



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS, ELECTRÓNICA E
INDUSTRIAL**

CARRERA DE TELECOMUNICACIONES

Tema:

**SISTEMA DE MONITOREO INALÁMBRICO DE FACTORES QUÍMICOS
PARA LA EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE EN LA
PARROQUIA SANTA ROSA**

Trabajo de titulación modalidad Proyecto de Investigación, presentado previo a la
obtención del título de Ingeniera en Telecomunicaciones

ÁREA: Comunicaciones

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: Tecnología de la información y Sistemas de
control

AUTOR: Dennisse Lizeth Naranjo Altamirano

TUTOR: Dr. Jaime Rodrigo Guilcapi Mosquera, Mg.

Ambato - Ecuador

febrero - 2024

APROBACIÓN DEL TUTOR

En calidad de tutor del trabajo de titulación con el tema: SISTEMA DE MONITOREO INALÁMBRICO DE FACTORES QUÍMICOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE EN LA PARROQUIA SANTA ROSA, desarrollado bajo la modalidad Proyecto de Investigación por la señorita Dennisse Lizeth Naranjo Altamirano, estudiante de la Carrera de Telecomunicaciones, de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, de la Universidad Técnica de Ambato, me permito indicar que la estudiante ha sido tutorada durante todo el desarrollo del trabajo hasta su conclusión, de acuerdo a lo dispuesto en el Artículo 17 del Reglamento para la Titulación de Grado en la Universidad Técnica de Ambato y el numeral 6.3 del instructivo del reglamento referido.

Ambato, febrero 2024.

Dr. Jaime Rodrigo Guilcapi Mosquera, Mg.
TUTOR

AUTORÍA

El presente trabajo de titulación con el tema: SISTEMA DE MONITOREO INALÁMBRICO DE FACTORES QUÍMICOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE EN LA PARROQUIA SANTA ROSA es absolutamente original, auténtico y personal y ha observado los preceptos establecidos en la Disposición General Quinta del Reglamento para la Titulación de Grado en la Universidad Técnica de Ambato. En tal virtud, el contenido, efectos legales y académicos que se desprenden del mismo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Ambato, febrero 2024.



Dennisse Lizeth Naranjo Altamirano

C.C. 1805242573

AUTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato para que reproduzca total o parcialmente este trabajo de titulación dentro de las regulaciones legales e institucionales correspondientes. Además, cedo todos mis derechos de autor a favor de la institución con el propósito de su difusión pública, por lo tanto, autorizo su publicación en el repositorio virtual institucional como un documento disponible para la lectura y uso con fines académicos e investigativos de acuerdo con la Disposición General Cuarta del Reglamento para la Titulación de Grado en la Universidad Técnica de Ambato.

Ambato, febrero 2024.



Dennisse Lizeth Naranjo Altamirano

C.C. 1805242573

AUTOR

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

En calidad de par calificador del informe final del trabajo de titulación presentado por la señorita Dennisse Lizeth Naranjo Altamirano, estudiante de la Carrera de Telecomunicaciones, de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, bajo la Modalidad Proyecto de Investigación, titulado SISTEMA DE MONITOREO INALÁMBRICO DE FACTORES QUÍMICOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE EN LA PARROQUIA SANTA ROSA, nos permitimos informar que el trabajo ha sido revisado y calificado de acuerdo al Artículo 19 del Reglamento para la Titulación de Grado en la Universidad Técnica de Ambato y el numeral 6.4 del instructivo del reglamento referido. Para cuya constancia suscribimos, conjuntamente con la señora Presidente del Tribunal.

Ambato, febrero 2024.

Ing. Elsa Pilar Urrutia Urrutia, Mg.
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Ing. Geovanni Brito Moncayo Mg.
PROFESOR CALIFICADOR

Ing. Patricio Córdova Córdova Mg.
PROFESOR CALIFICADOR

DEDICATORIA

Con amor y respeto, dedico el presente trabajo de titulación a quienes han sido motivación en mi camino hacia el conocimiento y crecimiento personal:

A Dios, mi constante fuente de sabiduría y guía inquebrantable durante esta etapa académica, otorgándome la perspicacia para sortear desafíos, la fortaleza para persistir y el discernimiento para alcanzar el logro anhelado.

A mis padres y hermanos, quienes con su amor incondicional y apoyo constante han sido la brújula que ha guiado mi trayectoria académica, demostrándome que con esfuerzo y dedicación se puede superar cualquier obstáculo.

A mis amigos, cómplices de risas, confidentes en momentos de duda y compañeros en esta emocionante travesía académica. Su presencia ha convertido cada desafío en una oportunidad para crecer y aprender juntos.

Dennisse Lizeth

AGRADECIMIENTO

Con gratitud infinita y el corazón rebosante de emociones, agradezco a quienes han sido guías en mi sendero hacia el desarrollo personal y adquisición de conocimiento:

A Dios, fuente de sabiduría infinita, por iluminar mi camino y otorgarme la inteligencia y discernimiento para llevar a cabo esta investigación.

A mis padres y hermanos por su inquebrantable respaldo, sus sabios consejos y ser la fuerza motivadora que impulsó la consecución de mis objetivos.

A la Universidad Técnica de Ambato, con especial reconocimiento a la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, así como a la carrera de Telecomunicaciones, por proporcionar el sólido bagaje de conocimientos para mi desarrollo en el ámbito profesional.

A mis queridos amigos y estimados docentes. Su constante apoyo, orientación certera y valiosas contribuciones han sido fundamentos indispensables en mi trayectoria académica y personal.

Dennisse Lizeth

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

PORTADA	i
APROBACIÓN DEL TUTOR	ii
AUTORÍA	iii
DERECHOS DE AUTOR	iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTO	vii
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS	viii
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
ÍNDICE DE ANEXOS	xv
RESUMEN EJECUTIVO	xvi
ABSTRACT	xvii
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO	1
1.1 Tema de investigación	1
1.1.1 Planteamiento del problema	1
1.2 Antecedentes investigativos	4
1.3 Fundamentación teórica	6

1.3.1 Contaminación Ambiental	6
1.3.2 Principales factores químicos contaminantes.....	8
1.3.3 Rangos de los compuestos químicos.....	11
1.3.4 Tecnologías de comunicación inalámbrica	13
1.3.5 Protocolos de mensajería ligera	14
1.3.6 Sensores de factores químicos en el aire.....	15
1.3.7 Sistemas electrónicos comerciales de monitoreo de la calidad del aire.....	15
1.4 Objetivos	17
1.4.1 Objetivo general.....	17
1.4.2 Objetivos específicos	17
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA	18
2.1 Materiales.....	18
2.2 Métodos.....	19
2.2.1 Modalidad de la investigación	19
2.2.2 Recolección de información.....	19
2.2.3 Procesamiento y análisis de datos	21
CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	22
3.1 Requerimiento del sistema	22
3.2 Esquema general del sistema	24
3.3 Diseño del prototipo.....	26

3.3.1 Selección de los dispositivos.....	26
3.3.2 Diseño de la placa de control	32
3.3.3 Construcción del prototipo.....	38
3.3.4 Pruebas de funcionamiento	55
3.3.5 Análisis de datos	61
3.3.6 Presupuesto	76
CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	78
4.1 Conclusiones	78
4.2 Recomendaciones.....	79
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80
ANEXOS.....	84

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Rangos y efectos de los compuestos químicos	12
Tabla 2. Resumen de rangos mínimos, máximos y peligrosos de los distintos compuestos químicos	13
Tabla 3. Sistemas electrónicos comerciales de monitoreo de la calidad del aire.....	16
Tabla 4. Materiales implementados en el sistema de monitoreo	18
Tabla 5. Características de la Parroquia de Santa Rosa	22
Tabla 6. Factores químicos seleccionados para el monitoreo	24
Tabla 7. Características de sensores comerciales.....	27
Tabla 8. Características de las tecnologías de comunicación inalámbricas	28
Tabla 9. Características de los microcontroladores con tecnología LoRa	29
Tabla 10. Características de los microcontroladores para el servidor.....	30
Tabla 11. Características de los protocolos de mensajería.....	31
Tabla 12. Rangos considerados para los sensores.....	55
Tabla 13. Valores capturados por los sensores	56
Tabla 14. Valor de la varianza de NO ₂ ; NO; SO ₂ ; CO; CO ₂ ; O ₃	63
Tabla 15. Valores de ACF de NO ₂	65
Tabla 16. Valores de ACF de NO	66
Tabla 17. Valores de ACF de SO ₂	67
Tabla 18. Valores de ACF de CO	68
Tabla 19. Valores de ACF de CO ₂	69

Tabla 20. Valores de ACF de O ₃	70
Tabla 21. Gastos investigativos.....	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema general del sistema inalámbrico.....	25
Figura 2. Diseño esquemático del nodo maestro	33
Figura 3. Diseño esquemático del nodo esclavo	33
Figura 4. Convertidores Analógicos - Digitales.....	34
Figura 5. Generación de filtrado	35
Figura 6. Conexión directa a puertos con ADC	36
Figura 7. Cara superior del diseño de PCB	37
Figura 8. Cara inferior del diseño de PCB	37
Figura 9. Circuito impreso	38
Figura 10. Diseño 3D del prototipo.....	39
Figura 11. Prototipo físico.....	39
Figura 12. Soldadura de los componentes.....	40
Figura 13. Estuche del dispositivo	41
Figura 14. Distancia entre nodos.....	42
Figura 15. Ubicación de los dispositivos	43
Figura 16. Diagrama de flujo	44
Figura 17. Estructura de lectura de la base de datos	50
Figura 18. Diseño de la interfaz	51
Figura 19. Ingreso del Sistema.....	52
Figura 20. Visualización de datos por Factor Químico.....	52

