pasa bajo.	32
3.14. Señal PWM sin filtrar.	34
3.15. Señal Filtrada.	34
3.16. Esquema de Conexión del nodo sensor LSN50.	35
3.17. Gateway LR9 MikroTik.	36
3.18. Aplicación para configuración de Gateway.	36
3.19. Modificación del nombre y dirección de la red para el envío de datos en el Gateway.	37
3.20. Página principal de TTS, donde se accede a la interfaz de registro de los dispositivos.	38
3.21. Indicaciones para el correcto registro del Gateway.	38
3.22. Indicación de que el Gateway esta correctamente registrado.	39
3.23. Registro de Nodo LSN50.	39
3.24. Indicación de que el registro del nodo sensor LSN50 es adecuado.	40
3.25. Lectura de voltaje.	41
3.26. Datos Reales.	41
3.27. Gráfica con la ecuación para la conversión de voltaje a partes por millón.	42
3.28. Código para decodificación de datos.	43
3.29. Llegada de datos desde el sensor a TTN.	43
3.30. Pagina de Datacake.	44
3.31. Entorno de Datacake configurable para la visualización de datos en tiempo real.	44
3.32. Paso para el registro del nodo sensor LSN en Datacake.	45
3.33. Elección del servidor.	45
3.34. Paso 3 del registro para colocar la identificación del dispositivo.	46
3.35. Planes que ofrece Datacake para el uso del entorno.	46

3.36. API de la cuenta.	47
3.37. Apartado en TTN donde se ingresa el API de Datacake.	47
3.38. Interfaz de TTN con el nombre del dispositivo, enlasado con Datacake.	48
3.39. Diseño para pcb.	48
3.40. Caja de protección	49
4.1. Caja hermética con los componentes del sistema.	51
4.2. Ubicación del sensor.	51
4.3. Ubicación GPS del sensor en la primera medición.	52
4.4. Ubicación GPS del sensor en la segunda medición.	53
4.5. Primera ubicación del sensor para la medición.	53
4.6. Segunda Ubicación del sensor para la medición.	54
4.7. Llegada de datos a TTN.	55
4.8. Valor promedio de la medición de CO_2	55
4.9. Gráfica con el registro de datos de CO_2	56
4.10. Intensidad de la señal recibida.	57
4.11. Relación Señal - Ruido.	57

Índice de tablas

2.1. Tecnologías para medición de Dióxido de Carbono.	11
3.1. Parámetros de selección.	21
3.2. Consumo eléctrico sensor MHZ19C.	24
3.3. Consumo eléctrico arduino nano.	25
3.4. Consumo electrico.	26
3.5. Parámetros de selección	28
3.6. Comandos AT.	32

Resumen

En la ciudad de Ibarra no existen registros ni sistemas que permitan medir en tiempo real la concentración de dióxido de carbono en el ambiente, lo que dificulta conocer la calidad del aire en las zonas urbanas. Como consecuencia de este desconocimiento, se ven afectadas las personas que tienen enfermedades respiratorias o condiciones de salud vulnerables.

El propósito de este proyecto es desarrollar un sistema que permita monitorear los niveles de dióxido de carbono y, con ello, conocer el estado de la calidad del aire, especialmente en zonas con alto tráfico vehicular.

Para lograrlo, se realiza primero una investigación que permite comprender las características de los dispositivos que se utilizan, como el sensor de CO_2 , el microcontrolador, el dispositivo LoRa, el Gateway y el servidor. El siguiente paso es diseñar y construir el sistema para realizar pruebas de funcionamiento, verificar la intensidad de la señal y garantizar el acceso sin restricciones a la información.

La investigación demuestra que la tecnología IoT permite obtener información en tiempo real, evidenciando su capacidad para transmitir datos sin pérdida.

Palabras clave: Internet de las cosas, Contaminación del aire, Dióxido de carbono, Monitoreo ambiental, LoRaWAN.

Abstract

In the city of Ibarra, there are no records or systems that allow for real-time measurement of carbon dioxide concentration in the environment, making it difficult to know the air quality in urban areas. As a consequence of this lack of knowledge, individuals with respiratory diseases or vulnerable health conditions may be affected. The purpose of this project is to develop a system that allows for monitoring carbon dioxide levels, thereby understanding the state of air quality, especially in areas with high vehicle traffic. To achieve this, a preliminary research phase is conducted to thoroughly understand the characteristics of the devices to be used, such as the CO_2 sensor, microcontroller, LoRa device, gateway, and server. The next step involves designing and building the system to conduct the necessary functional tests, signal intensity verification, and unrestricted access to information. Finally, the research concludes that IoT technology enables real-time information access, demonstrating its capacity to transmit data without loss of information.

Keywords: IoT network, Air Pollution, Carbon Dioxide, Environmental Monitoring, LoRaWAN.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Planteamiento del Problema

Según La Unión Europea, el transporte vehicular es responsable del 15 % de las emisiones totales de CO_2 y del 70 % de la contaminación atmosférica en zonas urbanas [14]. Las principales causas de este problema incluyen la falta de políticas de regulación efectivas y la dependencia excesiva del transporte privado. Las consecuencias se manifiestan en el deterioro de la calidad del aire, el aumento de enfermedades respiratorias y cardiovasculares, y el agravamiento del cambio climático [15]. Desde una perspectiva nacional, Ecuador también enfrenta dificultades relacionadas con las emisiones de CO_2 en el área urbana. Según datos del Ministerio del Ambiente, las emisiones generadas por el sector vehicular han aumentado en un 78.7 %, lo que incide de manera considerable en el calentamiento global [16].

Según [17–19], Mencionan que en las áreas urbanas hay diversas actividades que generan contaminantes atmosféricos, siendo una de ellas la combustión vehicular, como consecuencia del aumento en el uso de vehículos particulares. En este contexto, en la ciudad de Ibarra, Imbabura, Ecuador, se ha incrementado la liberación del dióxido de carbono en el ambiente, generando alteraciones ambientales. De la misma forma, se observa un impacto negativo en el medio

ambiente, que repercute en la salud de la población urbana, afectando a los más vulnerables, como las personas con enfermedades respiratorias.

En este contexto, desde el campo de la ingeniería, se propone realizar un sistema de medición del nivel de CO_2 en las calles más transitadas de la ciudad de Ibarra, con el propósito de analizar si los niveles de CO_2 están dentro de un rango que no representa riesgo para la salud, y, en caso contrario, tendríamos información importante para planificar acciones con el fin de reducir la circulación vehicular en las calles mencionadas. Esta iniciativa ayudaría a reducir la concentración de CO_2 y a mejorar la calidad del aire en algunas zonas de la ciudad, beneficiando la salud de sus habitantes.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

- Desarrollar un sistema para la medición de la concentración de dióxido de carbono en las calles más transitadas de la ciudad de Ibarra.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Analizar las tecnologías existentes para la medición de CO_2 , identificando la más adecuada para ser implementada en un sistema que utilice microprocesadores y redes de comunicación.
- Diseñar un sistema para captar los datos de CO_2 , incluyendo el desarrollo de un algoritmo que permita recolectar y transmitir esa información de forma eficiente.
- Implementar el sistema diseñado, evaluando su desempeño y precisión en condiciones reales.

1.3. Justificación

Este proyecto es funcional para el ámbito académico, al permitir la obtención de datos sobre la calidad del aire, centrándose en los niveles de CO_2 en áreas urbanas. Disponer de información precisa y actualizada fortalecerá el conocimiento existente y aportará al desarrollo de la investigación académica.

Para la ciudad de Ibarra, el presente proyecto puede tener un impacto importante en la toma de decisiones públicas, pues la información que se obtenga permitirá a las autoridades diseñar políticas que protejan el bienestar ambiental y la salud de sus habitantes, controlando de forma efectiva el tráfico vehicular.

Desde la ingeniería, el proyecto promueve el desarrollo y aplicación de nuevas tecnologías en el monitoreo ambiental. Al utilizar redes de largo alcance y bases de datos en tiempo real, se logrará una medición precisa y en tiempo real de los contaminantes vehiculares, mejorando la fiabilidad de los datos y facilitando la implementación de medidas tecnológicas avanzadas para controlar la contaminación. Para la formación de un ingeniero mecatrónico, este proyecto representa una excelente oportunidad para poner en práctica el conocimiento adquirido durante el periodo académico. En mecatrónica, contar con la capacidad de implementar tecnologías IoT, crear algoritmos y desarrollar sistemas funcionales son habilidades fundamentales. En este contexto, el estudiante podrá reforzar sus conocimientos y adquirir experiencia, preparándose para enfrentar problemas del mundo real.

1.4. Alcance

Este proyecto se centrará en la medición de dióxido de carbono en las calles más transitadas de la ciudad de Ibarra mediante un sistema basado en tecnología IoT. Se instalarán dos sensores de CO_2 estratégicamente ubicados, vinculados a un Gateway que utiliza una red de largo alcance. Los datos se enviarán primero a un servidor propio y luego se guardarán y gestionarán de forma eficiente en una base de datos en tiempo real. Analizar esta información ayudará a conocer los niveles de CO_2 en las calles seleccionadas y a entender cómo podrían estar afectando la calidad del aire y la salud de los residentes.

Capítulo 2

Revisión Bibliográfica

En este capítulo se explican conceptos importantes sobre el Internet de las Cosas (IoT), su relevancia y las tecnologías que hacen posible la conexión entre dispositivos y la recopilación de datos en tiempo real. También se abordan temas relacionados con la contaminación ambiental, los factores que la generan y la importancia de medirla en áreas con alto tráfico vehicular.

2.1. Antecedentes

En [20–23] resalta la importancia de la optimización del consumo energético en redes de largo alcance, utilizando modelos como Fibonacci, lo que permite reducir el gasto energético por paquete hasta de un 2.77 % mJ. De igual forma, las estrategias de programación han demostrado ser más eficientes en comparación con algoritmos tradicionales, logrando una reducción del 5.03 % sin afectar el funcionamiento de la red, lo que permite una mayor autonomía de los nodos.

Por otra parte, en [24–27] se demuestra que un mayor número de gateways reduce el fallo en la entrega de paquetes, condiciones de tráfico. Además, el uso de esquemas como Network Coding Based Forwarding, reduce el ancho de banda hasta en un 66 %. Asimismo, los modelos de

aprendizaje automático, como el Gradiente Aumentado, mejoran la predicción de la atenuación de la señal.

En [28–32], se valida la aplicabilidad de LoRaWAN en entornos como monitoreo ambiental, rastreo industrial y seguimiento de activos, incluso en zonas de difícil acceso. Estos estudios evidencian coberturas de hasta 10 millas y precisiones de un 95 % en la localización de animales y equipos.

Finalmente, en [33] se realizan comparaciones entre LoRa y LoRaWAN en aspectos como cobertura, seguridad y latencia. Aunque LoRaWAN ofrece mayor robustez y alcance para aplicaciones IoT, también se identifican limitaciones en entornos de alto tráfico, especialmente en cuanto a la calidad del servicio y el tiempo de respuesta, lo que sugiere la necesidad de mejorar su escalabilidad.

2.2. Dióxido de Carbono

El dióxido de carbono CO_2 es un gas incoloro e inodoro presente en la atmósfera en condiciones normales. Está formado por un átomo de carbono y dos átomos de oxígeno, enlazados mediante enlaces covalentes, como se muestra en la Fig 2.1. En condiciones normales, es un gas estable que no reacciona fácilmente con otras sustancias. Su generación ocurre principalmente como resultado de la combustión de materiales, incluyendo combustibles fósiles y la descomposición de materia orgánica [34,35].

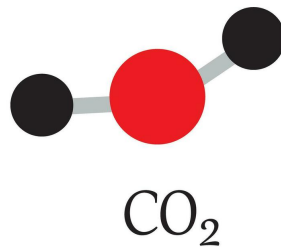


Figura 2.1: Molécula de CO_2 [1].

2.2.1. Fuentes de Emisión de Dióxido de Carbono

La principal actividad humana que genera un aumento en la emisión de dióxido de carbono es la quema de combustibles fósiles para la generación de energía, como en el caso del transporte, debido al proceso de combustión interna al quemar gasolina o diésel [35].

Diariamente, millones de vehículos son el medio de transporte para personas y mercadería, convirtiéndose en uno de los factores causantes del aumento de gases atmosféricos, como se muestra en la Fig. 2.2.



Figura 2.2: Vehículo expulsando CO_2 [2].

Otra fuente importante de generación de CO_2 en entornos urbanos es el uso de materiales de construcción, como el cemento y el acero. En la Fig. 2.3 se observa como durante la mezcla del cemento para enlucir y pegar bloques, se producen reacciones químicas que liberan Dióxido de Carbono a la atmósfera. Además, la utilización de acero en la construcción contribuye a la emisión de contaminantes debido a los procesos de oxidación y fabricación, los cuales generan Dióxido de Carbono.

Asimismo, la generación de energía eléctrica, utilizada en hogares, comercios e industrias, es otro factor que incrementa las emisiones de CO_2 , especialmente cuando la electricidad proviene de la quema de combustibles fósiles como el carbón, el gas natural y el diésel.



Figura 2.3: Mezcla de cemento durante la construcción [3].

2.3. Impacto del Dióxido de Carbono en la Salud Humana

El impacto del CO_2 en la salud humana es preocupante, ya que, aunque por sí solo no es el principal causante de enfermedades respiratorias, su presencia en altas concentraciones suele estar acompañada de otros gases tóxicos, como los óxidos de nitrógeno y el material particulado. Esta combinación lo convierte en un factor peligroso para la salud. Además, la exposición constante a estos contaminantes incrementa significativamente el riesgo de enfermedades respiratorias y cardiovasculares, afectando especialmente a niños, ancianos y personas con afecciones preexistentes. Las diminutas partículas contaminantes pueden ingresar al sistema respiratorio, como se muestra en la Fig 2.4, causando inflamación, disminución de la función pulmonar y otros problemas de salud a largo plazo [36].



Figura 2.4: Bus expulsando finas partículas de Dióxido de Carbono [4].

2.4. Medición de Dióxido de Carbono en Áreas Urbanas

La medición de la concentración de dióxido de carbono en áreas urbanas es esencial para evaluar la calidad del aire, ya que proporciona datos que permiten analizar tendencias a lo largo del tiempo, identificar patrones de emisión y comparar los niveles registrados con estándares ambientales.

2.4.1. Tecnologías para la Medición de Dióxido de Carbono

Para medir el CO_2 del aire existen varias tecnologías que pueden emplearse dependiendo el entorno de medición.

2.4.2. Sensores Infrarrojos No Dispersivos (NDIR)

Entre los muchos sistemas para la medición de CO_2 están los NDIR basados en detección por infrarrojo, es uno de los más utilizados debido a su precisión y confiabilidad, como muestra la Fig.2.5. Estos sensores utilizan una fuente de luz infrarroja junto con un detector que registra la absorción de CO_2 en una cámara óptica, permitiendo así detectar con alta precisión las concentraciones de CO_2 presentes en el aire [37].



Figura 2.5: Sensor Infrarrojo [5].

2.4.3. Sensores Semiconductores de Óxido Metálico (MOS)

La Fig. 2.6 muestra un sensor semiconductor que basa su funcionamiento en la modificación de su resistencia eléctrica producida cuando el ambiente en el que se encuentra es modificado. Su rendimiento puede verse afectado por cambios en la temperatura y la humedad, lo que requiere calibraciones regulares para mantener la precisión [37].



Figura 2.6: Sensor óxido metálico [6].

2.4.4. Sensores Electroquímicos

La Fig. 2.7 muestra un sensor Electroquímico que generalmente es más económico y adecuado para aplicaciones donde se requiere monitoreo en espacios cerrados, como edificios y fábricas. Basan su funcionamiento en la medición de la corriente eléctrica para determinar la calidad el aire [37].



Figura 2.7: Sensor Electroquímico [7].

2.4.5. Comparación entre las Tecnologías de Medición de Dióxido de Carbono

En la Tabla 2.1 se observa las especificaciones de las tecnologías existentes para la medición de CO_2 .

Tabla 2.1: Tecnologías para medición de Dióxido de Carbono.

Tipo	Precisión	Operación	Aplicaciones	Ventajas	Desventajas
NDIR	Alta	Robusto	Monitoreo ambiental	Eficiente	Costoso
MOS	Moderada	Sensibles	Control ambiental	Versátil	Ineficiente
EC	Moderada	Sensibles	Industria	Práctico	ineficiente

La tecnología NDIR resalta como la alternativa más precisa y robusta, esta tecnología tiene una alta precisión, lo cual es esencial para obtener mediciones confiables en entornos donde se requiere monitoreo continuo y exactitud en los datos. En términos de operación, se clasifica como robusta, lo que indica que es capaz de funcionar de manera estable en condiciones diversas sin verse afectada fácilmente por factores externos. Además, una de sus aplicaciones incluyen el monitoreo ambiental, por lo que es una excelente opción para proyectos que buscan evaluar la calidad del aire en espacios públicos o urbanos.

2.4.6. Valores Referenciales de Concentración de CO_2 para Lugares Exteriores

Según el departamento de agricultura de los Estados Unidos, en zonas con alta afluencia vehicular, las concentraciones de CO_2 pueden encontrarse en un rango de 600 a 1500 ppm. En cambio, en lugares con menor tránsito vehicular, los valores suelen estar entre 400 y 550 ppm. Aunque estos niveles no representan un riesgo directo para la salud ni están establecidos como límites oficiales, es importante considerar que en ambientes exteriores, el tráfico vehicular influye significativamente en el aumento de la concentración de CO_2 en el aire [38].

2.5. Redes de Comunicación

La red de comunicación permite que haya conexión entre dispositivos inteligentes y haya intercambio de información entre sistemas y usuarios. La red de comunicación se divide en dos grandes grupos: redes de corto alcance, como Wi-Fi y Bluetooth, y redes de comunicación de largo alcance, como LoRaWAN y sigfox. El uso de cada una de ellas dependerá del entorno en que se desarrollen las aplicaciones [39].

2.5.1. Redes de Corto Alcance

Las redes de comunicación de corto alcance, como Bluetooth y Wi-Fi, están diseñadas para transmitir datos en distancias limitadas, generalmente de hasta 100 metros. Estas redes resultan muy eficaces en contextos donde los dispositivos necesitan intercambiar datos rápidamente y en grandes volúmenes, como ocurre en la domótica y en dispositivos vestibles. Aunque consumen más energía que las redes de largo alcance de baja potencia (LPWAN), las redes de corto alcance permiten transferencias de datos complejos, incluidos archivos multimedia. Sin embargo, para mantener la conexión, requieren que los dispositivos se mantengan dentro de un rango específico [40].

2.5.2. Redes de Largo Alcance

Las redes de largo alcance, como las LPWAN (Low-Power Wide-Area Network), están optimizadas para transmitir datos a grandes distancias, siendo ideales para aplicaciones IoT que requieren una cobertura extendida en zonas urbanas o rurales. Tecnologías como LoRa y Sigfox son ampliamente utilizadas en áreas como la agricultura, la industria y las ciudades inteligentes, ya que permiten la comunicación de dispositivos distribuidos en áreas amplias, lo cual disminuye los costos operativos debido a su bajo consumo de energía. No obstante, estas redes presentan limitaciones en cuanto al ancho de banda y la velocidad de transmisión, lo que las hace más adecuadas para aplicaciones donde la prioridad es la distancia de comunicación, más que la cantidad de datos transmitidos. Además, las LPWAN enfrentan retos en entornos congestionados, especialmente en relación con la eficiencia y las colisiones de datos [41].

2.5.2.1. LoRa

LoRa (Long Range) es una tecnología de comunicación inalámbrica diseñada para aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT) que requieren bajas tasas de transmisión de datos y un largo alcance. Se utiliza principalmente en redes de área amplia de baja potencia (LPWAN, por sus siglas en inglés) para dispositivos que no necesitan enviar grandes volúmenes de datos pero que requieren conectividad a largas distancias, como sensores, medidores inteligentes y sistemas de monitoreo remoto [42].

2.5.2.2. LoRaWAN

Es un protocolo diseñado para dispositivos de bajo consumo y largo alcance, encargado de la seguridad durante la comunicación y transmisión de datos. Permite la interconexión entre dispositivos a la red sin la necesidad de cableados, convirtiéndose en el protocolo propicio para uso IoT como se puede observar en la Fig. 2.8 [42].

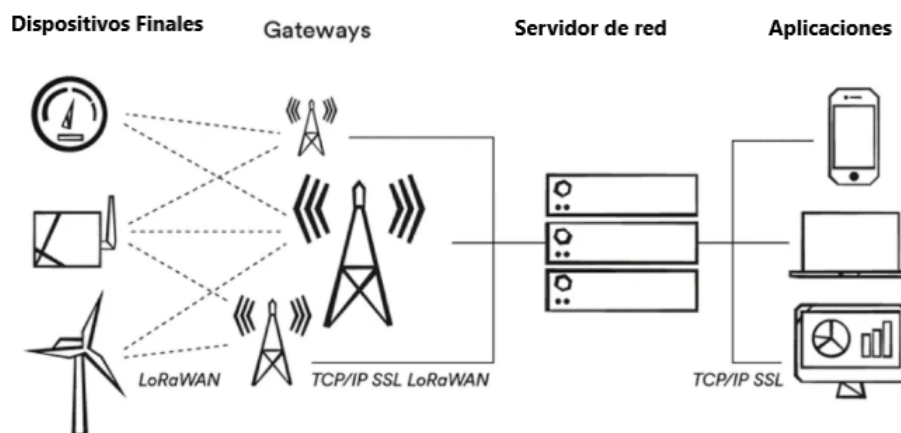


Figura 2.8: Dispositivos conectados a la red mediante el protocolo LoRAWAN [8].

2.5.2.3. Arquitectura LoRAWAN

La arquitectura de LoRaWAN está compuesta por varios elementos fundamentales que permiten la conexión eficiente con la red, como se detalla en la Fig. 2.9.

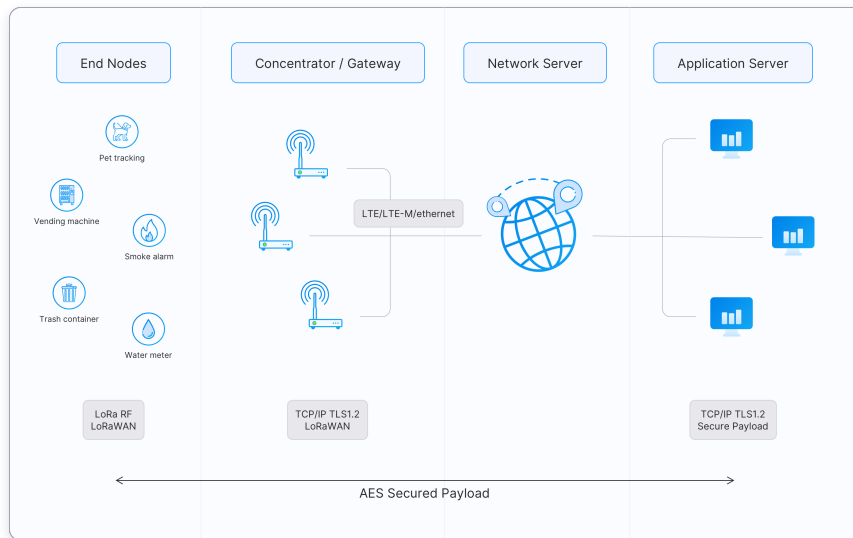


Figura 2.9: Elementos que conforman el protocolo LoRaWAN [9].

La arquitectura de LoRaWAN está compuesta por dispositivos finales, que son los sensores o actuadores encargados de recopilar y transmitir datos; puertas de enlace, que reciben las señales inalámbricas de estos dispositivos y las envían al servidor de red, responsable de gestionar la red, controlar el acceso, garantizar la seguridad y procesar los mensajes recibidos; servidores de aplicaciones, donde se almacenan, procesan y visualizan los datos para su uso por parte de los usuarios finales. Esta arquitectura permite una comunicación eficiente, segura y de largo alcance, adecuada para aplicaciones IoT en diversos sectores como ciudades inteligentes, agricultura y monitoreo ambiental [9].

2.5.2.4. Dispositivos LoRaWAN

- Clase A: Transmite datos (uplink) en cualquier momento. Después de enviar, abre dos breves ventanas de recepción (RX1 y RX2) para escuchar mensajes de bajada (downlink) desde la red. Si no recibe nada en esas dos ventanas, espera hasta su próxima transmisión para volver a recibir.
- Clase B: Abren ventanas de recepción periódicas llamadas ranuras de ping, lo que les permite recibir mensajes de enlace descendente con mayor frecuencia que los de Clase

A. La red envía balizas sincronizadas que permiten a los dispositivos sincronizar sus relojes internos, asegurando que estén alineados con el servidor para recibir los mensajes descendentes en los momentos adecuados.

- Clase C: Mantienen ventanas de recepción abiertas de forma casi continua, excepto durante el breve periodo en que realizan una transmisión de enlace ascendente, durante este estado puede recibir mensajes de manera muy rápida, sin perder tiempo. Sin embargo, este comportamiento implica un consumo energético elevado, por lo que los dispositivos de Clase C no son adecuados para alimentación por batería a largo plazo y generalmente requieren una fuente de energía constante (como conexión a la red eléctrica) [43].

2.5.2.5. The Things Network (TTN)

Es una red pública y abierta basada en la tecnología LoRaWAN que permite conectar dispositivos IoT de manera eficiente y económica. Al ser una red global, TTN facilita el despliegue de aplicaciones IoT sin la necesidad de invertir en infraestructura propia, ya que proporciona cobertura a través de gateways distribuidas por todo el mundo. Ofrece una plataforma accesible tanto para desarrolladores como para empresas, permitiendo conectar miles de dispositivos a la red de manera segura, escalable y con bajo consumo energético. Gracias a su modelo de código abierto, TTN cuenta con una comunidad activa como se puede observar en la Fig. 2.10, haciendo que la implementación de soluciones IoT sea más sencilla y accesible [10].



Figura 2.10: Mapa de localización de gateways a nivel mundial para la conexión con The Things Network [10].

2.5.2.6. The Things Stack

The Things Stack es un servidor de red LoRaWAN que permite la conectividad, la gestión y la monitorización de dispositivos, puertas de enlace y aplicaciones de usuario final como se observa en la Fig. 2.11, que muestra la interfaz con la que se puede interactuar. Su finalidad es garantizar la seguridad, la escalabilidad y la fiabilidad del enrutamiento de datos en toda la red [44].

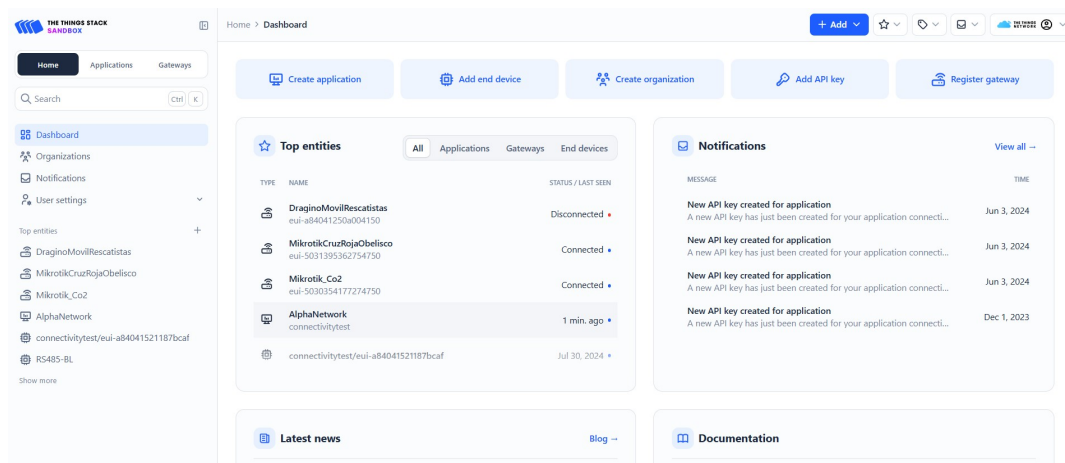


Figura 2.11: Interfaz The Things Stack.

Arquitectura TTS La arquitectura de The Things Stack se compone de varios módulos principales que trabajan de forma integrada como se puede observar en la Fig. 2.12. El Identity Server se encarga de la gestión de usuarios, aplicaciones, gateways y dispositivos. El Network Server administra la red LoRaWAN, incluyendo el control de paquetes, clases de dispositivos y reintentos de transmisión. El Join Server maneja la activación y autenticación de los dispositivos cuando se unen a la red. El Gateway Server facilita la comunicación entre los gateways y el resto del sistema. Finalmente, el Application Server entrega los datos procesados a las aplicaciones del usuario, como bases de datos o plataformas web.