Figura 21. Valores de aumento, relación normal y error	53
Figura 22. Nivel de presencia por factor químico.....	54
Figura 23. Historial de medición.....	54
Figura 24. Función de autocorrelación para NO ₂	65
Figura 25. Función de autocorrelación para NO.....	66
Figura 26. Función de autocorrelación para SO ₂	67
Figura 27. Función de autocorrelación para CO	68
Figura 28. Función de autocorrelación para CO ₂	69
Figura 29. Función de autocorrelación para O ₃	70
Figura 30. Histograma de NO ₂	71
Figura 31. Histograma de NO	72
Figura 32. Histograma de SO ₂	73
Figura 33. Histograma de CO	74
Figura 34. Histograma de CO ₂	75
Figura 35. Histograma de O ₃	76

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A. Datasheet del sensor MQ-4.....	84
Anexo B. Datasheet del sensor MQ-7.....	85
Anexo C. Datasheet del sensor MQ-8.....	86
Anexo D. Datasheet del sensor MQ-9.....	87
Anexo E. Datasheet del sensor MQ-811	88
Anexo F. Datasheet de Lilygo LoRa32 915 MHz Esp 32.....	89
Anexo G. Ubicación de los dispositivos	90
Anexo H. Código de programación del microcontrolador.....	91

RESUMEN EJECUTIVO

El sistema de monitoreo inalámbrico de factores químicos para la evaluación de la contaminación del aire en la parroquia Santa Rosa proporciona una solución efectiva y versátil para evaluar la calidad del aire. La implementación de sensores especializados ha permitido mediciones precisas de factores químicos, construyendo un sistema robusto y escalable de monitoreo en tiempo real.

La infraestructura de red inalámbrica ha facilitado la transmisión eficiente de datos desde los sensores hasta un centro de control, optimizando la movilidad de los nodos. La adopción de la tecnología LoRa al igual que el microcontrolador ESP32 ha demostrado ser acertada, proporcionando conectividad confiable y eficiente a largas distancias, incluso en entornos urbanos. La implementación de un servidor en la nube ha optimizado el almacenamiento y accesibilidad de datos, facilitando el análisis y la toma de decisiones.

La seguridad del protocolo y el enfoque de bajo consumo energético han contribuido significativamente a la integridad y autonomía operativa del sistema. La escalabilidad del proyecto sienta la base para una futura expansión gradual, adaptándose a diferentes entornos y necesidades cambiantes.

El análisis estadístico del sistema tiene como finalidad rescatar y procesar los datos utilizando el software Minitab, para analizar la información proveniente de los sensores, identificando patrones y relaciones significativas. El enfoque estadístico contribuyó a una comprensión más profunda de los patrones de contaminación y respalda a la toma de decisiones informada para mejorar la calidad del aire en la parroquia Santa Rosa.

Palabras clave: Monitoreo inalámbrico, factores químicos, contaminación del aire, tecnología LoRa, seguridad de protocolos.

ABSTRACT

"The wireless monitoring system for chemical factors in assessing air pollution in the parish of Santa Rosa provides an effective and versatile solution for evaluating air quality. The implementation of specialized sensors has enabled precise measurements of chemical factors, constructing a robust and scalable real-time monitoring system.

The wireless network infrastructure has facilitated efficient data transmission from the sensors to a control center, optimizing node mobility. The adoption of LoRa technology, along with the ESP32 microcontroller, has proven successful, providing reliable and efficient connectivity over long distances, even in urban environments. The deployment of a cloud server has optimized data storage and accessibility, facilitating analysis and decision-making.

The protocol security and low-energy consumption approach have significantly contributed to the integrity and operational autonomy of the system. The scalability of the project lays the foundation for future gradual expansion, adapting to different environments and changing needs.

The statistical analysis of the system aims to retrieve and process data using Minitab software to analyze information from sensors, identifying patterns and meaningful relationships. This statistical approach has contributed to a deeper understanding of pollution patterns and supports informed decision-making to improve air quality in the Santa Rosa parish.

Keywords: Wireless monitoring, chemical factors, air pollution, LoRa technology, protocol security.

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

1.1 Tema de investigación

SISTEMA DE MONITOREO INALÁMBRICO DE FACTORES QUÍMICOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE EN LA PARROQUIA SANTA ROSA

1.1.1 Planteamiento del problema

La contaminación del aire es un problema ambiental global que afecta la salud humana, la vida silvestre y el medio ambiente. La medición de la contaminación del aire es esencial para comprender la magnitud del problema y desarrollar estrategias para mitigarlo. Los sistemas de monitoreo de la contaminación del aire tradicionales suelen ser costosos, requieren una gran cantidad de mantenimiento y son difíciles de implementar en áreas remotas. Los sistemas de monitoreo inalámbrico ofrecen una alternativa más asequible, eficiente y adaptable a las necesidades requeridas para el usuario.

En la actualidad, la preocupante realidad es que 9 de cada 10 personas a nivel mundial respiran aire contaminado, siendo las naciones de renta baja y mediana las más afectadas. Los principales culpables de la situación son los sectores doméstico, industrial, eléctrico, de transporte y agrícola. La quema de combustibles fósiles es la principal responsable de la problemática, representando el 95 % del combustible utilizado en el transporte a nivel global. A su vez, otras actividades humanas como la incineración de desechos, los incendios forestales, las tormentas de polvo y las erupciones volcánicas también contribuyen significativamente a la contaminación del aire. La compleja red de fuentes de contaminación requiere medidas integrales y urgentes para salvaguardar la salud de la población y preservar nuestro entorno [1].

El desarrollo de las actividades primarias y secundarias ha experimentado un progreso positivo a nivel global, eliminando limitaciones y elevando la calidad de vida. No obstante, el avance también ha desencadenado fenómenos adversos, destacándose el aumento del parque automotor y la constante expansión de nuevas vías. A pesar de los

esfuerzos destinados a la construcción de carreteras adicionales, persiste un desafío significativo: la congestión vehicular. El fenómeno no solo contribuye a la contaminación ambiental, sino que también representa una amenaza para la salud humana. Es imperativo abordar de manera integral los problemas asociados al crecimiento urbano y al transporte, implementando estrategias sostenibles que mitiguen los impactos negativos y promuevan un equilibrio armonioso entre el desarrollo y la preservación del entorno [2].

La quema de combustibles fósiles es considerada como la principal fuente de contaminación del aire exterior. El problema se ve agravado por el imparable crecimiento urbano, una tendencia en aumento; se proyecta que para el año 2050, dos tercios de la población mundial residirá en áreas urbanas. La planificación urbana deficiente y el crecimiento desmedido de medios de transporte privados constituyen contribuyentes cruciales a las emisiones urbanas. Sorprendentemente, los medios de transporte siguen dependiendo en gran medida de combustibles fósiles, un factor que intensifica aún más la problemática de la contaminación atmosférica. Es esencial abordar las cuestiones con una planificación urbana más sostenible y la promoción de alternativas de transporte más limpias y eficientes [3].

El monóxido de carbono y la actividad minera son los principales causantes de la contaminación del aire en la ciudad de Ambato. Según el monitoreo de la Dirección de Ambiente del Municipio Ambato, la ciudad maneja una buena calidad de aire desde 2018. Pero en los datos arrojados en 2020-2021, en seis sectores tendrían una realidad diferente y contarían con una mala calidad de aire. Las zonas rurales, además, del centro urbano de Ambato, son los espacios con mayor contaminación por la presencia de curtiembres, centros de acopio y el parque automotor, según el informe municipal [4].

El parque automotor se considera como uno de los principales culpables de la degradación ambiental, la contaminación atmosférica y el calentamiento global del planeta. El impacto negativo se deriva del hecho de que los motores de los vehículos funcionan predominantemente con combustibles fósiles, generando, durante su combustión, monóxido de carbono. El gas no solo contribuye al calentamiento global como uno de los agentes responsables del efecto invernadero, sino que también

representa una amenaza directa para la salud humana. La presencia elevada de monóxido de carbono en el aire puede desencadenar reacciones alérgicas, agotamiento físico y diversas enfermedades respiratorias, así como problemas más graves como trombosis, coágulos e infartos. Ante el panorama, la necesidad de transitar hacia formas de transporte más limpias y sostenibles se vuelve imperativa para salvaguardar tanto nuestro entorno como nuestra salud [5].

La deforestación está dentro de los diez grandes problemas del ambiente que tiene el planeta al momento, se podría pensar que es una dificultad que también tenemos los humanos, porque la deforestación se relaciona con otras problemáticas tales como la extinción de especies, inundaciones, erosión y contaminación de la atmósfera. La presencia de árboles produce oxígeno nuevo y capta dióxido de carbono para asegurar su biomasa y formar las ramas, el tronco y las hojas; la otra parte la guardan. Cuando los árboles se talan, el carbono en su estructura se libera y se convierte en una fuente de CO₂, uno de los gases de efecto invernadero, (20 % de emisiones anuales de gases) que causa el aumento de la temperatura global de la tierra [6].

La instauración de un sistema de monitoreo inalámbrico de factores químicos se convierte en una herramienta esencial para enfrentar la problemática de la contaminación en la parroquia Santa Rosa. El sistema no solo posibilita la recopilación de datos valiosos y actualizados sobre los niveles de contaminación química en la zona, sino que también facultaría la implementación de medidas preventivas para resguardar la salud de la población local y preservar el equilibrio medioambiental.

No obstante, para alcanzar una solución a largo plazo, resulta crucial abordar las causas fundamentales de la contaminación química. En donde se destaca la actividad industrial y la quema de combustibles fósiles. Actuar sobre los factores subyacentes no solo mitigará los efectos de la contaminación, sino que también sentará las bases para un entorno más saludable y sostenible en la parroquia Santa Rosa.

1.2 Antecedentes investigativos

Se han llevado a cabo numerosas investigaciones relacionadas con los sistemas de monitoreo de la calidad del aire en áreas urbanas, tomando en consideración los avances más significativos en el desarrollo de un sistema que pueda proporcionar información precisa sobre la concentración de factores químicos en la atmósfera.

En la investigación presentada por López D. y Mena E. titulada "Diseño e implementación de una red de sensores inalámbricos fijos y móviles para la monitorización de la calidad de aire y condiciones ambientales", llevaron a cabo un estudio en la ciudad de Quito en el año 2021. En dicho estudio, se propuso el uso de una red de sensores y el protocolo MQTT para establecer una red de sensores inalámbricos fijos y móviles con el objetivo de monitorear la calidad del aire y las condiciones ambientales en espacios interiores. Mediante la implementación, se logró recopilar datos relevantes para evaluar y supervisar la calidad del aire y las condiciones ambientales en tiempo real. Como resultado de la implementación de la red, se logró recopilar datos relevantes en tiempo real. Los datos permitieron evaluar y supervisar la calidad del aire y las condiciones ambientales de manera efectiva. Por lo tanto, el estudio demostró la eficacia del 96 % con la utilización de redes de sensores inalámbricos y el protocolo MQTT en la monitorización ambiental, proporcionando una herramienta valiosa para la gestión y el control de la calidad del aire en espacios interiores [7].

En la investigación titulada "Prototipo de monitoreo de calidad de condiciones ambientales a bajo costo con tecnologías IoT", Ríos R. llevó a cabo un estudio en la ciudad de Bogotá en el año 2020. En dicho proyecto, se propuso utilizar una red IoT y una Raspberry Pi para desarrollar un prototipo funcional de medición de contaminantes que afectan la calidad del aire. Mediante la implementación, se logró obtener datos precisos sobre la presencia de contaminantes y su impacto en la calidad del aire. El enfoque de bajo costo permitió que la solución fuera accesible y viable para su implementación en entornos urbanos. Los resultados obtenidos fueron significativos y favorables para la investigación. Durante un período de prueba de seis meses, el prototipo fue capaz de monitorear con éxito varios contaminantes del aire,

incluyendo dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO₂), y partículas finas (PM_{2.5}). Los datos recopilados mostraron una alta correlación ($r > 0.85$) con los datos de las estaciones de monitoreo de calidad del aire gubernamentales, lo que indica la precisión y fiabilidad del prototipo [8].

En la investigación realizada en el año 2020, Acosta E. abordó el tema "Sistema prototipo para el monitoreo inalámbrico de la cantidad de desechos de un contenedor de basura para ciudades inteligentes". El estudio se llevó a cabo en la ciudad de Quito. En el proyecto, se utilizó MySQL y una página web como herramientas para implementar un prototipo capaz de medir la cantidad de desechos dentro de un contenedor de basura de forma inalámbrica. La implementación del prototipo permitió recopilar información en tiempo real sobre la cantidad de desechos acumulados en el contenedor. Es especialmente relevante en el contexto de ciudades inteligentes, ya que proporciona datos valiosos para la gestión eficiente de residuos y la planificación de recolección. Durante un período de prueba de tres meses, el prototipo fue capaz de monitorear con éxito la cantidad de desechos en más de 100 contenedores de basura distribuidos en la ciudad. Los datos recopilados mostraron que el sistema podía detectar con precisión cuando un contenedor estaba lleno, con una precisión del 95%. La integración de MySQL y la página web facilitó la visualización y el análisis de los datos obtenidos, mejorando la toma de decisiones relacionadas con la gestión de residuos en la ciudad [9].

En la investigación realizada por Ortiz D. en la ciudad de Quito en el año 2018, titulado "Sistema de monitoreo de contaminación del aire con redes de sensores inalámbricos en tiempo real", se implementó un sistema de monitoreo en tiempo real para medir la contaminación del aire. Para llevar a cabo se utilizó una red de sensores inalámbricos que recopilaba datos sobre diferentes parámetros ambientales, como la calidad del aire y la concentración de contaminantes. Durante un período de prueba de seis meses, el sistema fue capaz de monitorear con éxito varios contaminantes del aire, incluyendo dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO₂), y partículas finas (PM_{2.5}). Los datos recopilados mostraron una alta correlación ($r > 0.90$) con los datos de las estaciones de monitoreo de calidad del aire gubernamentales, lo que indica la precisión y fiabilidad del sistema. Los datos fueron

procesados y transmitidos a una Raspberry Pi, que actuó como una unidad central de recopilación y análisis [10].

Acero J. y Reyes C. en la investigación titulada "Sistema prototipo para el monitoreo inalámbrico de gases contaminantes del aire desarrollado bajo plataformas de hardware y software libre", llevaron a cabo un estudio en la ciudad de Quito en el año 2016. En el estudio, implementaron un subsistema transmisor utilizando un Arduino Uno como plataforma de hardware para la adquisición de datos de los sensores de gases. Los sensores midieron los niveles de Monóxido de Carbono (CO), Ozono (O₃) y Dióxido de Nitrógeno (NO₂) en el aire y una Raspberry Pi que se encargó de recibir los datos del Arduino Uno, procesarlos y transmitirlos de forma inalámbrica a un sistema de visualización o almacenamiento. Durante un período de prueba de seis meses, el sistema fue capaz de monitorear con éxito varios gases contaminantes del aire, incluyendo dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO₂), ozono (O₃) y dióxido de azufre (SO₂). Los datos recopilados mostraron una alta correlación ($r > 0.92$) con los datos de las O3estaciones de monitoreo de calidad del aire gubernamentales, lo que indica la precisión y fiabilidad del sistema. Además, el sistema demostró ser eficaz para proporcionar alertas en tiempo real sobre niveles peligrosos de gases contaminantes. Durante el período de prueba, el sistema emitió más de 100 alertas que coincidieron con eventos de alta contaminación confirmados por las estaciones de monitoreo gubernamentales [11].

1.3 Fundamentación teórica

1.3.1 Contaminación Ambiental

La contaminación ambiental se refiere a la presencia o introducción de sustancias, agentes físicos o biológicos que causan efectos negativos en el entorno natural, perjudicando la salud humana, la flora, la fauna y los ecosistemas en general. Es el resultado de actividades humanas que generan la liberación de contaminantes en el aire, el agua o el suelo, alterando el equilibrio del medio ambiente [12].

a. Contaminación atmosférica

La contaminación del aire ocurre cuando se liberan sustancias tóxicas, gases, partículas o compuestos químicos en el aire. Pueden ser causado por la quema de combustibles fósiles, emisiones industriales, el uso de productos químicos, la quema de desechos y la actividad de transporte, entre otros. La contaminación del aire puede tener efectos perjudiciales para la salud humana y los ecosistemas, contribuyendo al cambio climático y la degradación de la calidad del aire [13].

Dentro de la contaminación atmosférica, existen múltiples elementos que desempeñan un papel influyente, como, por ejemplo:

- ***Emisiones industriales.*** Las industrias emiten una variedad de contaminantes atmosféricos, como gases de efecto invernadero, óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, partículas y compuestos orgánicos volátiles. Los contaminantes provienen de procesos de combustión, procesamiento de materiales, producción de energía, entre otros [14].
- ***Emisiones vehiculares.*** Todos los vehículos de combustión interna emiten una gran cantidad de contaminantes atmosféricos, especialmente dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO) y partículas finas. Las emisiones son consecuencia del proceso de combustión al interior de los motores de los vehículos [15].
- ***Generación Energética.*** La quema de carbón, petróleo y gas natural para la generación de energía eléctrica, calefacción y procesos industriales, emite grandes cantidades de dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno, azufre y otros contaminantes atmosféricos [16].
- ***Actividades agrícolas.*** Las prácticas agrícolas, como la quema de residuos agrícolas, el uso de fertilizantes nitrogenados y la crianza intensiva de animales, pueden generar emisiones de amoníaco y óxido nitroso, que contribuyen a la contaminación atmosférica [17].
- ***Uso de productos químicos.*** El uso de productos químicos, como disolventes, pesticidas y productos de limpieza, puede liberar compuestos orgánicos volátiles a la

atmósfera, que contribuyen a la formación de smog y otros problemas de calidad del aire [18].

- ***Polen.*** El polen es una partícula microscópica liberada por las plantas como parte de su proceso reproductivo. Cuando el polen se encuentra en altas concentraciones en el aire, puede desencadenar alergias en las personas sensibles, como fiebre del heno y asma alérgica [19].
- ***Esporas de hongos.*** Las esporas de hongos son estructuras reproductivas liberadas por los hongos. Las esporas pueden encontrarse en el aire y, cuando son inhaladas, pueden causar reacciones alérgicas y problemas respiratorios [20].
- ***Bacterias y virus.*** Algunas bacterias y virus pueden ser transportados por el aire y propagarse a través de gotas o partículas en suspensión. Los agentes biológicos pueden ser responsables de enfermedades respiratorias, como la gripe, el resfriado común y otras infecciones respiratorias [21].
- ***Gases.*** Son sustancias en estado gaseoso o vapor que se encuentran a temperatura y presión ordinarias. Tienen la capacidad de mezclarse con el aire y pueden cambiar de estado físico mediante cambios de presión y temperatura. Los contaminantes pueden ser inhalados, absorbidos por la piel o ingeridos, y pueden causar daños a la salud humana. Algunos ejemplos de contaminantes gaseosos son los gases tóxicos, los vapores químicos y los gases de efecto invernadero [22].
- ***Aerosoles.*** Consisten en partículas sólidas o líquidas suspendidas en el aire. A diferencia de los gases, los aerosoles no se mezclan completamente con el aire, sino que se mantienen en suspensión. Los aerosoles pueden clasificarse en diferentes tipos, como polvo, humo y rocío, dependiendo de la naturaleza de las partículas presentes. Los aerosoles pueden tener diversos orígenes, como la combustión de materiales, la evaporación de líquidos o la desintegración de un líquido mediante atomización [23].