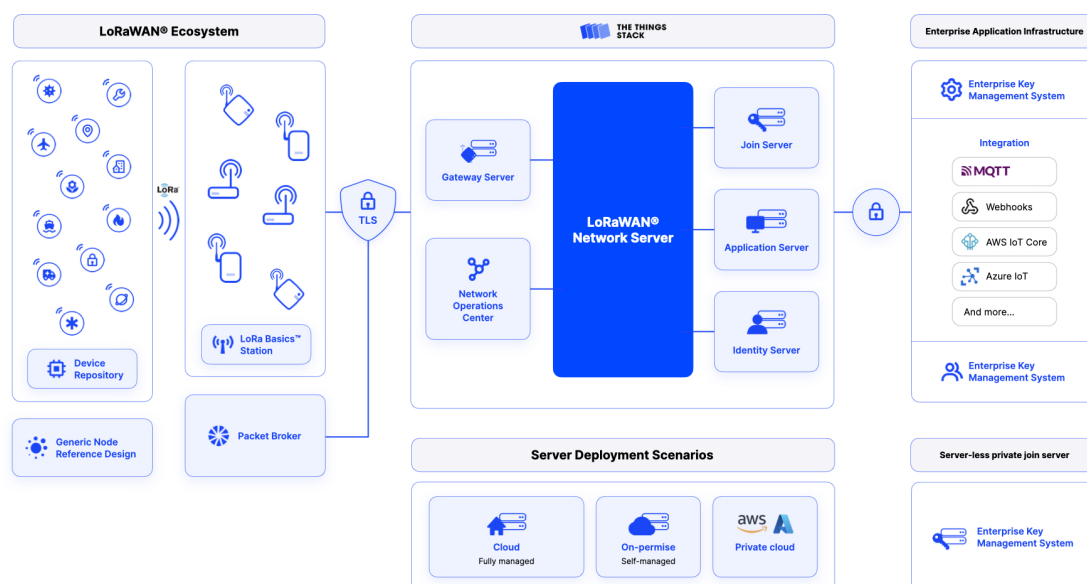


Figura 2.12: Arquitectura TTS [11].

Capítulo 3

Metodología

3.1. Enfoque Metodológico

Investigación documental: Se caracteriza por emplear el documento escrito en sus diversas modalidades, como fuentes primarias de información, aunque no son las únicas utilizadas. Esto incluye materiales impresos, digitales y audiovisuales que complementan el proceso de indagación [45]. Considerando la definición de investigación documental, se lleva a cabo una búsqueda de información en sitios de divulgación científica y también en la biblioteca de la Universidad Técnica del Norte. Con el objetivo de recopilar información de calidad.

Investigación descriptiva: Se encarga de puntualizar las características de la población que está estudiando [2]. De manera similar, la investigación descriptiva implica el registro, análisis e interpretación de los datos obtenidos durante la investigación. En el presente trabajo, se busca recopilar y registrar datos durante un período específico, con el objetivo de analizarlos e interpretarlos, a fin de extraer conclusiones y formular recomendaciones.

Investigación Aplicada: Es un proceso que se lleva a cabo durante una investigación, en el cual se utiliza el conocimiento teórico para desarrollar soluciones prácticas. En este contexto, dicho conocimiento se emplea para desarrollar e implementar un sistema de monitoreo de CO_2 ,

con el propósito de obtener datos para un análisis posterior [46].

3.2. Diseño de la Investigación

Para este proyecto se elige un diseño de investigación que no es experimental, pero si transversal. Este enfoque es adecuado porque se observa y se mide la concentración de dióxido de carbono en las calles más transitadas de la ciudad de Ibarra, sin modificar las variables durante el proceso, lo que permite describir y analizar el estado actual de la calidad del aire en tiempo real.

3.3. Requerimientos del Sistema IoT a Diseñar

- Capacidad de recolección de datos: El servidor que se usa es Datacake el cual permite el almacenamiento por 24 horas para su posterior analisis y obtención de gráficas.
- Transmisión de datos: La transmisión se realiza mediante la red LoRaWAN, enlazada a un gateway que envía los datos a The Things Network, permitiendo así su visualización y gestión.
- Eficiencia energética: El sistema cuenta con baterías recargables para una duración de 12h continuas, sin la necesidad de alimentación externa.
- Resistencia a condiciones ambientales: El sistema esta protegido por una caja hermética, que garantiza su protección.

3.4. Esquema General del Sistema de Medición de Dióxido de Carbono

La Figura 3.1. muestra la representación gráfica del sistema IoT diseñado para la medición de Dióxido de Carbono, ilustrando el flujo de datos desde los sensores de CO_2 hasta la plataforma IoT.

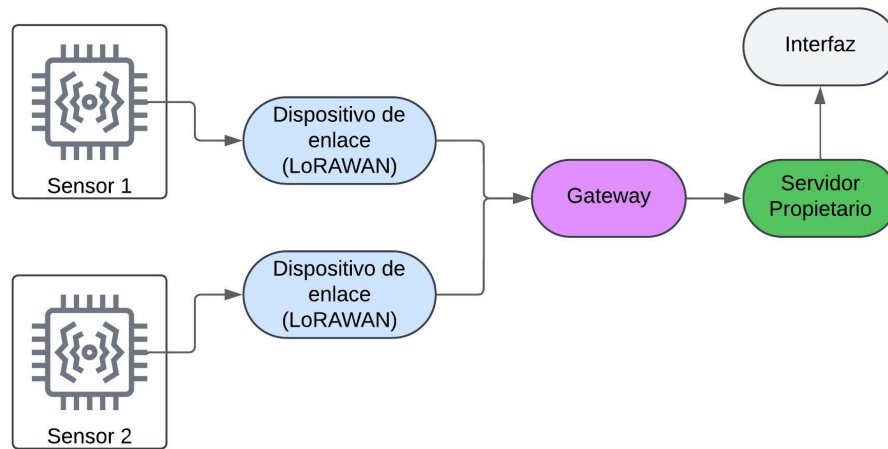


Figura 3.1: Diagrama de bloques del sistema de medición.

3.5. Descripción del Sistema IoT para la Medición de Dióxido de Carbono

El sistema de medición de dióxido de carbono está compuesto por dos sensores que miden la concentración de CO_2 , los cuales están conectados a módulos de enlace LoRaWAN. Estos módulos transmiten los datos recolectados al Gateway, que se encarga de recibir y reenviar la información hacia un servidor web. para luego ser almacenados, procesados y visualizados a travez de una interfaz en un ordenador, permitiendo su análisis en tiempo real.

3.6. Especificaciones Técnicas de los Componentes del Sistema de Medición de Dióxido de Carbono

En la Figura. 3.1 se observan los elementos que constituyen el sistema IoT para la medición de dióxido de carbono. A continuación, se detalla la función específica de cada uno de estos componentes.

3.6.1. Sensor MH-Z19C

El MH-Z19C es un sensor de dióxido de carbono que utiliza tecnología NDIR (infrarrojos no dispersivos), que le permite medir la concentración de CO_2 de manera precisa, especialmente en espacios abiertos [12].

3.6.1.1. Parámetros de Selección

En la Tabla 3.1 se presenta las características técnicas del MH-Z19C y otros sensores similares para facilitar el análisis y la validación de su selección.

Tabla 3.1: Parámetros de selección.		
Parámetros	MH-Z19C	CCS811
Interfaz	UART,PWM	I2C
Alimentación	4.5 a 5.5 V	3.3 a 5V
Costo U.	20 usd	30 usd
LoRaWAN	Si	Si
Rango de medición	400 a 10000 ppm	400 a 8192 ppm
Entorno de medición	Exterior	Interior

En la Tabla 3.1 se presentan las características consideradas para la selección del sensor, destacando el entorno de medición y su costo como factores esenciales. Se identifica, el sensor MH-Z19C como el más adecuado para realizar mediciones en una calle con un alto índice de tráfico vehicular como se puede observar en la Fig. 3.2.

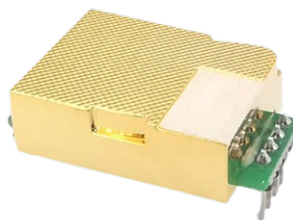


Figura 3.2: Sensor MH-Z19C [12].

3.6.1.2. Conexión del Sensor MH-Z19C al Arduino Nano

La Fig. 3.3 muestra la conexión del sensor de CO_2 al Arduino Nano mediante protocolo de comunicación UART, que se encarga de procesar la señal.

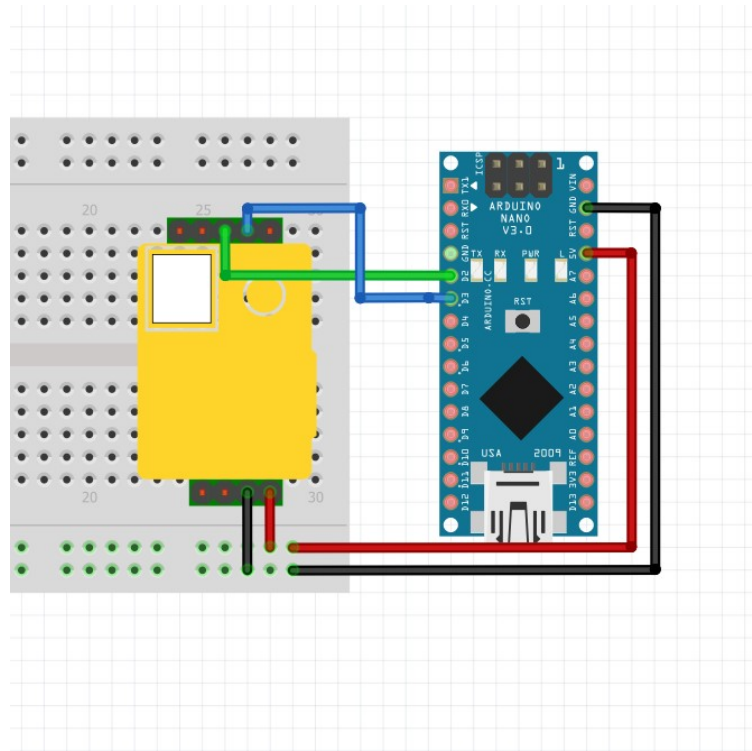


Figura 3.3: Conexión de pines, sensor MH-Z19C y Arduino Nano.

La Fig. 3.4 muestra el código encargado del procesamiento de la señal, la cual se convierte en una señal PWM y, posteriormente, se transforma en una señal analógica mediante un filtro pasabajo véase en el Anexo C.



```
co23 Arduino 1.8.19 (Windows Store 1.8.57.0)
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda

co23
#include <SoftwareSerial.h>
#include <MHZ19.h>

#define RX_PIN 2 //
#define TX_PIN 3
#define PWM_PIN 9 // PWM en pin

SoftwareSerial mhzSerial(RX_PIN, TX_PIN);
MHZ19 mhz19;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  mhzSerial.begin(9600);
  mhz19.begin(mhzSerial);
  mhz19.autoCalibration();
  pinMode(PWM_PIN, OUTPUT);
  analogWrite(PWM_PIN, 0); // Inicia en 0
}

void loop() {
  static unsigned long lastRead = 0;

  if (millis() - lastRead >= 1000) {
    lastRead = millis();
    int co2 = mhz19.getCO2();

    if (co2 > 0 && mhz19.errorCode == RESULT_OK) {
      Serial.print("CO2: ");
      Serial.print(co2);
      Serial.println(" ppm");

      int pwmValue = map(co2, 400, 5000, 0, 255);
      pwmValue = constrain(pwmValue, 0, 255);
    }
  }
}
```

Figura 3.4: Código de Arduino para el procesamiento de la señal.

3.6.1.3. Funcionamiento del Sensor MH-Z19C

El sensor MH- Z19C utiliza el principio de funcionamiento de infrarojo no dispersivo para medir el nivel de contaminación por dióxido de carbono en el aire. En la Figura 3.5 se detalla el funcionamiento del sensor para la lectura de datos y su transmisión.

3.6.1.4. Consumo Eléctrico

Para el funcionamiento del sensor de CO_2 , el fabricante especifica los valores recomendados de voltaje y corriente que deben aplicarse para garantizar un rendimiento adecuado como se detalla en la Tabla 3.2.

3.6.2. Arduino Nano

La Fig. 3.6 muestra la placa Arduino que permite ejecutar funciones específicas, como la medición de variables necesarias para el desarrollo de investigaciones. Además, facilita la visualización de datos a través del monitor serial del entorno de programación.

Funcionamiento del sensor MH-Z19C

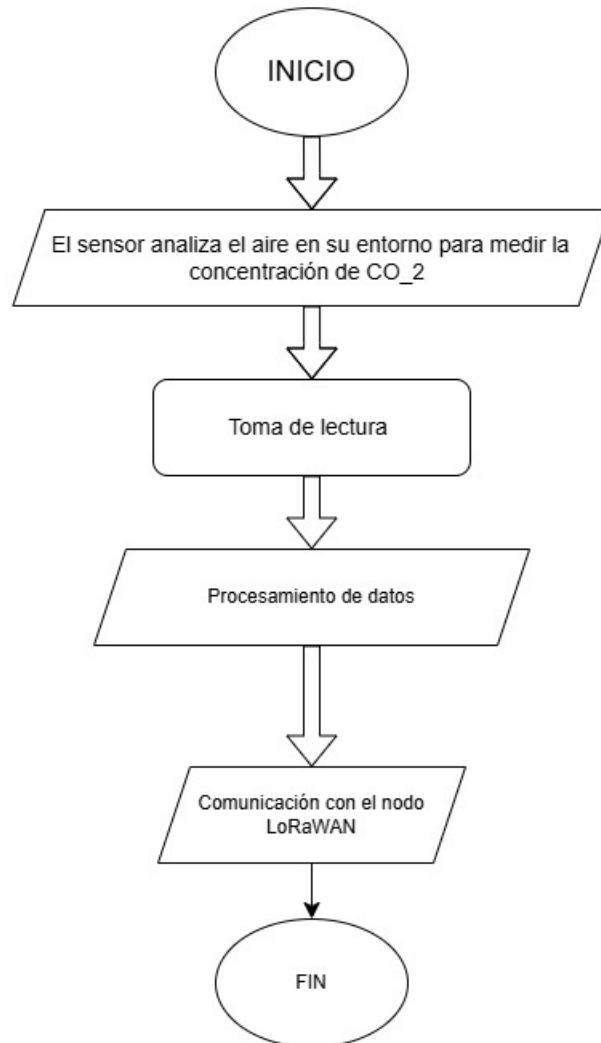


Figura 3.5: Diagrama de flujo del funcionamiento del sensor MH-Z19C basado en [12].

Tabla 3.2: Consumo eléctrico sensor MHZ19C.

Parámetros	MHZ19C
Voltaje	5.0+-0.1V DC
C. promedio	< 40mA
C. Máxima	125mA
Rango de medición	400-10000 ppm

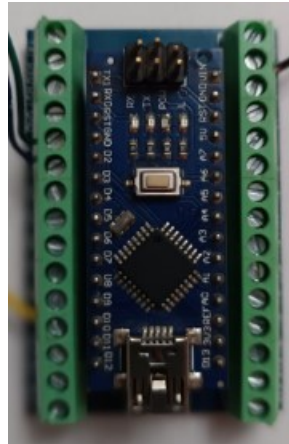


Figura 3.6: Placa Arduino que se usa en el sistema de medición.

3.6.2.1. Consumo Eléctrico del Arduino Nano

Para garantizar el funcionamiento adecuado del Arduino Nano y la recepción correcta de datos, el fabricante recomienda operar dentro de los siguientes rangos de voltaje y corriente que detalla la Tabla 3.3.

Tabla 3.3: Consumo eléctrico arduino nano.

Parámetros	Arduino nano
Voltaje	5 V
C. promedio	12mA
C. Máxima	50mA

3.6.3. Fuente de Alimentación

La Tabla 3.4 muestra el consumo de corriente del sistema que proviene principalmente del sensor de CO_2 y del Arduino Nano, ambos operando de forma continua. Por esta razón, se realiza un cálculo estimado del consumo total con el objetivo de seleccionar una pila adecuada para el funcionamiento del sistema. Además, se verifica la disponibilidad en el mercado.

El sistema tiene un consumo de corriente estimado de 158 mA a 5V como se muestra en la Tabla 3.4. Considerando estos parámetros, así como la disponibilidad de opciones en el mercado, se optó por una pila recargable Energizer como fuente de alimentación.

Tabla 3.4: Consumo electrico.

Dispositivo	Consumo de I	Consumo de V
Sensor CO_2	108mAh	5V
Arduino Nano	50mAh	5V
Total	158mAh	5V



Figura 3.7: Fuente de alimentación de 1.2V.

La Fig. 3.7 muestra la pila Energizer con una capacidad de 2000 mAh y un voltaje nominal de 1.2 V. El sistema requiere una alimentación de 5 V y un consumo aproximado de 158 mA, para cubrir esa demanda, se conectan 6 pilas en serie, lo que permite obtener un voltaje de 7.2 V. y alimentar adecuadamente el sistema. La ecuación 3.1 detalla el analisis de la duración estimada de la pila.

$$\Delta_p = \frac{C}{C_s} = \frac{2000 \text{ mAh}}{158 \text{ mA}} \approx 12 \text{ horas} \quad (3.1)$$

Donde Δ_p representa la duración estimada de la pila (en horas), C es la capacidad total de las baterías (en mAh) y C_s es el consumo del sistema (en mAh). La duración estimada es de 12h.

3.6.3.1. Regulador de Voltaje

El sistema requiere una alimentación de 5 V, mientras que las 6 pilas recargables conectadas en serie proporcionan un voltaje total de 7.2 V. Para adaptar este voltaje al nivel requerido, se

implementa un regulador de voltaje tipo buck, como se puede observar en la Fig. 3.8, específicamente el módulo MP1584. Este módulo permite obtener una salida estable de 5 V a partir de entradas variables entre 4.5 V y 28 V, lo que lo hace ideal para este proyecto. Además, se considera que, con el uso, el voltaje de las pilas tiende a disminuir progresivamente, por ello, se elige el MP1584, ya que garantiza un funcionamiento confiable del sistema incluso cuando el voltaje de entrada baja hasta 4.5 V.



Figura 3.8: Regulador de voltaje MP1584 con una salida de 5V.

3.6.4. Dispositivo de Enlace (LoRaWAN)

La Fig.3.9 muestra el dispositivo con protocolo LoRaWAN que permite el enlace entre el sensor y el gateway, para la transmisión de datos.



Figura 3.9: Dispositivo con protocolo LoRaWAN que permite la transmisión de datos [13].

3.6.4.1. Parámetros de Selección

En la Tabla 3.5 se muestra los parámetros más relevantes para la elección del dispositivo destinado a la transmisión de datos.

Tabla 3.5: Parámetros de selección			
Parámetros	LSN50-V2	RAK7205	LoRa-E5
Interfaz	UART	UART	UART
Consumo	ultrabajo	bajo	bajo
Costo U.	50 usd	50 usd	30 usd
Protección	protección agua y polvo	resistente al agua	sin protección
Software	LoRaWAN 1.0.2	LoRaWAN 1.0.2	LoRaWAN 1.0.3

El nodo sensor LSN50-V2 destaca entre los demás dispositivos principalmente por sus parámetros de protección y su ultrabajo consumo de energía, dado que está expuesto a la interperie durante la recolección de datos. Estos factores lo convierten en la opción más adecuada para garantizar un funcionamiento óptimo.

3.6.4.2. Pines de Conexión

La Fig. 3.10 muestra la etiqueta de cada uno de los pines con los que cuenta el módulo LSN50-V2 lo que facilita una mejor conexión con los dispositivos finales.

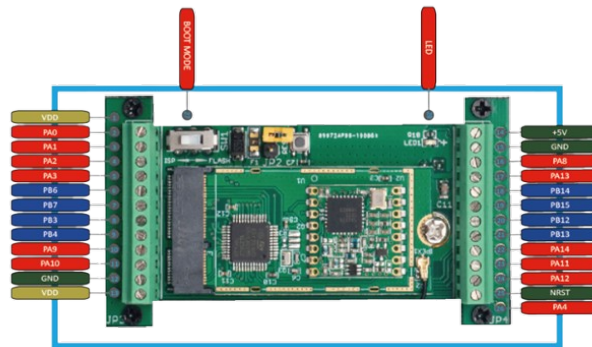


Figura 3.10: Pines para conexión con su respectiva etiqueta [13].

El LSN50-V2 cuenta con 10 modos de funcionamiento, sin embargo, en el presente proyecto se utiliza el modo 8, que permite el envío de seis tipos de datos en cada mensaje, con un tamaño total de 13 bytes. De estos datos, los más relevantes para este trabajo son el nivel de batería y la entrada ADC1, ya que esta última se encarga de recibir la señal analógica proveniente del sensor.

3.6.4.3. Funcionamiento del Nodo LSN50

En la Figura 3.11 se puede observar el funcionamiento del Nodo LoRaWAN cuando se ejecuta su funcionamiento.

Diagrama de funcionamiento del nodo LoRaWAN

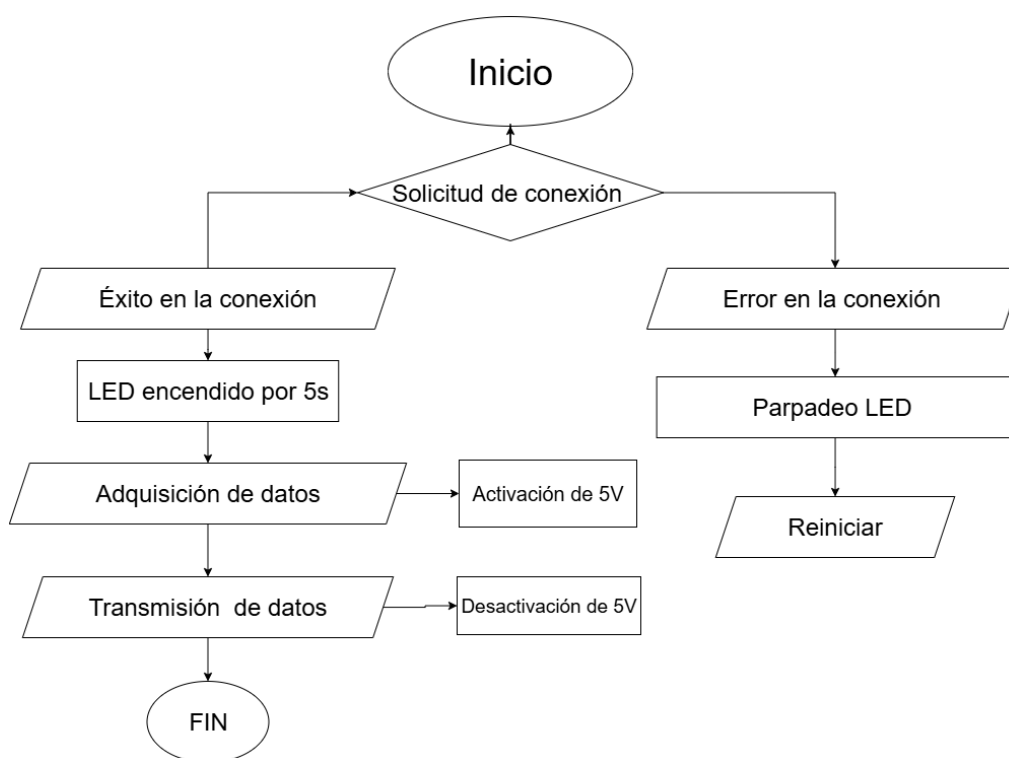


Figura 3.11: Diagrama de funcionamiento del nodo sensor LSN50.

3.6.5. Configuración del Nodo Sensor LSN50 para la Recepción y Envío de Datos

La Fig. 3.12 muestra el puerto serial que permite ingresar los comandos AT para configurar la recepción de datos en el nodo sensor LSN50.

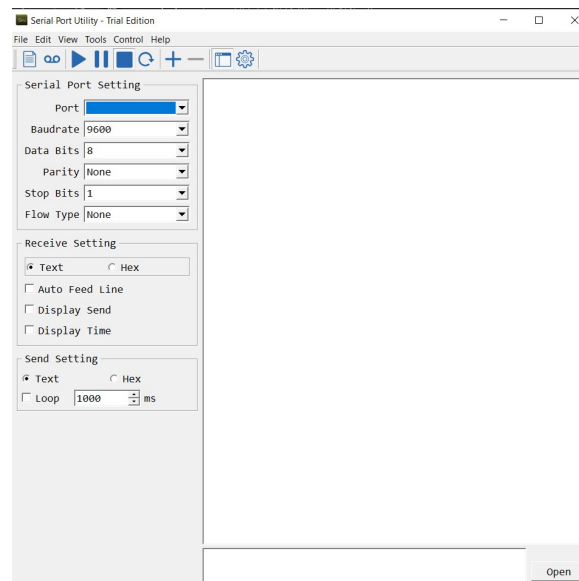


Figura 3.12: Puerto Serial que permite la configuración por comandos AT.

3.6.5.1. Comandos AT

La Tabla 3.6 presenta un conjunto de instrucciones conocidas como comandos AT, que se utilizan para configurar y controlar dispositivos electrónicos, especialmente módulos de comunicación. Estos comandos permiten a los usuarios enviar órdenes simples al dispositivo para realizar tareas como establecer configuraciones, enviar y recibir datos, u obtener información del estado del dispositivo.

Tabla 3.6: Comandos AT.

Comandos AT	Significado
ATZ	Activa un reinicio
AT+FDR	Receteo
AT + DEBUG	Depuración
AT+JOIN	Unirce a la red
AT+TDC	Tiempo de recepción de datos
AT+MOD=8	Modo de trabajo

3.6.5.2. Filtro Pasa Bajo

El filtro pasa bajo permite el paso de las frecuencias bajas mientras bloquea las frecuencias altas, logrando una señal de salida más estable. La Fig. 3.13 presenta el filtro pasa bajo, con una $R=1\text{kohm}$ y un condensador de $C=10\mu\text{F}$.

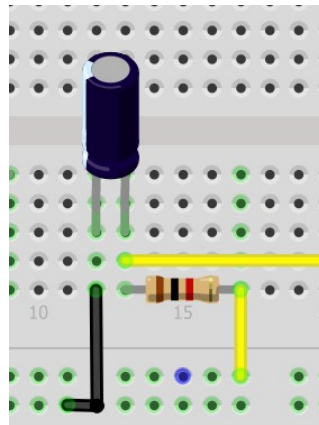


Figura 3.13: Filtro pasa bajo.

La ecuación 3.2 permite calcular la frecuencia de corte del filtro,

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}. \quad (3.2)$$

Remplazando los valores se obtiene

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot 1000 \Omega \cdot 10 \times 10^{-6} \text{ F}} \approx 15,9 \text{ Hz}. \quad (3.3)$$

Se puede observar que el filtro pasa bajo atenúa las frecuencias superiores a 15.9 Hz, mientras que permite el paso de las frecuencias inferiores a este valor. Esta característica se comprueba mediante las pruebas realizadas en el laboratorio.

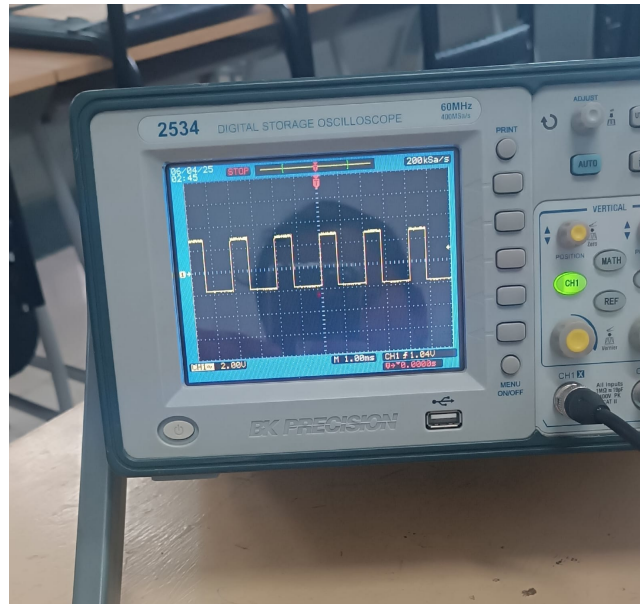


Figura 3.14: Señal PWM sin filtrar.

En la Figura. 3.14 se observa la señal PWM sin filtrar, la cual es generada por el Arduino Nano luego de que el sensor MH-Z19C ha realizado la lectura de la concentración de CO_2 .

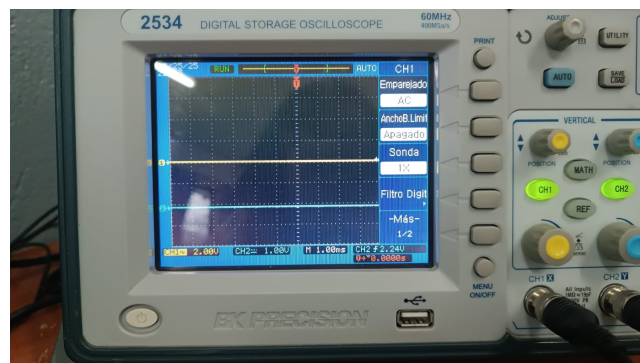


Figura 3.15: Señal Filtrada.

En la Figura. 3.15 se muestra la señal filtrada mediante un filtro pasa bajo, diseñado previamente para atenuar las frecuencias no deseadas y reducir el ruido. Este procesamiento mejora la calidad de la transmisión de datos, garantizando una señal más estable y precisa. Gracias a esta optimización, el Nodo LSN50 puede interpretar la información de manera más eficiente.

3.7. Esquema de Conexión

La Fig. 3.16 se muestra el esquema de conexión de todo el sistema donde se observa la conexión con el nodo sensor LSN50.