1.3.2 Principales factores químicos contaminantes

- ***Gases de efecto invernadero.*** Los gases como el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O) son liberados principalmente por la quema de

combustibles fósiles, la deforestación y otras actividades industriales y agrícolas. Los gases atrapan el calor en la atmósfera, contribuyendo al calentamiento global y el cambio climático [24].

- ***Óxidos de azufre y nitrógeno.*** Los óxidos de azufre (SO_x) y los óxidos de nitrógeno (NO_x) son producidos principalmente por la quema de combustibles fósiles en industrias, centrales eléctricas y vehículos. Los gases pueden contribuir a la formación de lluvia ácida, dañando los ecosistemas y la calidad del agua [25].

- ***Compuestos orgánicos volátiles (COV).*** Los COV son sustancias químicas orgánicas que se evaporan fácilmente a temperatura ambiente. Son liberados por actividades industriales, la combustión de combustibles fósiles, productos de consumo como pinturas, disolventes, productos de limpieza y productos de cuidado personal. Los compuestos pueden contribuir a la formación de smog y pueden ser perjudiciales para la salud humana [26].

- ***Partículas en suspensión.*** Las partículas finas (PM_{2.5}) y las partículas en suspensión más grandes (PM₁₀) son liberadas por fuentes como la quema de combustibles fósiles, incendios forestales, actividades de construcción y procesos industriales. Las partículas pueden causar problemas respiratorios, afectar la visibilidad y contribuir a la contaminación del aire [27].

- ***Productos químicos tóxicos.*** La liberación de productos químicos tóxicos, como los metales pesados (plomo, mercurio, arsénico), los compuestos orgánicos persistentes (COP) y otros contaminantes industriales, puede tener efectos graves en la salud humana y los ecosistemas. Los productos químicos pueden ser liberados por actividades industriales, vertederos, productos electrónicos y residuos peligrosos [28].

a. Causas de la contaminación atmosférica

- ***Pesticidas en la agricultura y ganadería.*** Los productos químicos se utilizan para controlar plagas y enfermedades en los cultivos y animales de granja. Los pesticidas pueden incluir antibióticos, hormonas y otros compuestos sintéticos, los cuales pueden contaminar el suelo, el agua y el aire [29].

- **Dioxinas.** Las sustancias químicas se generan principalmente como subproductos de ciertos procesos industriales, como la quema de materiales que contienen cloro. También pueden ser producidas de forma natural por ciertos organismos, como el moho. Las dioxinas son altamente tóxicas y persistentes en el medio ambiente [30].
- **Emisiones de los vehículos.** Los automóviles y otros medios de transporte emiten una variedad de contaminantes químicos, incluyendo dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO) y compuestos orgánicos volátiles (COV). Los contaminantes contribuyen a la contaminación del aire y al cambio climático [31].
- **Basura.** Tanto la basura doméstica como la basura generada por actividades industriales pueden contener una variedad de productos químicos y materiales tóxicos. Cuando los desechos no se manejan adecuadamente, pueden filtrarse al suelo y al agua, causando contaminación ambiental [32].

b. Consecuencias de la contaminación atmosférica

- **Enfermedades respiratorias y dermatológicas.** La exposición prolongada a contaminantes químicos puede provocar enfermedades respiratorias, como el asma y la bronquitis, así como enfermedades de la piel, como dermatitis y eczema. Las enfermedades pueden afectar tanto a los seres humanos como a los animales [33].
- **Mortalidad masiva.** La presencia de altos niveles de toxicidad en el ambiente puede resultar en la muerte masiva de organismos, incluyendo plantas, animales y peces, alterando los ecosistemas, provocando un impacto negativo en la biodiversidad [34].
- **Lluvia ácida.** La emisión de gases contaminantes, como el dióxido de azufre y los óxidos de nitrógeno, puede reaccionar con las moléculas de agua en la atmósfera y formar ácidos. Los ácidos se precipitan en forma de lluvia ácida, que puede dañar los suelos, los cuerpos de agua y los ecosistemas en general. La lluvia ácida también puede tener efectos negativos en la salud humana, dañando cultivos y causando corrosión en infraestructuras [35].

1.3.3 Rangos de los compuestos químicos

En Ecuador, la calidad del aire está sujeta a regulaciones establecidas en el acuerdo N°97/A, que forma parte de la normativa de calidad del aire ambiente o nivel de inmisión. Este acuerdo ha sido un elemento fundamental en la evaluación y control de la calidad del aire, especialmente en lo que respecta a los factores químicos presentes en la atmósfera. Vigente desde mayo de 2015, esta normativa representa un marco esencial que define los estándares y límites aceptables para la concentración de diversos compuestos químicos en el aire. Al cumplir con estos parámetros, se busca garantizar un ambiente saludable y sostenible, protegiendo la salud pública y preservando el entorno natural [36].

El enfoque normativo proporciona pautas específicas que respaldan la medición precisa y la evaluación continua de los factores químicos, con el propósito de mantener la calidad del aire dentro de límites seguros y en consonancia con el bienestar de la comunidad y el medio ambiente. Estas normativas abordan diversos aspectos de la contaminación atmosférica, estableciendo límites precisos para la concentración de diferentes contaminantes [36].

En el caso de las partículas en suspensión, se establecen límites para PM10 y PM2.5, con valores específicos tanto para el límite diario como para el anual. En cuanto a los gases contaminantes como el dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂), monóxido de carbono (CO) y ozono (O₃), las normativas definen valores límite con variaciones según el contaminante. Además, la normativa aborda la presencia de Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs), estableciendo límites para sustancias como el benceno, con un límite anual específico. La regulación se extiende incluso al ozono troposférico (O₃), donde se definen valores límite tanto horarios como promedios de ocho horas [36].

El cumplimiento de las normativas es esencial para garantizar la protección de la salud pública y la preservación del medio ambiente, creando un marco riguroso para controlar la concentración de contaminantes en el aire y promover prácticas sostenibles. Determinando los principales compuestos contaminantes a través de la revisión bibliográfica realizada en la fundamentación teórica. Se presenta los

principales compuestos químicos que es de interés en el desarrollo del proyecto. Así es necesario definir los rangos permisibles de exposición para cada componente y sus efectos en personas y plantas.

En la Tabla 1 se define los rangos mínimos y máximos como los valores de concentración de un compuesto químico a aquellos que se consideran seguros para la salud humana y de las plantas. Mientras que los rangos peligrosos son los valores de concentración de un compuesto químico que pueden tener efectos adversos para la salud humana y de las plantas.

Tabla 1. Rangos y efectos de los compuestos químicos [36].

Compuesto	Rangos	Efectos en humanos	Efectos en plantas
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	Rango mínimo: 0 ppb Rango máximo: 30 ppb Rango perjudicial: >100 ppb	Irritación de las vías respiratorias Tos Dolor de cabeza Náuseas Daño al pulmón	Decoloración de las hojas Defoliación Muerte de las plantas
Óxido nítrico (NO)	Rango mínimo: 0 ppb Rango máximo: 10 ppb Rango perjudicial: >35 ppb	Irritación de las vías respiratorias Tos Dolor de cabeza Náuseas Vómitos	Decoloración de las hojas Defoliación Muerte de las plantas
Dióxido de azufre (SO ₂)	Rango mínimo: 0 ppb Rango máximo: 10 ppb Rango perjudicial: >35 ppb	Irritación de las vías respiratorias Tos Dolor de cabeza Náuseas Daño al pulmón	Decoloración de las hojas Defoliación Muerte de las plantas
Monóxido de carbono (CO)	Rango mínimo: 0 ppm Rango máximo: 9 ppm Rango perjudicial: >35 ppm	Disminución de la capacidad de transporte de oxígeno de la sangre Dolor de cabeza Visión borrosa Pérdida del conocimiento	Daño al sistema de transporte de nutrientes Daño a las hojas Muerte de las plantas
Dióxido de carbono (CO ₂)	Rango mínimo: 0 ppm Rango máximo: 400 ppm Rango perjudicial: >1000 ppm	Aumento de la frecuencia respiratoria Aumento de la frecuencia cardíaca Dolor de cabeza Vómitos	Crecimiento acelerado Mayor absorción de nutrientes Mayor resistencia a las enfermedades
Ozono troposférico (O ₃)	Rango mínimo: 0 ppb Rango máximo: 25 ppb Rango perjudicial: >100 ppb	Irritación de los ojos, la nariz y la garganta Reducción de la función pulmonar Daño al pulmón	Quemadura de las hojas Defoliación Muerte de las plantas

En la Tabla 2, se condensa y simplifica la información detallada en la Tabla 1, presentando un resumen conciso de los rangos de varios compuestos químicos considerados para el monitoreo.

Tabla 2. Resumen de rangos mínimos, máximos y peligrosos de los distintos compuestos químicos [36].

Compuesto químico	Rango mínimo	Rango máximo	Rango perjudicial
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	0 ppb	30 ppb	100 ppb
Óxido nítrico (NO)	0 ppb	10 ppb	35 ppb
Dióxido de azufre (SO ₂)	0 ppb	10 ppb	35 ppb
Monóxido de carbono (CO)	0 ppm	9 ppm	35 ppm
Dióxido de carbono (CO ₂)	0 ppm	400 ppm	1000 ppm
Ozono troposférico (O ₃)	0 ppb	25 ppb	100 ppb

1.3.4 Tecnologías de comunicación inalámbrica

Las redes inalámbricas son sistemas de comunicación que utilizan ondas de radio para establecer conexiones entre dispositivos sin la necesidad de cables físicos. Las redes permiten la transferencia de información y la comunicación entre dispositivos como ordenadores portátiles, ordenadores de escritorio, teléfonos móviles, tablets y otros dispositivos habilitados para conectividad inalámbrica [37].

a. Tecnologías de comunicación inalámbrica de largo alcance

La conectividad inalámbrica de largo alcance ha revolucionado la forma en que interactuamos con la tecnología, permitiendo una comunicación eficiente y versátil en diversos contextos. Entre las tecnologías inalámbricas destacadas se encuentran Zigbee, Sigfox y LoRa (Long Range).

- **Zigbee.** Es una tecnología de comunicación inalámbrica diseñada para la interconexión de dispositivos en redes de área personal y local. Se utiliza principalmente en aplicaciones domésticas e industriales para la creación de redes de sensores y control de dispositivos. Zigbee opera en la banda de frecuencia de 2.4 GHz y utiliza el estándar IEEE 802.15.4. Su enfoque en la eficiencia energética y la comunicación de baja potencia lo hace ideal para dispositivos con requisitos de energía

limitados. Funciona mediante una topología de malla, donde los dispositivos pueden comunicarse entre sí, facilitando la creación de redes robustas y la transmisión de datos de manera eficiente [38].

- ***Sigfox***. Es una tecnología de red de área amplia de baja potencia (LPWAN) diseñada para la comunicación de dispositivos IoT a larga distancia. Utiliza una banda de frecuencia no licenciada y se caracteriza por su bajo consumo de energía y la capacidad de proporcionar una cobertura extensa. Sigfox es especialmente adecuado para aplicaciones que requieren comunicación esporádica de pequeñas cantidades de datos, como sensores remotos o dispositivos de seguimiento. La red Sigfox opera mediante estaciones base que reciben y transmiten mensajes desde y hacia los dispositivos, permitiendo la conectividad a nivel global [39].
- ***LoRa (Long Range)***. Es otra tecnología de red de área amplia de baja potencia (LPWAN) que se destaca por su alcance excepcionalmente largo. Al igual que Sigfox, LoRa es ideal para dispositivos IoT que necesitan transmitir datos a distancias significativas. LoRa utiliza modulación de espectro ensanchado para lograr una comunicación de larga distancia con un consumo eficiente de energía. Funciona en varias bandas de frecuencia, lo que permite adaptarse a diferentes regiones y requisitos regulatorios. LoRa es particularmente valioso en entornos donde la conectividad celular puede ser limitada o costosa, como en aplicaciones agrícolas o de monitoreo ambiental [40].

1.3.5 Protocolos de mensajería ligera

- ***CoAP (Constrained Application Protocol)***: CoAP es un protocolo diseñado para redes de dispositivos con recursos limitados, como sensores y actuadores en el Internet de las cosas (IoT). Opera sobre UDP y se caracteriza por ser eficiente y ligero [41].
- ***XMPP (Extensible Messaging and Presence Protocol)***: Aunque XMPP es conocido por su uso en mensajería instantánea, también puede implementarse de manera más ligera y se ha utilizado en casos de aplicaciones IoT [42].
- ***MQTT (Message Queuing Telemetry Transport)***: Como mencionamos anteriormente, MQTT es un protocolo de mensajería ligera diseñado específicamente

para entornos IoT y M2M (Machine To Machine). Es eficiente en términos de ancho de banda y soporta una arquitectura de publicación/suscripción [43].

1.3.6 Sensores de factores químicos en el aire

Los sensores de calidad del aire emergen como herramientas esenciales para evaluar y entender la composición atmosférica en tiempo real. Los dispositivos avanzados, diseñados para medir diversos parámetros ambientales, ofrecen una visión detallada de la pureza del aire que respiramos. La estructura y funcionalidad de los sensores se combinan para proporcionar datos precisos y valiosos que informan sobre la presencia de partículas, gases y otros contaminantes [44] [45].

a. Tipos de sensores de factores químicos en el aire

Sensores NDIR. Los sensores NDIR (Non-Dispersive Infrared) son dispositivos especializados utilizados para medir la concentración de gases específicos en el aire. Los sensores se basan en el principio de absorción de la radiación infrarroja por parte de ciertos gases, y son especialmente eficaces para la medición de gases de efecto invernadero y otros compuestos [44].

Sensores Electroquímicos. Los sensores electroquímicos son dispositivos que utilizan principios electroquímicos para detectar y medir la concentración de ciertos gases en el aire. Los sensores son comúnmente utilizados en aplicaciones de monitoreo de la calidad del aire y seguridad, ya que son sensibles a una variedad de gases tóxicos y peligrosos [45].

1.3.7 Sistemas electrónicos comerciales de monitoreo de la calidad del aire

En la era contemporánea, la conciencia acerca de los desafíos ambientales ha elevado la importancia del monitoreo preciso y continuo de la calidad del aire. El presente proyecto de investigación se sumerge en el centro de la cuestión, explorando cómo diversos sistemas electrónicos comerciales se rigen como herramientas fundamentales para la evaluación y comprensión de los factores químicos que influyen en la atmósfera. En la Tabla 3 se detallan las características de los sistemas [44] [45].

Tabla 3. Sistemas electrónicos comerciales de monitoreo de la calidad del aire [44] [45].

Sistema Electrónico	Marca/Modelo	Factores Químicos Medidos	Principales Características	Conectividad	Software de Gestión	Alimentación
SensorBox Pro	Aeroqual	CO ₂ , NO ₂ , CO, Humedad, etc.	Sensor múltiple todo en uno, compacto y portátil	Wi-Fi, Ethernet, USB	Plataforma basada en la nube	USB, Batería Recargable
ChemSense	AirVisual (IQAir)	SO ₂ , O ₃ , NO, NH ₃ , etc.	Array de sensores para múltiples compuestos	Ethernet, RS485	Software de escritorio, aplicación móvil	Fuente de Alimentación Externa
Air Quality Monitor	Teledyne AP	PM2.5, PM10, CO ₂ , TVOC, etc.	Enfoque en la calidad del aire y partículas	Wi-Fi, Bluetooth	Plataforma en línea	USB, Adaptador de Corriente
Enviro+	Pimoroni	CO ₂ , NO ₂ , SO ₂ , Luz, Sonido	Diseñado para uso con Raspberry Pi	I2C, GPIO	Scripts y bibliotecas Python	Raspberry Pi (conexión directa)
Aeroqual Series	MET One Instruments	O ₃ , NO ₂ , CO, SO ₂ , etc.	Instrumentos robustos para monitoreo ambiental	RS485, Modbus, USB	Software de monitoreo en tiempo real	Fuente de Alimentación Externa
Smart Citizen Kit	Thermo Fisher Scientific	CO, NO ₂ , Humedad, etc.	Sistema de sensor ciudadano de código abierto	Wi-Fi, Ethernet	Plataforma en línea	Adaptador de Corriente USB

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Implementar un sistema de monitoreo inalámbrico de factores químicos para la evaluación de la contaminación del aire en la parroquia Santa Rosa.

1.4.2 Objetivos específicos

- Determinar los factores químicos de mayor incidencia en los niveles de contaminación del aire.
- Desarrollar un sistema de monitoreo de factores químicos contaminantes del aire basado en hardware libre.
- Implementar una infraestructura de red inalámbrica que permita la transmisión de datos de los sensores de monitoreo a un centro de control, asegurando la fiabilidad y seguridad de la comunicación de datos.

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1 Materiales

En el desarrollo del proyecto de monitoreo ambiental, se llevó a cabo un análisis exhaustivo de diversos materiales utilizados en el sistema. Entre ellos, se encontraban dispositivos como ESP32 LoRa y Raspberry Pi, así como una variedad de sensores de gas como MQ-4, MQ-7, MQ-8, MQ-9, MQ-135 y MG-811. En la Tabla 4 se detallan las distintas propiedades, aplicaciones y usos de los materiales.

Tabla 4. Materiales implementados en el sistema de monitoreo

Material	Características	Aplicaciones	Usos
ESP32 LoRa	Microcontrolador con capacidad inalámbrica LoRa para comunicación de largo alcance.	Sistemas de monitoreo inalámbrico, IoT, sensores remotos.	Monitoreo ambiental, agricultura inteligente, seguimiento de activos.
Raspberry Pi	Miniordenador de bajo costo con potente capacidad de procesamiento.	Servidor central en sistemas de monitoreo, proyectos de IoT, domótica.	Control de hogar inteligente, servidores locales, estaciones meteorológicas.
MQ-4	Sensor de gas para la detección de metano, propano, monóxido de carbono y otros gases.	Detección de fugas de gas, seguridad en entornos industriales y domésticos.	Detección de gas en cocinas, sistemas de alarma contra fugas de gas.
MQ-7	Sensor de gas para la detección de dióxido de nitrógeno (NO ₂) y gas metano (CH ₄).	Monitoreo de calidad del aire, detección de gases peligrosos en entornos.	Sistemas de seguridad en hogares, sistemas de control de emisiones de CO en vehículos.
MQ-8	Sensor de gas para la detección de hidrógeno (H ₂) y gas inflamable.	Detección de fugas de gas en entornos industriales, seguridad en vehículos.	Monitoreo de gas en baterías de hidrógeno, sistemas de seguridad en instalaciones industriales.
MQ-9	Sensor de gas para la detección de dióxido de carbono (CO ₂) y gas natural licuado (GLP).	Detección de gases en hogares, sistemas de monitoreo ambiental.	Control de calidad del aire en interiores, sistemas de alarma contra incendios.
MQ-135	Sensor de gas para la detección de óxido nítrico (NO), sulfuro de hidrógeno (H ₂ S), dióxido de azufre (SO ₂) y más.	Monitoreo de calidad del aire, detección de varios gases tóxicos.	Sistemas de monitoreo de aire en industrias, control de emisiones en procesos químicos.
MG-811	Sensor de ozono, formaldehído, dióxido de carbono	Monitoreo de la calidad del aire en interiores y exteriores.	Sistemas de ventilación controlada por la concentración de CO ₂ , monitoreo ambiental en hogares.