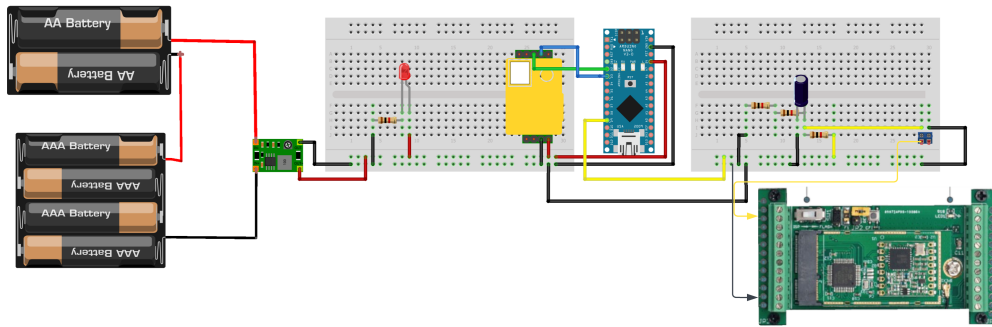


Figura 3.16: Esquema de Conexión del nodo sensor LSN50.

En el esquema se observa el sensor MH-Z19, que actúa como dispositivo final, encargado de realizar la lectura de la concentración de dióxido de carbono. Para luego ser enviados al nodo LSN50, el cual se encarga de transmitir la información al servidor mediante comunicación LoRaWAN.

3.8. Gateway

La Fig. 3.17 muestra el gateway que se usa como punto de acceso a The Things Networks.



Figura 3.17: Gateway LR9 MikroTik.

El gateway LR9 de MikroTik cuenta con características que se ajustan a las necesidades del sistema de medición de CO_2 , como una conexión segura, transmisión de datos confiable, estable y de largo alcance.

3.8.0.1. Configuración del Gateway

Para realizar la configuración, primero se conecta la alimentación eléctrica al gateway, también se conecta el cable de Ethernet para acceder a la configuración. Una vez dentro, se puede cambiar el nombre del dispositivo y configurar parámetros adicionales como la dirección de la red, la frecuencia de operación y otros ajustes específicos para adaptarse a las necesidades del proyecto como se observa en la Fig. 3.18.

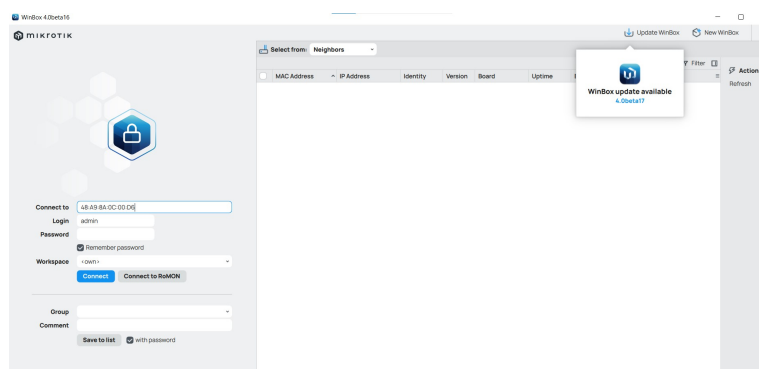


Figura 3.18: Aplicación para configuración de Gateway.

En la Fig. 3.19 se detalla los ajustes configurables en el gateway para garantizar su correcto funcionamiento y un óptimo envío de datos.

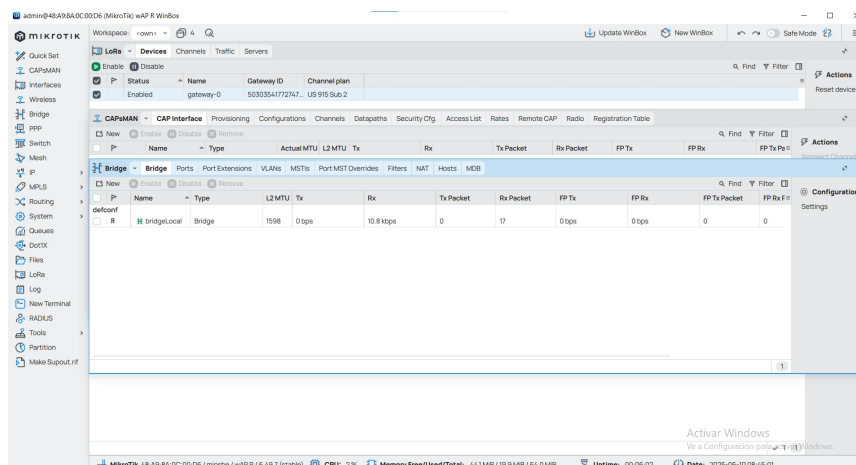


Figura 3.19: Modificación del nombre y dirección de la red para el envío de datos en el Gateway.

3.9. Servidor IOT

El servidor permite visualizar los datos en tiempo real, lo que facilita un análisis ágil y oportuno de la información.

3.9.1. Registro en la plataforma de TTN

El siguiente paso, es registrar el Gateway y el nodo en TTN con la finalidad de permitir la comunicación a través de la red LoRaWAN. Para ello primero se ingresa a:

<https://www.thethingsindustries.com/docs/%20>.

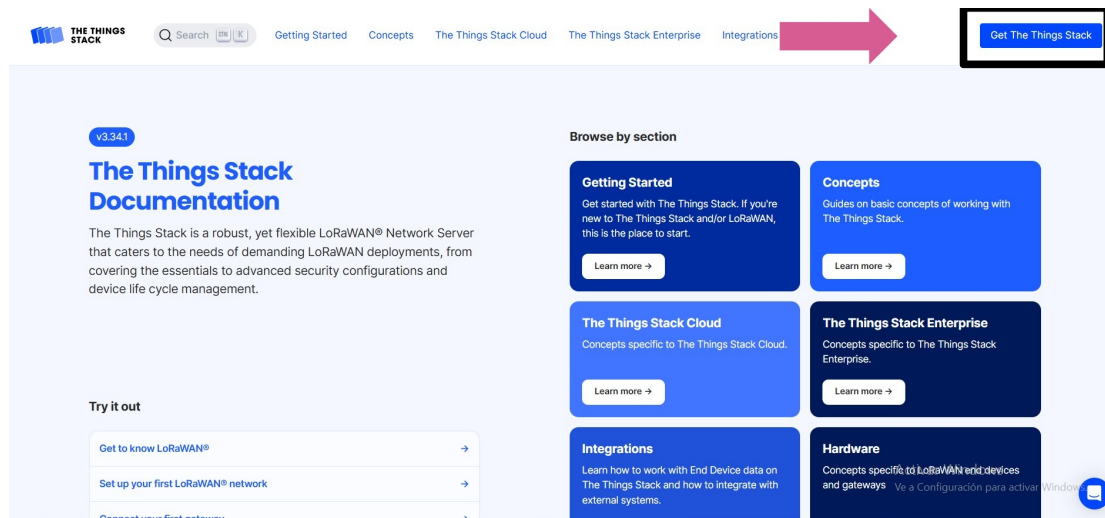


Figura 3.20: Página principal de TTS, donde se accede a la interfaz de registro de los dispositivos.

La Fig. 3.20 muestra la interfaz de The Things Stack, donde se debe crear una cuenta para acceder y registrar los dispositivos.

3.9.1.1. Registro del Gateway

La Fig. 3.21 muestra cómo registrar el gateway para vincularlo con la red y asegurar el correcto envío de datos a la plataforma.

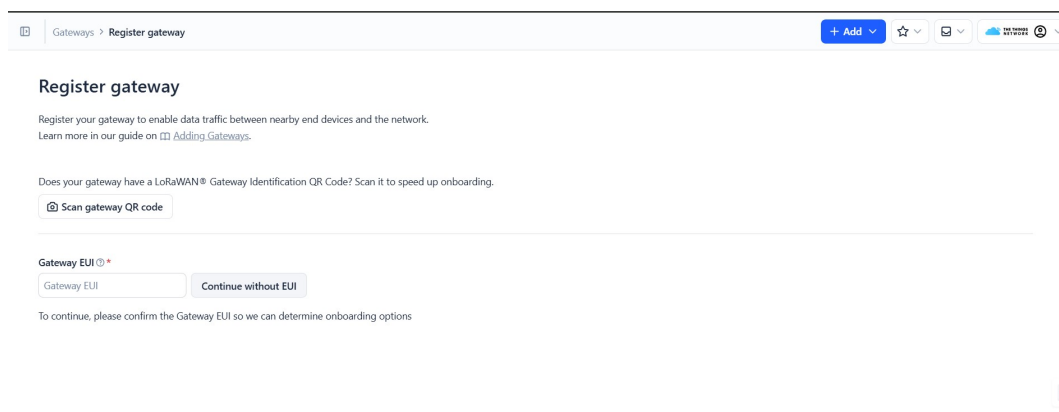


Figura 3.21: Indicaciones para el correcto registro del Gateway.

Posteriormente, se verifica que el sistema esté recibiendo los datos correctamente para ga-

rantizar una transmisión confiable. La Fig. 3.22 muestra los datos que recibe TTS cuando el Gateway funciona correctamente.

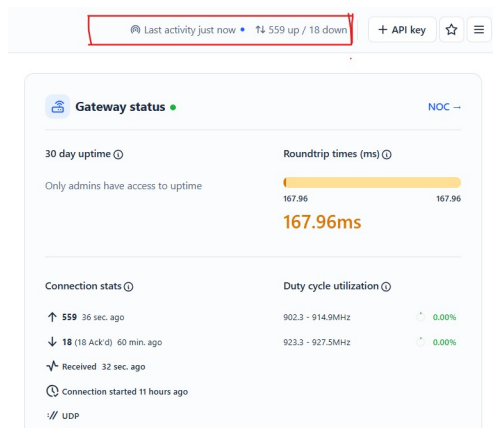


Figura 3.22: Indicación de que el Gateway esta correctamente registrado.

3.9.1.2. Registro del Nodo Sensor LSN50

El nodo sensor permite establecer la conexión entre el dispositivo final y el gateway. Sin embargo, para que esta comunicación sea posible, es necesario registrar previamente el nodo sensor en la plataforma de TTN, donde se configuran sus parámetros de identificación, como se muestra en la Fig. 3.23.

The screenshot shows the 'Register end device' form in the TTN interface. The breadcrumb trail is 'Applications > Red_LaFlorida > End devices > Register end device'. The form title is 'Register end device'. Below the title, it asks 'Does your end device have a LoRaWAN® Device Identification QR Code? Scan it to speed up onboarding.' and provides two options: 'Scan end device QR code' (selected) and 'Device registration help'. Under 'End device type', the 'Input method' is set to 'Select the end device in the LoRaWAN Device Repository'. The 'End device brand' field is empty with a search dropdown. A note at the bottom states: 'Cannot find your exact end device? Get help here and try enter end device specifics manually option above.'

Figura 3.23: Registro de Nodo LSN50.

Luego se procede a la verificación de recepción de datos como se muestra en la Figura 3.24.

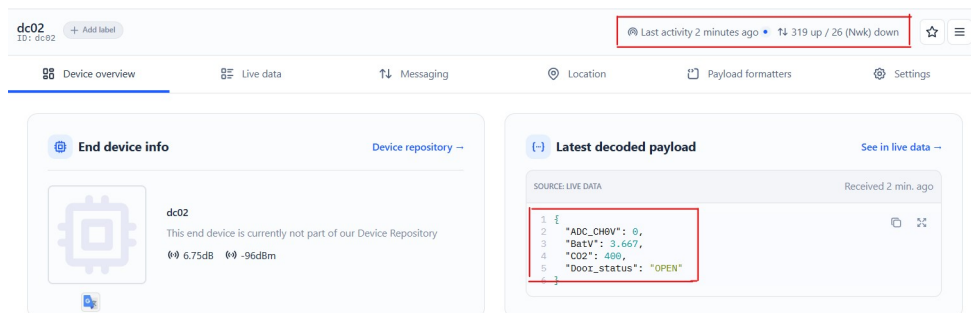


Figura 3.24: Indicación de que el registro del nodo sensor LSN50 es adecuado.

3.10. Decodificación de Datos TTS

Para la decodificación de los datos, es necesario un factor de conversión, el cual se desarrolla aplicando una regresión lineal basada en datos reales de la medición de CO_2 . La Fig. 3.25 presenta la medición en tiempo real utilizada para el desarrollo del factor de conversión.

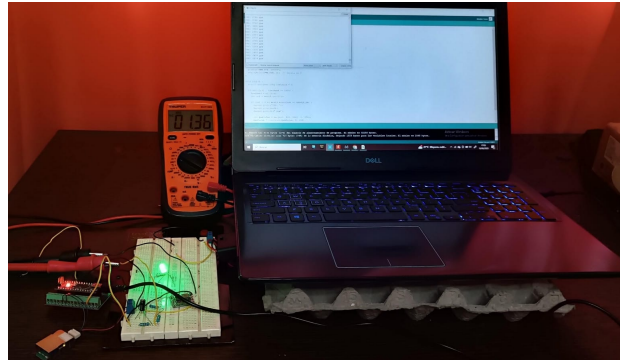


Figura 3.25: Lectura de voltaje.

La Fig. 3.26 muestra la gráfica con los datos que se obtienen al medir el voltaje mediante un multímetro y a través del puerto serial de Arduino.

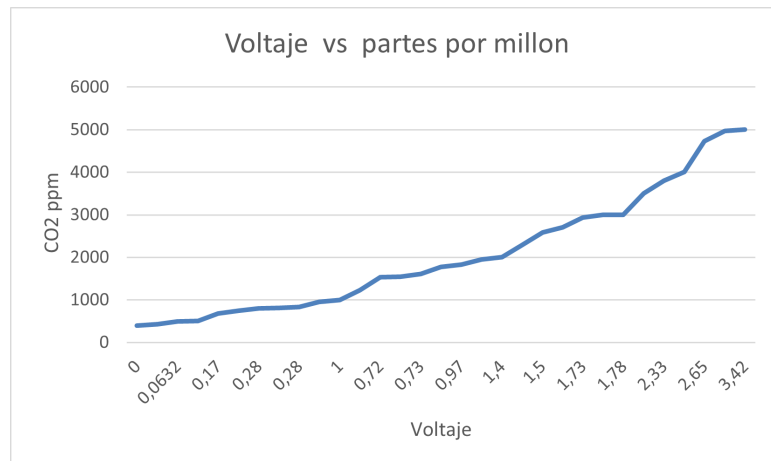


Figura 3.26: Datos Reales.

La gráfica que relaciona el voltaje con la concentración de CO_2 en ppm permite desarrollar una ecuación de conversión que facilita la decodificación de los datos.