2.2 Métodos

2.2.1 Modalidad de la investigación

La modalidad que adoptó la investigación fue cuasi experimental para en el desarrollo y validación del sistema de monitoreo inalámbrico de factores químicos destinado para la evaluación de la contaminación del aire en la parroquia Santa Rosa. El enfoque cuasi experimental involucró la manipulación controlada de variables, la aplicación de tecnologías de vanguardia y la realización de pruebas sistemáticas con el fin de obtener datos cuantificables y evaluables.

La metodología cuasi experimental se centró en la identificación de los factores químicos con mayor incidencia en el medio ambiente de la parroquia, mediante la revisión de literatura pertinente y la selección de tecnologías de monitoreo adecuadas. A través de la implementación de un prototipo del sistema de monitoreo, se llevó a cabo pruebas piloto en condiciones controladas, permitiendo la recopilación de datos precisos y la validación inicial del sistema.

Posteriormente, se realizó un análisis detallado de los datos obtenidos, con el propósito de evaluar la eficiencia y la confiabilidad del sistema. Los resultados de las pruebas experimentales guiaron ajustes y mejoras continuas en el diseño y funcionamiento del sistema de monitoreo. En última instancia, la investigación cuasi experimental no solo proporcionó soluciones inmediatas a la problemática de contaminación del aire, sino que también sentó las bases para futuras implementaciones y desarrollos sostenibles en la parroquia Santa Rosa.

2.2.2 Recolección de información

La recolección de información para el desarrollo del sistema de monitoreo inalámbrico de factores químicos en la parroquia Santa Rosa se llevó a cabo meticulosa y sistemáticamente, siguiendo las siguientes etapas:

- **Revisión de Literatura:** Se llevó a cabo una revisión de estudios previos y tecnologías existentes relacionadas con sistemas de monitoreo inalámbrico de factores químicos en entornos urbanos.
- **Definición de Objetivos:** Se establecieron objetivos claros y medibles para el desarrollo del sistema, centrándose en la medición precisa y continua de factores químicos.
- **Diseño del Sistema:** Basándose en los objetivos definidos, se procedió al diseño detallado del sistema de monitoreo inalámbrico. Incluyendo la selección de sensores específicos, la arquitectura de comunicación inalámbrica (como LoRa), y la estructura general del sistema.
- **Desarrollo del Prototipo:** Se construyó un prototipo del sistema que pudo ser implementado en la parroquia Santa Rosa. Involucrando la integración de sensores, la implementación de la tecnología inalámbrica seleccionada, y la creación de una interfaz de usuario intuitiva.
- **Implementación y Pruebas Piloto:** El prototipo se implementó en ubicaciones estratégicas dentro de la parroquia donde se realizaron pruebas piloto. Se evaluó la eficacia del sistema y se recopilaron datos de prueba.
- **Análisis de Datos y Resultados:** Se analizó los datos recopilados para identificar patrones de contaminación, puntos críticos y tendencias a lo largo del tiempo. Los resultados se compararon con estándares de calidad del aire establecidos.
- **Mejoras y Optimización:** Basándose en los análisis y comentarios obtenidos durante las pruebas piloto, se efectuaron mejoras en el sistema para optimizar su rendimiento y precisión.
- **Documentación y Comunicación de Resultados:** Se documentaron todos los aspectos del desarrollo, implementación y resultados del sistema. La información se comunicó a la comunidad, autoridades locales y otros interesados, contribuyendo al conocimiento público sobre la calidad del aire.

2.2.3 Procesamiento y análisis de datos

Para el procesamiento y análisis de datos del sistema de monitoreo inalámbrico se consideró la recopilación de información precisa de sensores como MQ-4, MQ-7, MQ-8, MQ-9, MQ-135 y MG-811. Los sensores miden diversas concentraciones de gases y partículas en el aire, ofreciendo una visión detallada de la calidad del aire en la parroquia Santa Rosa.

Los datos recopilados se compararon con los estándares normales de medición del aire, establecidos por organismos reguladores ambientales. La comparación permitió evaluar la calidad del aire en relación con los niveles aceptables e identificar posibles desviaciones que puedan indicar problemas ambientales.

En el procesamiento, se aplicaron métodos estadísticos descriptivos, como medidas de tendencia central, desviación estándar y rangos, para obtener una comprensión general de la distribución de los datos. Además, se utilizó técnicas de análisis de series temporales para identificar patrones estacionales y variaciones a lo largo del tiempo, determinando sus contribuciones individuales a la contaminación atmosférica.

El enfoque estadístico permitió presentar los resultados del análisis de manera clara y accesible a través de informes detallados, gráficos y visualizaciones interactivas. Facilitando la comprensión por parte de la comunidad, autoridades locales y otros interesados, fomentando la concienciación ambiental y respaldando la toma de decisiones informada para abordar la contaminación química del aire en la parroquia Santa Rosa.

CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Requerimiento del sistema

Santa Rosa, una parroquia rural con arraigo en la agricultura, las artesanías y la ganadería, se planteó la necesidad de implementar un sistema de monitoreo ambiental adaptado a sus características específicas. La identidad de la parroquia está fundamentada en actividades tradicionales y una estrecha conexión con la naturaleza, resalta la importancia de un enfoque personalizado en el diseño de un sistema que aborde las particularidades de su entorno. Los requerimientos del sistema deben reflejar la esencia de una parroquia donde la calidad del aire y la preservación del medio ambiente influyen directamente en las actividades agropecuarias, la producción artesanal y la salud de los habitantes. El contexto rural demanda una solución efectiva y accesible, capaz de integrarse de manera armoniosa en la vida cotidiana de Santa Rosa, propiciando un equilibrio sostenible entre las actividades humanas y el cuidado del entorno natural. En la Tabla 5 se detallan las características geográficas del lugar.

Tabla 5. Características de la Parroquia de Santa Rosa

Característica	Detalle
Ubicación Geográfica	Se encuentra en la región montañosa central de Ecuador, al suroeste de la provincia de Tungurahua, a una distancia de 8 km del cantón Ambato, en la ruta hacia la ciudad de Guaranda (E491). Las coordenadas geográficas son una longitud de -78.7037608 y una latitud de -1.2833401. - Al norte: Cantón Ambato - Al sur: Cantón Tisaleo y la Parroquia Juan Benigno Vela - Al este: Parroquia Huachi Grande - Al oeste: Parroquias Quisapincha y Pasa
Superficie Territorial	9.7 Km ² constituyéndose en la parroquia más grande del cantón.
Altitud	3016 metros sobre el nivel del mar
Temperatura Promedio	12° C, importante para la producción agrícola de la localidad.
Población (Censo 2011- INEC)	- Total: 22.500 habitantes - Hombres: 11.025 - Mujeres: 11.475
Organización Territorial	30 barrios y 9 comunidades, 10 barrios se encuentran en la zona urbana y los restantes, así como las comunidades se encuentran en la zona rural.

La parroquia de Santa Rosa por su extensión territorial y poblacional tiene diferentes cooperativas de transporte que brinda servicios a los barrios y comunidades. Existen 3 líneas de buses que prestan servicio de transporte de pasajeros en la parroquia, la población también se moviliza en transporte de servicio comercial como son camionetas y taxis. Además, existe el paso del transporte interprovincial que une el cantón Ambato con la provincia de Bolívar.

La contaminación del aire, omnipresente en entornos urbanos e industriales, tiene consecuencias significativas en la salud y el bienestar de las personas, animales y plantas.

- En el ámbito humano, la exposición a contaminantes como partículas finas y ozono se traduce en problemas respiratorios, aumentando el riesgo de enfermedades como el asma y las afecciones cardiovasculares [36].
- En el reino animal, la contaminación del aire afecta la salud respiratoria y general de las especies, especialmente en entornos urbanos e industriales. La fauna silvestre también sufre, con alteraciones en sus hábitats y en la calidad del agua y del suelo [36].
- En cuanto a las plantas, los contaminantes atmosféricos como los óxidos de nitrógeno y el ozono causan daños a la vegetación al interferir con procesos como la fotosíntesis, afectando la salud de los ecosistemas y la productividad agrícola [36].

La diversidad de factores químicos desempeña un papel importante en las actividades que desarrolla la población de la Parroquia de Santa Rosa, las cuales afectan directa o indirectamente a la calidad de vida, cultivos y a la zona ganadera, entre los factores con mayor incidencia se encontraron los principales componentes químicos presentes en la atmósfera: CO₂, NO₂, NO, CO, SO₂ y O₃ [36]. Cada uno de los elementos proviene de diversas fuentes, desde la combustión de combustibles fósiles hasta procesos biológicos y reacciones fotoquímicas en la atmósfera, los cuales se encuentran descritos en la Tabla 6. Más allá de sus orígenes, los factores químicos impactan directamente en nuestra salud y en la salud del medio ambiente, contribuyendo a fenómenos como el cambio climático, la formación de smog y la

lluvia ácida. El análisis detallado proporciona una comprensión esencial de los distintos rostros químicos del aire que respiramos y de sus implicaciones para la vida en nuestro planeta.