3.10.1. Regresión Lineal

La Fig. 3.27 muestra la gráfica utilizada para determinar la ecuación de conversión para la elaboración del código.

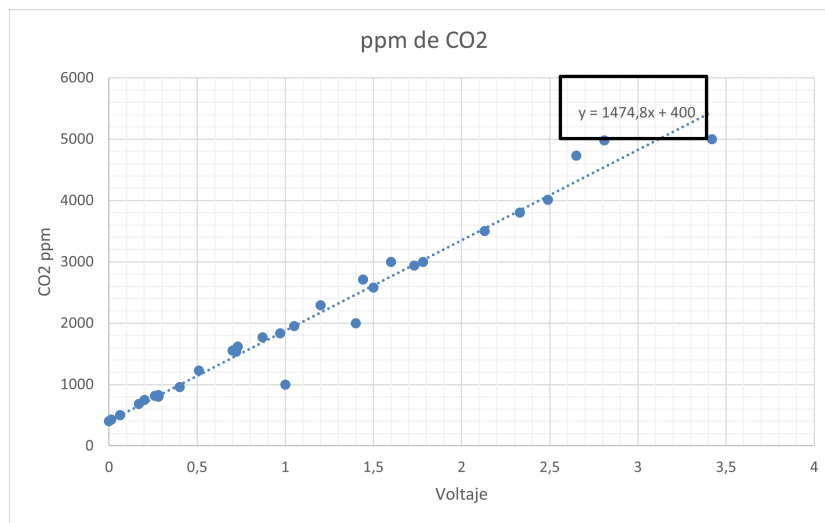


Figura 3.27: Gráfica con la ecuación para la conversión de voltaje a partes por millón.

Remplazando variables se obtiene,

$$ppm = 1474,8 \cdot V + 400, \quad (3.4)$$

donde ppm corresponde a la concentración de CO_2 en partes por millón, V es el voltaje que se recibe por el nodo, 1474,8 es la pendiente de la recta obtenida a partir de la regresión lineal, y 400 es el valor de intersección con el eje.

3.10.2. Código Decodificador en Payload

Luego de obtener la ecuación, el siguiente paso consiste en desarrollar el código que se incluye en el payload de TTN, el cual permite decodificar la información recibida.



Figura 3.28: Código para decodificación de datos.

La Fig. 3.28 presenta el código que utiliza el payload utilizado para decodificar los datos que llegan desde el sensor, como el voltaje, y convertirlos a ppm (partes por millón) véase en el Anexo D.

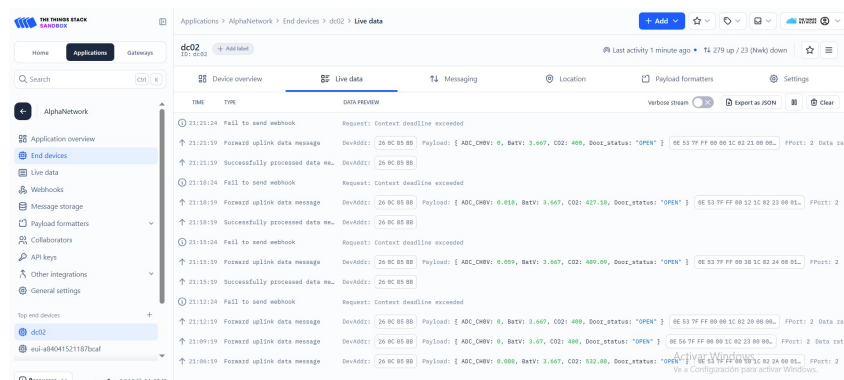


Figura 3.29: Llegada de datos desde el sensor a TTN.

La Fig. 3.29 muestra el entorno de Live Data del nodo sensor LSN50, donde se reciben los datos antes de su envío a la Webhooks.

3.11. Integración entre TTN y la Interfaz Gráfica

El Webhook permite enviar información en tiempo real a otras plataformas o sistemas, donde los datos se almacenan, se analizan y se representan mediante gráficos. Esto facilita la identificación rápida y eficiente de cualquier situación.

3.11.1. Registro en la Cuenta

El primer paso es ingresar al enlace de Datacake: <https://datacake.co>

Para registrarse y acceder al entorno de trabajo, se utilizan las credenciales correspondientes como se muestra en la Fig. 3.30.



Figura 3.30: Pagina de Datacake.

La Fig. 3.31 muestra el entorno de Datacake, donde se puede configurar y adaptar el espacio de trabajo según las necesidades del proyecto.

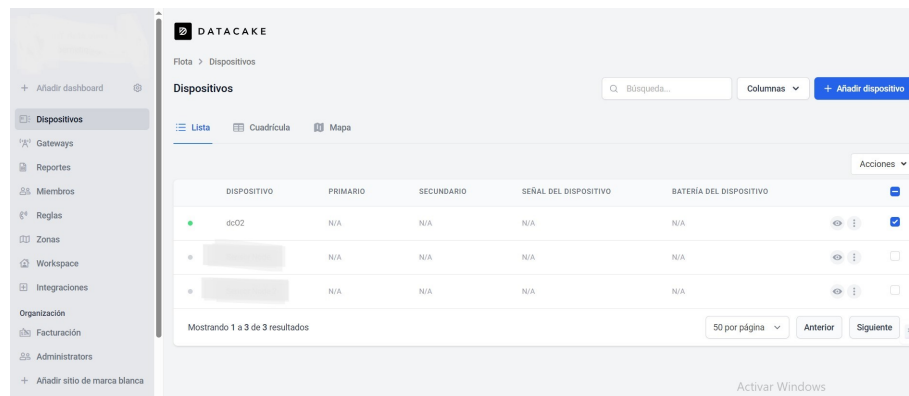


Figura 3.31: Entorno de Datacake configurable para la visualización de datos en tiempo real.

3.11.2. Registro del Dispositivo LoRawan

La Fig. 3.32 detalla los pasos que se realizan para registrar el dispositivo LoRaWAN, el primer paso es registrar como un nuevo producto de plantilla.

Añadir dispositivo LoRaWAN You can add individually billed devices. ✕

PASOS 1 Producto PASOS 2 Servidor de red PASOS 3 Dispositivos PASOS 4 Plan

Datacake producto
Puede añadir dispositivos a un producto existente en Datacake, crear un nuevo producto vacío o empezar con una de las plantillas. Los productos le permiten compartir la misma configuración (campos, dashboard y más) entre dispositivos.

Nuevo producto de plantilla
Crear nuevo producto desde una plantilla

Producto existente
Añadir dispositivos a un producto existente

Nuevo producto
Crear un nuevo producto vacío

Plantilla de dispositivo
Datacake es compatible con dispositivos LoRaWAN de distintos fabricantes sin necesidad de realizar configuraciones complejas.

LSN Todos los fabricantes

Dragino LSN50v2 Waterproof Long Range Wireless
LoRa Sensor Node
Dragino
Waterproof Long Range Wireless LoRa Sensor Node (By David Huang)

Figura 3.32: Paso para el registro del nodo sensor LSN en Datacake.

El siguiente paso es elegir el servidor de red, como muestra la Fig. 3.33, para asegurar una buena recepción de datos.

Añadir dispositivo LoRaWAN You can add individually billed devices. ✕

PASOS 1 Producto PASOS 2 Servidor de red PASOS 3 Dispositivos PASOS 4 Plan

Servidor de red
Por favor, elige el Servidor de Red LoRaWAN al que están conectados tus dispositivos.

Datacake LNS CONFIGURACIÓN AUTOMÁTICA
Empieza y amplía fácilmente con el LNS gestionado Uplinks Downlinks

The Things Stack V3
TTN V3 / Things Industries Uplinks Downlinks

Helium
Utiliza tu propia consola Uplinks Downlinks

LORIoT
Uplinks Downlinks

ChirpStack
Uplinks Downlinks

Figura 3.33: Elección del servidor.

La Fig. 3.34 muestra el paso 3 del registro, donde se colocan los datos que vienen en el mismo dispositivo como identificador único.

Añadir dispositivo LoRaWAN

You can add individually billed devices. ↗

PASOS 1 Producto PASOS 2 Servidor de red PASOS 3 Dispositivos PASOS 4 Plan

Añadir dispositivos
Proporciona uno o varios DevEUI de dispositivos LoRaWAN junto con los nombres correspondientes que deberían tener en Datacake.
Alternativamente, puedes elegir subir un archivo CSV que contenga el DevEUI, el nombre del dispositivo, la ubicación y un conjunto de etiquetas. Para obtener más información sobre cómo formatear el archivo, consulta [nuestra documentación](#).

Arrastra y suelta un archivo .csv aquí o haz clic para elegir uno

DEVEUI	NOMBRE	APPEUI	APPKEY 1.0 / NWKEY 1.1	FRECUENCIA
DevEUI 0 bytes DevEUI es un campo obligatorio	Nombre	AppEUI 0 bytes	AppKey 1.0 / 0 bytes	Selección

+ Añadir otro dispositivo

Volver Siguiente

Figura 3.34: Paso 3 del registro para colocar la identificación del dispositivo.

La Fig. 3.35 muestra los planes que ofrece Datacake para el uso del entorno gráfico de datos.

Añadir dispositivo LoRaWAN

You can add individually billed devices. ✕

PASOS 1 Producto PASOS 2 Servidor de red PASOS 3 Dispositivos PASOS 4 Plan

Individual device plans **New**

Individually billed plans

Free
0,00 € / mes

7 días de retención de datos
500 puntos de datos / día
Máx 5 por workspace
Cancelar en cualquier momento

Light
2,00 € / mes

1 mes de retención de datos
1000 puntos de datos / día
Cancelar en cualquier momento

Standard
3,00 € / mes

3 meses de retención de datos
2500 puntos de datos / día
Cancelar en cualquier momento

Plus
5,00 € / mes

12 meses de retención de datos
7500 puntos de datos / día
Cancelar en cualquier momento

¿Tienes un código?

Aplicar

Figura 3.35: Planes que ofrece Datacake para el uso del entorno.

La Fig. 3.36 muestra la sección donde se encuentra la clave API, que se utiliza para enlazar Datacake con TTN una vez que el dispositivo se registra correctamente.

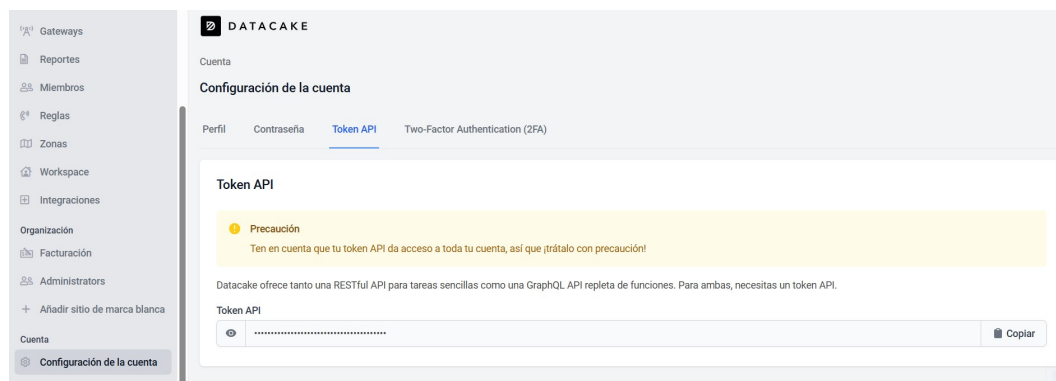


Figura 3.36: API de la cuenta.

3.11.3. Colocación de la API en TTN

La Fig. 3.37 muestra el apartado de Webhooks, donde agregamos el API correspondiente para la integración con Datacake.

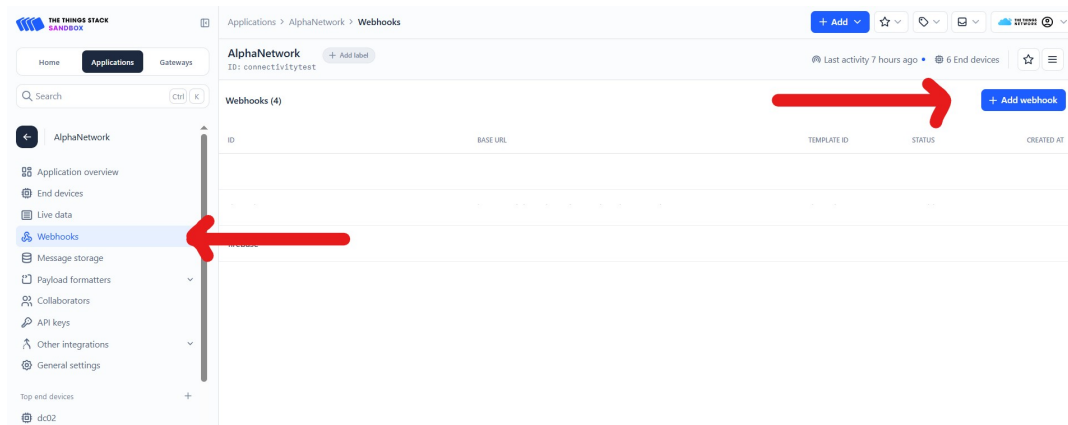


Figura 3.37: Apartado en TTN donde se ingresa el API de Datacake.

Una vez que se registra el dispositivo y se coloca la API en el webhook correspondiente, el nombre del dispositivo es visible en la interfaz de TTN, como se muestra en la Fig. 3.38.

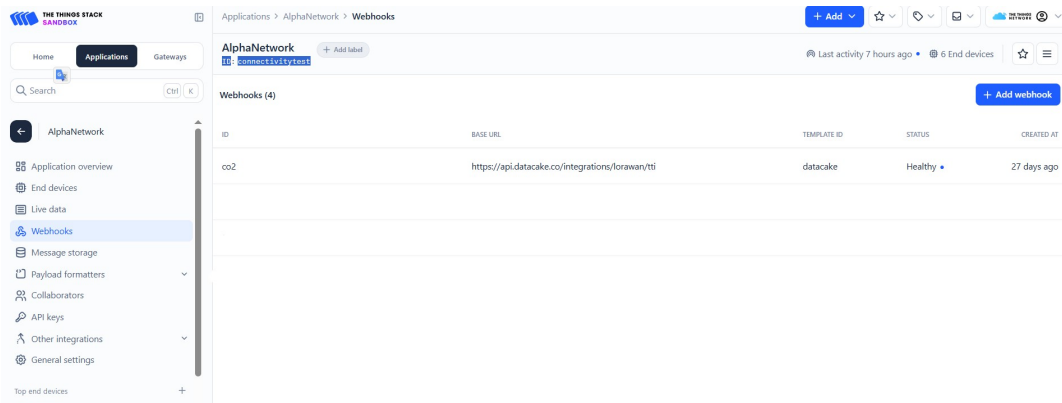


Figura 3.38: Interfaz de TTN con el nombre del dispositivo, enlasado con Datacake.