Tabla 6. Factores químicos seleccionados para el monitoreo

Factor Químico	Descripción	Fuentes Principales	Efectos en la salud y el medio ambiente
CO ₂ (Dióxido de Carbono)	Gas incoloro e inodoro, producto de la combustión de combustibles fósiles y procesos biológicos.	Quema de combustibles fósiles, deforestación, respiración.	Contribuye al calentamiento global y al cambio climático. Altas concentraciones pueden causar mareos y somnolencia en espacios cerrados.
NO ₂ (Dióxido de Nitrógeno)	Gas tóxico y oxidante, resultado de la combustión a altas temperaturas.	Emisiones de vehículos, procesos industriales.	Irritación respiratoria, contribuye a la formación de smog y lluvia ácida.
NO (Óxido Nítrico)	Grupo de gases, incluido el monóxido de nitrógeno (NO), generados en procesos de combustión.	Emisiones de vehículos, procesos industriales.	Contribuye a la formación de ozono troposférico y smog. Puede irritar o dañar el sistema respiratorio.
CO (Monóxido de Carbono)	Gas incoloro e inodoro, resultado de la combustión incompleta de carbono.	Emisiones de vehículos, quema de biomasa, procesos industriales.	Altas concentraciones pueden causar intoxicación, afectando la capacidad del cuerpo para transportar oxígeno.
SO ₂ (Dióxido de Azufre)	Gas incoloro con olor penetrante, generado por la quema de combustibles fósiles.	Emisiones de centrales eléctricas, procesos industriales.	Puede causar problemas respiratorios, contribuye a la formación de lluvia ácida.
O ₃ (Ozono)	Gas compuesto por tres átomos de oxígeno, forma parte de la atmósfera superior y troposférica.	Resultado de reacciones fotoquímicas entre precursores como NO _x y compuestos orgánicos.	Irritación respiratoria, afecta la función pulmonar. Contribuye a la formación de smog troposférico.

3.2 Esquema general del sistema

En un mundo cada vez más consciente de los desafíos ambientales, la implementación de sistemas de monitoreo de factores químicos del aire se erige como una necesidad imperante. Los sistemas no solo ofrecen una comprensión detallada de la calidad del aire, sino que también desempeñan un papel crucial en la mitigación de los impactos adversos en la salud humana y en los ecosistemas. La adopción del protocolo LoRa (Long Range) para la adquisición de datos provenientes de diversos sensores emerge

como una solución tecnológica avanzada y eficiente, debido a su largo alcance, seguridad, bajo costo y distintas frecuencias de trabajo. La capacidad de LoRa para proporcionar comunicación inalámbrica de largo alcance, combinada con la diversidad de datos recopilados por sensores especializados, brinda una plataforma integral para monitorear y comprender la complejidad de los factores químicos en el aire. En la Figura 1 se puede apreciar el esquema general de funcionamiento del sistema antes establecido de acuerdo con los factores a sensorizar.

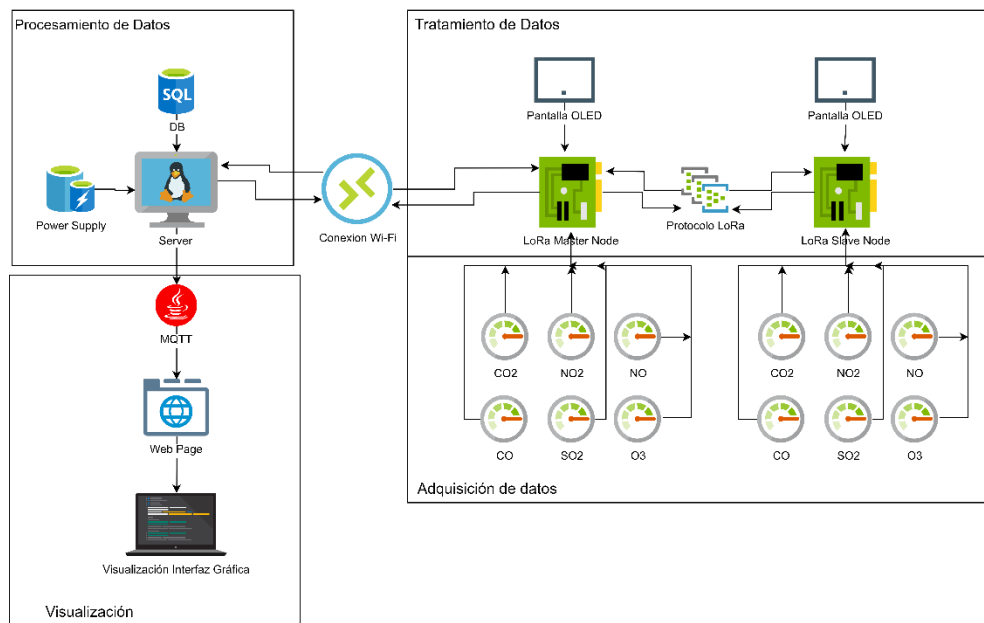


Figura 1. Esquema general del sistema inalámbrico

En el proceso de adquisición de datos para el sistema de monitoreo inalámbrico de factores químicos, se emplea la ESP32 LoRa como nodo principal, encargada de recopilar información de sensores como MQ-4, MQ-7, MQ-8, MQ-9, MQ-135, y MG-811. Los sensores capturan datos específicos sobre la calidad del aire, tales como concentraciones de gases y partículas.

Una vez que los sensores han registrado la información, la ESP32 LoRa utiliza la comunicación inalámbrica LoRa para transmitir los datos al servidor central, alojado en una Raspberry Pi 4. Durante el proceso, se aplican algoritmos de corrección de errores para asegurar la integridad de la transmisión y la precisión de los datos.

En el servidor, los datos recibidos son procesados mediante un software especializado que realiza diversas funciones. En primer lugar, se lleva a cabo un tratamiento de datos

que implica la validación y limpieza de la información para eliminar posibles valores atípicos o datos incorrectos. El paso es crucial para garantizar la calidad de los datos almacenados.

Después del tratamiento de datos, se inicia el proceso de procesamiento de datos. Aquí, se aplican algoritmos analíticos para interpretar y entender patrones, tendencias y relaciones en los datos. Pueden realizarse cálculos específicos para obtener estadísticas relevantes sobre la calidad del aire, como medidas de tendencia central, desviación estándar y varianza.

Finalmente, la visualización de datos se lleva a cabo utilizando herramientas gráficas o interfaces de usuario amigables. Las representaciones visuales permiten una comprensión rápida y clara de los resultados del monitoreo. Gráficos, tablas u otros elementos visuales pueden ser utilizados para presentar de manera efectiva la información recopilada, facilitando la interpretación de los datos tanto para usuarios técnicos como para el público en general.

3.3 Diseño del prototipo

3.3.1 Selección de los dispositivos

a. Selección de sensores

En el abordaje de la calidad del aire, la elección y comprensión de los sensores desempeñan un papel fundamental. La Tabla 7 presenta una comparativa de las características de sensores comerciales utilizados para medir los factores químicos críticos en la atmósfera: CO₂, NO₂, NO, CO, SO₂ y O₃. Los sensores representan herramientas esenciales en el monitoreo ambiental, desde la detección de emisiones vehiculares hasta la vigilancia de la calidad del aire en interiores. La diversidad de tecnologías y rangos de medición resaltados en la tabla reflejan la complejidad de la tarea de cuantificar y comprender la composición química del aire que respiramos diariamente.

Tabla 7. Características de sensores comerciales

Factor Químico	Sensor	Gases detectados	Rango de Medición	Sensibilidad	Precisión	Costo	Principales Aplicaciones
NO	MQ-135	Metano, óxido nítrico, hidrógeno, gas natural licuado (GLP)	100 a 1000 ppm	Alta	Baja	Bajo	Monitoreo de emisiones industriales y calidad del aire.
	TGS2602	Metano, óxido nítrico, dióxido de carbono, gas natural licuado (GLP)	100 a 1000 ppm	Alta	Baja	Medio	Monitoreo de la calidad del aire en interiores como hogares, oficinas y comercios.
NO ₂	MQ-7	Metano, dióxido de nitrógeno, butano, gas natural licuado (GLP)	100 a 1000 ppm	Alta	Baja	Bajo	Medición de emisiones vehiculares y calidad del aire urbano.
	TGS810	Metano, dióxido de nitrógeno, butano, gas propano, gas natural licuado (GLP)	100 a 1000 ppm	Alta	Alta	Bajo	Se aplica en sistemas de alarma de gas en entornos residenciales y comerciales.
CO	MQ-4	Monóxido de carbono	100 a 1000 ppm	Alta	Baja	Bajo	Detección de escapes vehiculares y monitoreo industrial.
	TGS820	Monóxido de carbono	100 a 1000 ppm	Alta	Baja	Medio	Se aplica en sistemas de seguridad y monitoreo ambiental.
CO ₂	MQ-9	Dióxido de carbono, gas natural licuado (GLP)	0 a 10000 ppm	Alta	Baja	Bajo	Monitoreo de calidad del aire en interiores y ventilación.
	MH-Z14A	Dióxido de carbono	0 a 5000 ppm	Alta	Alta	Medio	Se utiliza en sistemas de ventilación, control de calidad del aire y aplicaciones industriales.
SO ₂	MQ-8	Amoníaco, alcohol, benceno, humo, dióxido de azufre, cloro	5 a 10000 ppm	Media	Media	Medio	Control de emisiones en procesos industriales.
O ₃	MQ-131	Ozono, Monóxido de carbono, alcohol, benceno	5 a 10000 ppm	Media	Media	Medio	Encuentra aplicación en sistemas de control de emisiones, monitoreo ambiental y sistemas de seguridad.
	MG-811	Ozono, formaldehído, dióxido de carbono	5 a 10000 ppm	Media	Media	Medio	Monitoreo de calidad del aire y detección de ozono troposférico.

Se optó por elegir los sensores MQ-4, MQ-7, MQ-8, MQ-9, MQ-135 y MG-811 debido a su capacidad para detectar gases específicos mediante tecnología semiconductor. Aunque estos sensores poseen una precisión y alcance operativo limitados, destacan por requerir un mantenimiento mínimo como se detalla en los anexos Anexo A, Anexo A Anexo B, Anexo C, Anexo D y Anexo E. Además, los sensores están ampliamente disponibles en el mercado y son de fácil adquisición.

b. Selección de tecnología de comunicación inalámbrica

En la actualidad, el mundo de las telecomunicaciones ofrece una amplia gama de opciones, cada una con sus propias ventajas, limitaciones y aplicaciones específicas. Desde las redes celulares hasta las tecnologías LoRa, Zigbee, Sigfox y otras, la selección cuidadosa de la tecnología inalámbrica adecuada para el desarrollo del proyecto se convierte en un pilar crucial para garantizar la eficiencia, la cobertura, la seguridad y la integración óptima en el sistema de monitoreo como se puede observar en la Tabla 8 en la cual se detallan las características de las tecnologías de comunicación inalámbricas de largo alcance.