3.12. PCB

La Fig. 3.39 muestra el diseño de la PCB, basado en el esquema de conexión que se presenta en el Anexo A. Este diseño se elabora con el propósito de mantener un orden adecuado en el montaje de los componentes electrónicos, evitando el uso excesivo de cables que puedan provocar cortocircuitos, como se puede observar en el plano del Anexo B.

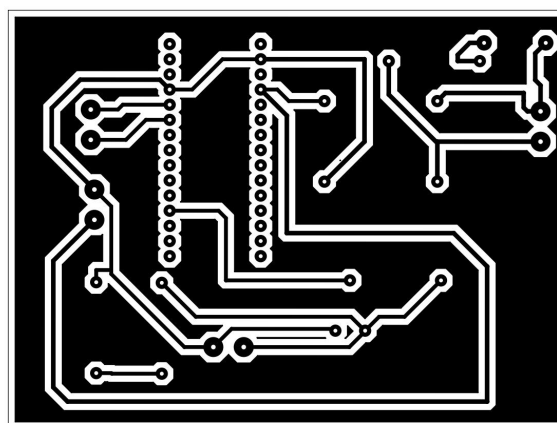


Figura 3.39: Diseño para pcb.

3.13. Caja Hermética

La elección de la caja se realiza considerando variables como el tamaño, la disponibilidad en el mercado y el tipo de protección que ofrece. Esto resulta fundamental, ya que el sensor permanece expuesto a la intemperie y la caja debe garantizar su protección frente a la lluvia y la radiación solar, como se puede ver en la Fig. 3.40.



Figura 3.40: Caja de protección

Capítulo 4

Implementación y Pruebas

En este capítulo se presenta la implementación del sistema desarrollado, así como las pruebas realizadas con el objetivo de evaluar su desempeño y precisión en condiciones reales.

4.1. Implementación del Sistema

La Fig. 4.1 muestra los componentes instalados en una caja hermética, la cual brinda protección frente a las condiciones ambientales y permite asegurar físicamente los componentes, evitando caídas o desplazamientos accidentales durante su colocación en el lugar de medición.



Figura 4.1: Caja hermética con los componentes del sistema.

4.1.1. Integración de Componentes

La Fig. 4.2 muestra el sensor de CO_2 acoplado a la caja hermética, ya que únicamente requiere estar expuesto al aire para realizar las mediciones. No es necesario que el sensor esté separado de la caja, dado que en su interior se encuentra el nodo sensor LSN50, el cual procesa los datos y establece la conexión con el gateway para la transmisión de la información.



Figura 4.2: Ubicación del sensor.

4.1.2. Área de Ubicación del Sistema

Se considera la ubicación del Gateway para asegurar su conexión a la red y garantizar la transmisión eficiente de datos. Además, otro aspecto importante para la instalación del sistema es la seguridad, por esta razón, las mediciones se realizan en las cercanías de la Universidad Técnica del Norte.

4.1.2.1. Ubicación

La Fig.4.3 muestra la Ubicación GPS del primer lugar de ubicación del sistema de medición de CO_2 , donde se puede apreciar que el Gateway se encuentra en la Universidad Técnica del Norte y el sensor en la Av. 17 de Julio.



Figura 4.3: Ubicación GPS del sensor en la primera medición.

La Fig.4.4 muestra la Ubicación GPS del segundo lugar de ubicación del sistema de medición de CO_2 , donde se puede apreciar de igual manera que el Gateway se encuentra en la Universidad Técnica del Norte y el sensor en la calle Gral. José María Cordova.

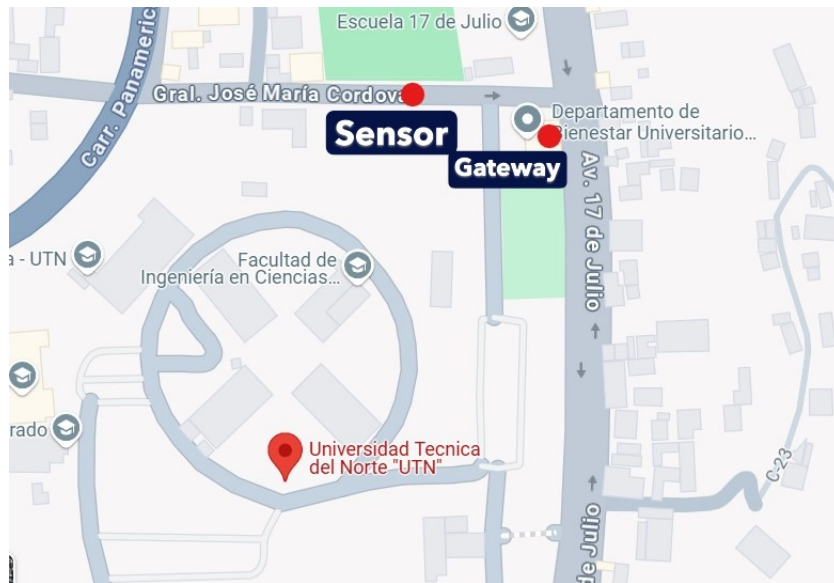


Figura 4.4: Ubicación GPS del sensor en la segunda medición.

La Fig. 4.5 muestra la colocación del sensor en la primera ubicación. Este se encuentra a una altura aproximada de 2m sobre el nivel del suelo y dentro de las instalaciones de la Universidad Técnica del Norte.



Figura 4.5: Primera ubicación del sensor para la medición.

La Fig. 4.6 muestra la colocación del sensor a una altura aproximada de 2m sobre el nivel del suelo y se encuentra dentro de las instalaciones de la Universidad Técnica del Norte.



Figura 4.6: Segunda Ubicación del sensor para la medición.

4.2. Resultados

4.2.1. Visualización de Datos en TTN y Servidor

Durante las pruebas, el sistema transmite de forma estable los datos de concentración de CO_2 desde el nodo sensor hacia el gateway, y de allí a The Things Network. La Fig. 4.7 muestra el flujo de paquetes que TTN recibe, donde se observa la decodificación de los valores transmitidos. Posteriormente, mediante el Webhooks, los datos se envían a Datacake para su visualización y análisis. Durante las mediciones, no se presentan pérdidas de datos ni interrupciones en la comunicación.

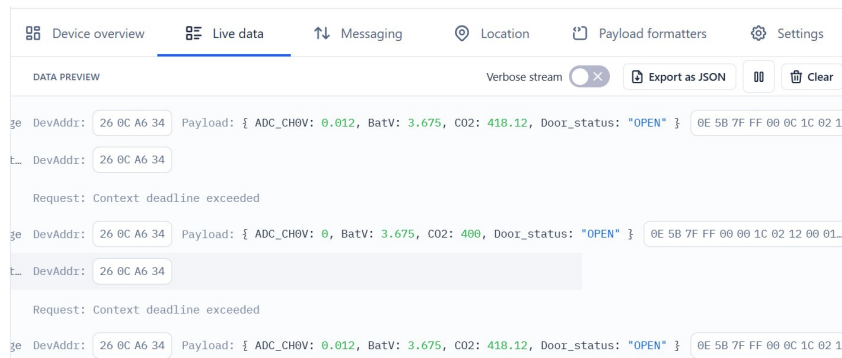


Figura 4.7: Llegada de datos a TTN.

4.2.2. Análisis de la información

Según la información consultada, en áreas abiertas los niveles de dióxido de carbono (CO_2) suelen encontrarse en un rango de 600 a 1500 ppm, siempre que la concentración se mantenga constante durante un período prolongado.

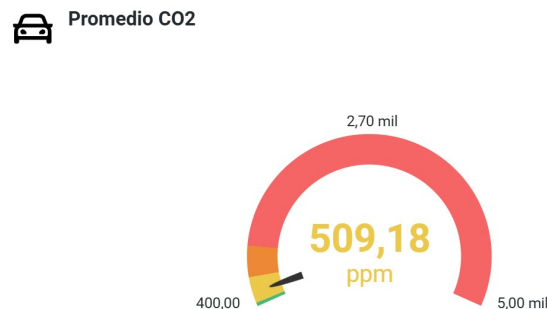


Figura 4.8: Valor promedio de la medición de CO_2 .

El promedio que se registra es de 509 ppm, como se observa en la Fig. 4.8, un valor que no representa un riesgo para la salud. Este resultado se considera apropiado, ya que durante la medición el ambiente se mantuvo con una fuerte brisa que dispersa el CO_2 .

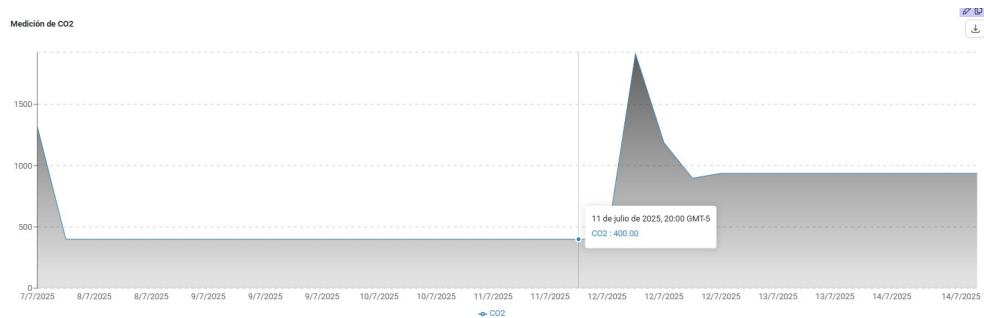


Figura 4.9: Gráfica con el registro de datos de CO_2 .

La Fig. 4.9 muestra la gráfica con los valores registrados durante la medición en las calles, donde se evidencia que los niveles de CO_2 se mantienen en 400 ppm, lo que refleja que el ambiente está limpio, ventilado y con baja acumulación de contaminantes, especialmente por las brisas constantes y la ausencia de congestión vehicular prolongada. Sin embargo, también se registran picos que demuestran momentos de alta concentración de CO_2 relacionándose con horarios de mayor tráfico como en las mañanas o con la detención vehicular durante el cambio del semáforo. Por tanto, la gráfica evidencia que el sistema es capaz de detectar tanto niveles bajos como incrementos en la concentración de CO_2 , cumpliendo con su función de monitoreo.

4.2.3. Intensidad de Señal Recibida

La Fig. 4.10 muestra los valores de RSSI (Received Signal Strength Indicator, en español, Indicador de Intensidad de Señal Recibida) que se obtienen durante las pruebas, los cuales oscilan entre -87 dBm y -78 dBm. Esto indica una intensidad de señal adecuada para garantizar la transmisión de datos en redes LoRaWAN. Estos niveles de potencia recibida evidencian que el sistema mantiene un enlace confiable durante el monitoreo en las ubicaciones seleccionadas, considerando que un RSSI de aproximadamente 120 dBm representa una señal muy débil y con alta probabilidad de pérdida de comunicación.

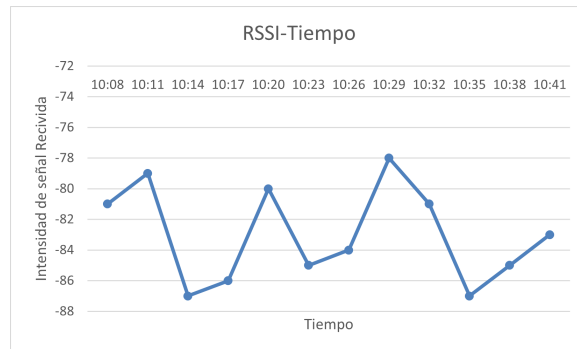


Figura 4.10: Intensidad de la señal recibida.

4.2.4. Relación Señal Ruido

La Fig. 4.11 muestra los valores de SNR (Signal-to-Noise Ratio, en español, Relación Señal-Ruido) que se obtienen durante las pruebas, los cuales oscilan entre 6.5 dB y 10.5 dB. Esto evidencia que el uso del filtro pasa-bajo en conjunto con el divisor de voltaje resulta ser un método eficaz para la transmisión de datos. Este diseño contribuye a minimizar el posible ruido y las oscilaciones que podrían ocasionar pérdidas de información. Cabe destacar que valores de SNR por encima de 0 dB indican una señal con menor presencia de interferencias, mientras que valores por debajo de 0 dB reflejan la existencia de ruido significativo y posibles pérdidas en la transmisión.

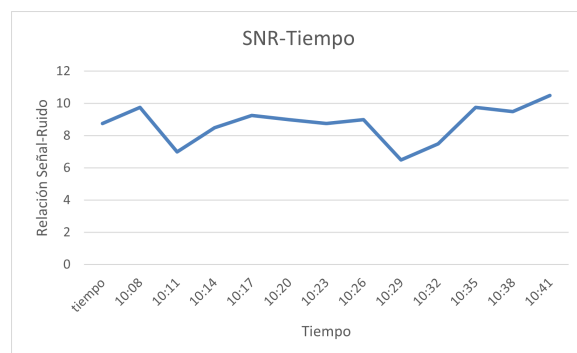


Figura 4.11: Relación Señal - Ruido.

Capítulo 5

Conclusiones, Recomendaciones y Trabajo a Futuro

5.1. Conclusiones

El sistema desarrollado para la medición de la concentración de dióxido de carbono demostró un funcionamiento adecuado. No obstante, se evidenció que factores ambientales, como la ventilación natural constante en la zona de medición, influyeron en los valores obtenidos.

Durante la investigación se analizaron diversas tecnologías para la medición de dióxido de carbono, y se identificó a la tecnología NDIR como la más adecuada para ser implementada en un sistema que utilice microprocesadores y redes de comunicación.

Se desarrolló un algoritmo que permitió la recolección y transmisión eficiente de la información a través de una red de comunicación, lo que hizo posible un sistema funcional y capaz de captar datos de dióxido de carbono (CO_2).

El uso de la tecnología LoRa en el sistema permitió una comunicación robusta y confiable, resaltando su eficacia para la transmisión de información a largas distancias con bajo consumo energético, en entornos urbanos.

El servidor utilizado demostró buena capacidad y eficiencia al momento de decodificar los datos obtenidos durante las mediciones, permitiendo su visualización en tiempo real y facilitando la interacción por parte del usuario.

5.2. Recomendaciones

El sistema cuenta con baterías individuales que permiten un funcionamiento continuo de hasta 12 horas. Sin embargo, se recomienda implementar estrategias de optimización energética, como el uso de modos de suspensión y la programación de intervalos de medición. Esto permitiría extender la autonomía del sistema.

Para garantizar la precisión de las mediciones a lo largo del tiempo, se recomienda establecer un protocolo de calibración periódica del sensor de CO_2 . Esta medida permite corregir posibles desviaciones causadas por el uso continuo o por las condiciones ambientales, asegurando así la fiabilidad de los datos obtenidos.

Actualmente, el sistema solo mide la concentración de CO_2 , se sugiere incorporar otras variables ambientales como temperatura, humedad y partículas en el aire. Esto permitiría realizar

un análisis más completo de la calidad del aire.

5.3. Trabajo a Futuro

Se planea instalar más Gateways en distintos puntos estratégicos de la ciudad con el fin de mejorar la cobertura y accesibilidad de la red LoRaWAN. Esta acción facilitará la conexión de nuevos nodos sensores sin necesidad de estar cerca de un único punto de acceso.

Además es necesario implementar medidas de seguridad adicionales, como el cifrado de extremo a extremo y la autenticación mutua entre dispositivos, con el fin de evitar pérdidas de información o accesos no autorizados.

De igual forma se recomienda comprar sensores comerciales de CO_2 con la finalidad de tener mediciones para validar la precisión y desempeño del sistema.

Bibliografía

- [1] Vecteezy, “Imagen obtenida de vecteezy,” 2024. Recuperado de [urlhttps://es.vecteezy.com/arte-vectorial/27117761-modelo-de-carbon-dioxido-co2-molecula-y-quimico-formulas-geometrico-estructuras-y-ilustracion-en-blanco-antecedentes-educativo-y-estudiar-contenido-de-quimica-estudiantes-vector-ilustracion](https://es.vecteezy.com/arte-vectorial/27117761-modelo-de-carbon-dioxido-co2-molecula-y-quimico-formulas-geometrico-estructuras-y-ilustracion-en-blanco-antecedentes-educativo-y-estudiar-contenido-de-quimica-estudiantes-vector-ilustracion).
- [2] C. de Tránsito del Ecuador, “Contaminación ambiental,” 2024. Recuperado de [urlhttps://www.facebook.com/100057167841365/posts/994889641365900/](https://www.facebook.com/100057167841365/posts/994889641365900/).
- [3] A. de protección ambiental de Estados Unidos, “Emisiones de dióxido de carbono,” 2024. Recuperado de [urlhttps://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/emisiones-de-dioxido-de-carbono?.com](https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/emisiones-de-dioxido-de-carbono?com).
- [4] Expreso, “Señor transportista, ya no me fumigue más por favor,” 2022. Recuperado de [urlhttps://www.expreso.ec/guayaquil/senor-transportista-me-fumigue-favor-139743.html](https://www.expreso.ec/guayaquil/senor-transportista-me-fumigue-favor-139743.html).

- [5] GitHub, 2024. Recuperado de url<https://github.com/Erriez/ErriezMHZ19B?tab=readme-ov-file>.
- [6] Figaro, “Air quality sensor,” 2018. Recuperado de <https://www.figarosensor.com/product/entry/tgs2600.html>.
- [7] Alibaba, “Sensor de detección de co electroquímica industrial, 0-1000ppm, sensor de monóxido de carbono, alphasense co-b4 gas,” 2025. Recuperado de https://www.alibaba.com/product-detail/Industrial-electrochemical-CO-detect-range-0_1600437609930.html.
- [8] B. Digital, “Empezando a trabajar con lorawan,” 2021. Recuperado de <https://becolve.com/blog/empezando-a-trabajar-con-lorawan-iii/>.
- [9] T. things Networks, “Arquitectura lorawan,” s.f. Recuperado de url<https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/architecture/>.
- [10] A. IoT, “The things network (ttn), una red iot global para la sociedad,” 2024. Recuperado de <https://alfaiot.com/iot/the-things-network-ttn-una-red-iot-global-para-la-sociedad/>.
- [11] T. T. STACK, “Arquitectura,” s.f. Recuperado de url<https://www.thethingsindustries.com/docs/concepts/architecture/>.

- [12] Winsen, “Módulo de dióxido de carbono ndir mh-z19c,” 2024. Recuperado de <https://www.winsen-sensor.com/d/files/MH-Z19C.pdf>.
- [13] Dragino, “Manual de usuario del nodo lorawan lsn50 y lsn50-v2,” 2024. Recuperado de <https://wiki.dragino.com/xwiki/bin/view/Main/User>
- [14] G. de las Casas Camara, “Un paso atrás en la contaminación del aire: novedades en automoción,” *ScienceDirect*, 2015.
- [15] Z. Andersen and et al., “Aire limpio para pulmones sanos: un llamamiento urgente a la acción: posición de la sociedad respiratoria europea ante el lanzamiento de las directrices de calidad del aire de la oms para 2021,” *European Respiratory journal*, 2021.
- [16] Ministerio del ambiente Agua y Transición Ecológica, “Mae trabaja en programas de mitigación y adaptación para reducir emisiones de co2 en ecuador.” Consultado el 5 de agosto de 2024.
- [17] El Comercio, “Emisiones de combustible de mala calidad afectan el ambiente y salud de las personas.” Consultado el 5 de agosto de 2024.
- [18] C. Argumedo and J. Fagundo, “Caracterización química de material particulado pm en la atmosfera de riohacha-la guajira colombia,” *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*

- llo, vol. 17, no. 1, pp. 5–16, 2017.
- [19] K. Muentes and et al., “Factores determinantes de las emisiones de co2 en los sectores industrial y transporte en ecuador,” *Rev. Científica. Ciencias Naturales Ambiente*, vol. 16, no. 2, pp. 370–376, 2022.
- [20] IEEE, “Performance evaluation of multi-hop lorawan,” *IEEE*, 2023.
- [21] M. Nowak and et al, “Data processing with predictions in lorawan,” *Sensors*, vol. 16, no. 1, 2023.
- [22] V. Asteriou, K. Kantelis, G. Beletsioti, A. Valkanis, P. Nicopolitidis and G. Papadimitriou, “Adaptive spatial scheduling for event traffic in lorawan networks,” *Sensors*, vol. 7, no. 24, 2024.
- [23] G. Di Renzone, S. Parrino, G. Peruzzi, A. Pozzebon and L. Vangelista, “Lorawan for vehicular networking: Field tests for vehicle-to-roadside communication,” *Sensors*, vol. 6, no. 24, 2024.
- [24] R. Marini and et al, “A flexible simulator for lorawan networks,” *Sensors*, 2021.
- [25] F. Portmann, “Experimental evaluation of lorawan in ns-3,,” *IEEE*, 2019.

- [26] L. Al-Awami, “Network-coding-based forwarding for lorawan,” *Proceedings of the International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC 2022)*, 2022.
- [27] S. Hosseinzadeh, M. Ashawa, N. Owoh, H. Larijani and K. Curtis, “Explainable machine learning for lorawan link budget,” *Sensors*, vol. 3, no. 24, 2024.
- [28] S. Ragavan, “Location, location, location: Iot design with lorawan for asset tracking,” septiembre 2023. Consultado el 8 de agosto de 2024.
- [29] R. Fuentes, E. Ramos and O. Alexander, “Desarrollo de una plataforma de monitoreo para una red de dispositivos iot empleando tecnología lorawan,” *Journal Boliviano de Ciencias*, vol. 18, no. 53, pp. 6–25, 2022.
- [30] J. Sánchez, M. Guerrero, L. Mona, O. Jácome and A. Velasco, “Monitoreo de temperatura y humedad ambiental con lorawan: Iot en el desafío energético y el cambio climático,” *IPSUMTEC*, vol. 6, no. 5, pp. 60–67, 2023.
- [31] D. Polovida, “Lorawan technology and iot service platform in mobile operator networks,” *Zbornik Radova Fakulteta tehničkih nauka*, vol. 36, no. 6, pp. 1–3, 2024.

- [32] M. Ojo, I. Viola, S. Miretti, E. Martignani, S. Giordano and M. Baratta, “A deep learning approach for accurate path loss prediction in lorawan livestock monitoring,” *Sensors*, vol. 10, no. 24, 2024.
- [33] J. Haxhibeqiri, E. De Poorter, I. Moerman and J. Hoebeke, “A survey of lorawan for iot: From technology,” *Sensors*, vol. 18, no. 11, p. 3995, 2018.
- [34] M. Arroyo and A. Ramírez, “Dióxido de carbono, sus dos caras,” *Anales de Química*, vol. 116, no. 2, pp. 81–87, 2020.
- [35] Y. Benito, “Guía específica de trabajo sobre CO_2 y cambio climático,” 2016.
- [36] O. M. de la Salud, “Contaminación del aire ambiental (exterior),” 2024. Recuperado de [urlhttps://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health).
- [37] dimaco, “Medidores de dióxido de carbono,” 2024. Recuperado de [urlhttps://dimaco.es/todo-sobre-los-medidores-de-co2/](https://dimaco.es/todo-sobre-los-medidores-de-co2/): :text=Entre
- [38] ESHG, “Carbon dioxide health hazard information sheet,” s.f. Recuperado de [url https://www.fsis.usda.gov/sites/default/files/media_file/2020-08/Carbon-Dioxide.pdf](https://www.fsis.usda.gov/sites/default/files/media_file/2020-08/Carbon-Dioxide.pdf) : :text = such

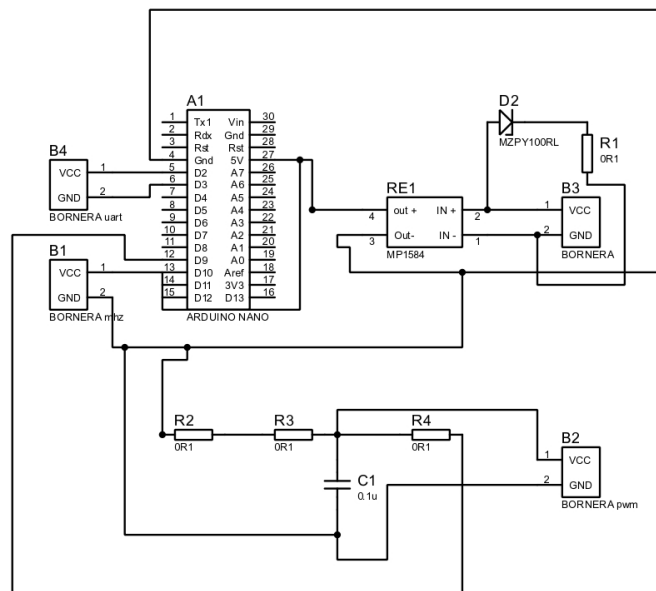
- [39] U. Raza, P. Kulkarni, and M. Sooriyabandara, “Low power wide area networks: An overview,” *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 19, no. 2, pp. 855–873, 2017.
- [40] Mahmood A. Al-Shareeda, Abeer Abdullah Alsadhan Hamzah H. Qasim and S. Manickam, “Long range technology for internet of things: review, challenges, and future directions,” *beei*, vol. 12, no. 6, pp. 3758–3767, 2023.
- [41] C. Garrido and K. Grochla, “Recent advances in low power wide area networks (lpwan) and long range (lora) network,” *sensors*, 2024.
- [42] CatSensors, “Tecnología lora y lorawan,” 2024. Recuperado de <https://www.catsensors.com/es/lorawan/tecnologia-lora-y-lorawan>.
- [43] T. things Networks, “Clases de dispositivos,” s.f. Recuperado de [urlhttps://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/classes/](https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/classes/).
- [44] T. thing Stack, “Software de red lorawan® simple, flexible, escalable y seguro.,” 2025. Recuperado de <https://www.thethingsindustries.com/stack/>.
- [45] H. Schneider and J. Samaniego, “La huella del carbono en la producción, distribución y consumo de bienes y servicios,” *CEPAL*, 2010.

[46] Pixabay, “Imágenes gratis de industrialización,” 2024. Recuperado de
[urlhttps://pixabay.com/es/images/search/industrializaci](https://pixabay.com/es/images/search/industrializaci)

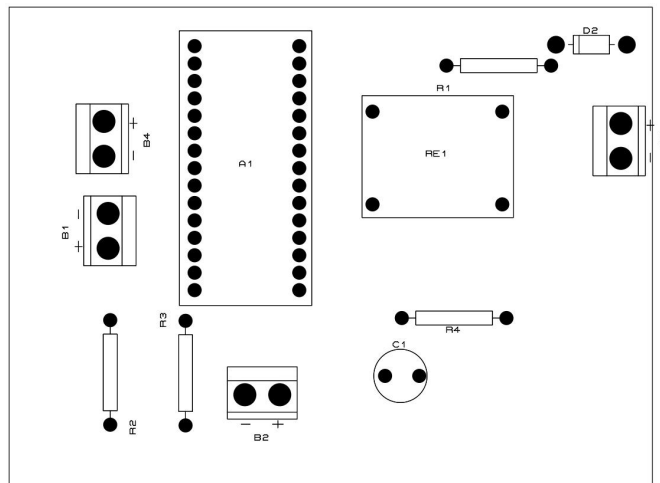
Anexos

Anexos

A. Circuito Esquemático del Montaje



B. Plano PCB



C. Código Arduino

```
#include <SoftwareSerial.h>

#include <MHZ19.h>


#define RX_PIN 2    //

#define TX_PIN 3


#define PWM_PIN 9    // PWM en pin


SoftwareSerial mhzSerial(RX_PIN, TX_PIN);


MHZ19 mhz19;


void setup() {

    Serial.begin(9600);


    mhzSerial.begin(9600);
```



```

    mhz19.begin(mhzSerial);

    mhz19.autoCalibration();

    pinMode(PWM_PIN, OUTPUT);

    analogWrite(PWM_PIN, 0); // Inicia en 0
}

void loop() {

    static unsigned long lastRead = 0;

    if (millis() - lastRead >= 1000) {

        lastRead = millis();
    }
}

```

```
int co2 = mhz19.getCO2();

if (co2 > 0 && mhz19.errorCode == RESULT_OK) {

    Serial.print("CO2: ");

    Serial.print(co2);

    Serial.println(" ppm");

    int pwmValue = map(co2, 400, 5000, 0, 255);

    pwmValue = constrain(pwmValue, 0, 255);

    analogWrite(PWM_PIN, pwmValue);

    // PWM directo
```

}

}

}

D. Código Payload

```
function decodeUplink(input) {  
  
    var bytes = input.bytes;  
  
    var decode = {};  
  
    // Bateria  
  
    decode.BatV = ((bytes[0] << 8) | bytes[1]) / 1000;  
  
    // Voltaje del canal ADC_CH0V  
  
    decode.ADC_CH0V = ((bytes[4] << 8) | bytes[5]) / 1000;  
  
    // CO2 en ppm  
  
    decode.CO2 = parseFloat((1510 * decode.ADC_CH0V + 400).toFixed(2));  
  
    // Estado de puerta  
  
    decode.Door_status = (bytes[6] & 0x80) ? "CLOSE" : "OPEN";  
}
```

```
return {  
  data: decode  
};  
}
```