Tabla 8. Características de las tecnologías de comunicación inalámbricas

Características	LoRa	Zigbee	Sigfox
Banda de frecuencia	ISM (915/868 MHz)	ISM (800 MHz)	ISM (868 MHz)
Protocolo	MAC	MAC	MAC
Red	Malla	Celular	Celular
Tasa de datos	Hasta 50 kbps	Hasta 250 kbps	Hasta 100 bps
Rango	Hasta 20 km	Hasta 10 km	Hasta 10 km
Consumo de energía	Bajo	Bajo	Bajo
Costo	Bajo	Medio	Bajo
Aplicaciones	IoT industrial, de campo y rural	IoT urbano y suburbano	IoT urbano y suburbano

Se optó por LoRa al ser una tecnología de comunicación inalámbrica de largo alcance (LPWAN) que utiliza una modulación de frecuencia de salto (FHSS) con una baja tasa de datos y un bajo consumo de energía. LoRa es una buena opción para aplicaciones IoT que requieren un rango de comunicación de hasta 20 km, como el monitoreo de activos industriales, la agricultura de precisión y el seguimiento de activos.

c. Selección del microcontrolador con LoRa

En la Tabla 9 se presenta una recopilación detallada de las características de varios microcontroladores que incorporan el protocolo de comunicación LoRa. Los microcontroladores desempeñan un papel esencial en la implementación de sistemas de monitoreo de largo alcance y bajo consumo de energía. La información proporcionada abarca aspectos como la frecuencia de operación, la capacidad de procesamiento, la eficiencia energética y otras especificaciones relevantes para ayudar en la selección y diseño de soluciones robustas de comunicación inalámbrica LoRa.

Tabla 9. Características de los microcontroladores con tecnología LoRa

Característica	ESP32-S2 (TTGO)	ESP32-C3	NRF9160	STM32WLE5
Procesador	Dual-core Xtensa LX6	Single-core Xtensa LX106	Single-core Arm Cortex-M33	Single-core Arm Cortex-M4
Velocidad del procesador	Hasta 240 MHz	Hasta 160 MHz	Hasta 133 MHz	Hasta 168 MHz
RAM	256 MB	160 KB	64 KB	128 KB
Flash	4 MB	4 MB	1 MB	1 MB
Conectividad	Wi-Fi, Bluetooth, LoRa	Wi-Fi, Bluetooth, LoRa	Wi-Fi, Bluetooth, LoRa	Wi-Fi, Bluetooth, LoRa
Potencia	3,3 V	3,3 V	3,3 V	3,3 V
Costo	Bajo	Bajo	Medio	Medio

Se optó por la ESP32-S2 TTGO LoRa como microcontrolador del sistema por su capacidad de comunicación inalámbrica de largo alcance, lo cual es esencial para establecer una red de sensores eficiente en áreas extensas. Su diseño compacto y eficiencia energética la hacen ideal para aplicaciones de bajo consumo, garantizando una operación continua como se detalla en el Anexo F.

d. Selección del SBC para el servidor

Los (SBC) son una categoría de dispositivos electrónicos que combinan un procesador, memoria, almacenamiento y otros componentes en una sola placa. Los dispositivos son cada vez más populares para una amplia gama de aplicaciones, incluyendo la automatización del hogar, los proyectos de electrónica y el aprendizaje automático.

En la Tabla 10 se comparan cinco SBC populares: Raspberry Pi 4, Intel Galileo Gen 2, Jetson Nano, Orange Pi Zero y Rock64. La tabla proporciona información sobre las características de cada dispositivo, incluyendo el procesador, la memoria RAM, el almacenamiento, las conexiones y el precio.

Tabla 10. Características de los microcontroladores para el servidor

Características	Raspberry Pi 4	Intel Galileo Gen 2	Jetson Nano	Orange Pi Zero	Rock64
Procesador	Broadcom BCM2711C0, quad-core Cortex-A72	Intel Quark SE C2000, dual-core Cortex-A7	NVIDIA Tegra X1, quad-core Cortex-A57 + quad-core Cortex-A53	Allwinner H3, quad-core Cortex-A7	Rockchip RK3399, quad-core Cortex-A72 + quad-core Cortex-A53
Memoria RAM	Hasta 8 GB	512 MB	4 GB	512 MB	4 GB
Almacenamiento	MicroSD	MicroSD	MicroSD	MicroSD	MicroSD
Conexiones	2 puertos USB 3.0, 2 puertos USB 2.0, 1 puerto Ethernet, 1 puerto HDMI, 1 puerto GPIO	2 puertos USB 2.0, 1 puerto Ethernet, 1 puerto I2C, 1 puerto SPI, 1 puerto UART	4 puertos USB 3.0, 2 puertos USB 2.0, 1 puerto Ethernet, 1 puerto HDMI, 1 puerto MIPI CSI-2, 1 puerto MIPI DSI, 1 puerto UART, 1 puerto GPIO	1 puerto USB, 1 puerto I2C, 1 puerto SPI, 1 puerto UART	4 puertos USB 3.0, 2 puertos USB 2.0, 1 puerto Ethernet, 1 puerto HDMI, 1 puerto MIPI CSI-2, 1 puerto MIPI DSI, 1 puerto UART, 1 puerto GPIO
Precio	Desde 135 USD	Desde 150 USD	Desde 199 USD	Desde 110 USD	Desde 135 USD

Se optó por la Raspberry Pi destaca como una opción versátil y asequible para diversas aplicaciones. En el ámbito de la automatización del hogar, permite controlar dispositivos inteligentes. Además, su versatilidad se refleja en proyectos de electrónica personalizados, como robots y dispositivos IoT. También se posiciona como una herramienta valiosa para como método de aprendizaje de máquina y desarrollar modelos de este tipo. Sus ventajas incluyen un costo accesible, flexibilidad para una variedad de aplicaciones y el respaldo de una activa comunidad de usuarios y desarrolladores. En comparación con dispositivos similares comerciales, la Raspberry Pi ofrece ventajas notables en términos de precio, rendimiento y compatibilidad, consolidándola como una elección sólida para proyectos electrónicos y de aprendizaje.

e. Selección del protocolo de mensajería

La comunicación entre dispositivos es un aspecto fundamental de la informática y las comunicaciones. Los protocolos de comunicación proporcionan un conjunto de reglas que permiten a los dispositivos intercambiar datos de manera segura y confiable.

En la Tabla 11 se compara tres protocolos de comunicación populares: MQTT, COAP, y XMPP. Los protocolos se utilizan en una amplia gama de aplicaciones, incluyendo IoT, automatización, control industrial, chat, mensajería, colaboración y streaming de datos.

Tabla 11. Características de los protocolos de mensajería

Características	MQTT	COAP	XMPP
Tipo	Publicación/suscripción	Cliente/servidor	Cliente/servidor
Protocolo de transporte	TCP	TCP	TCP o UDP
Orientación	Orientado a mensajes	Orientado a mensajes	Orientado a mensajes
Seguridad	Soporta cifrado	Soporta cifrado	Soporta cifrado
Autenticación	Soporta autenticación	Soporta autenticación	Soporta autenticación
Confidencialidad	Soporta confidencialidad de los datos	Soporta confidencialidad de los datos	Soporta confidencialidad de los datos
Integridad	Soporta integridad de los datos	Soporta integridad de los datos	Soporta integridad de los datos
Resiliencia	Resiliente a la pérdida de paquetes	Resiliente a la pérdida de paquetes	Resiliente a la pérdida de paquetes
Escalabilidad	Escalable a grandes redes	Escalable a grandes redes	Escalable a grandes redes
Costo	Bajo	Bajo	Bajo
Aplicaciones	IoT, automatización, control industrial	IoT, aplicaciones de streaming de datos	Chat, mensajería, colaboración

Se optó por MQTT por ser un protocolo de publicación/suscripción ligero y eficiente que se utiliza comúnmente en aplicaciones IoT. Es un buen equilibrio entre simplicidad y funcionalidad, y es relativamente fácil de implementar.

3.3.2 Diseño de la placa de control

a. Esquemático

El diseño técnico del sistema incorpora características esenciales para asegurar el rendimiento y la seguridad. El sistema opera a 5.2 V tanto para los sensores como para la placa, con un amperaje de consumo de 0.5A. Para prevenir sobrecargas eléctricas, se ha implementado un circuito de protección junto con un diodo. Además, se incluye un circuito de regulación de voltaje para mantener una alimentación estable. La mitigación del ruido eléctrico se logra mediante una capa a GND, y se han activado filtros por software para mejorar la precisión de las mediciones. El sistema emplea un convertidor analógico a digital (ADC) para gestionar los sensores analógicos y cuenta con borneras de conexión para facilitar la instalación de los sensores. Se añade un interruptor de encendido/apagado para mayor control, y se incorpora un slot para el microcontrolador, asegurando una instalación y mantenimiento sencillos. Estas características técnicas garantizan un funcionamiento confiable y eficiente en diversas condiciones ambientales.

En la Figura 2 y Figura 3 se muestra el diseño del circuito para el sistema de monitoreo inalámbrico, mismo que se centra en la eficiencia y la seguridad. Utiliza nodos ESP32 con módulos LoRa para recopilar datos de sensores de gases, como MQ-4, MQ-7, MQ-8, MQ-9, MQ-135 y MG-811. Para mejorar la calidad de las lecturas, se incorporan filtros de paso bajo. La alimentación se gestiona mediante circuitos acopladores, permitiendo la conexión a una batería LiPo con protección contra sobretensiones.

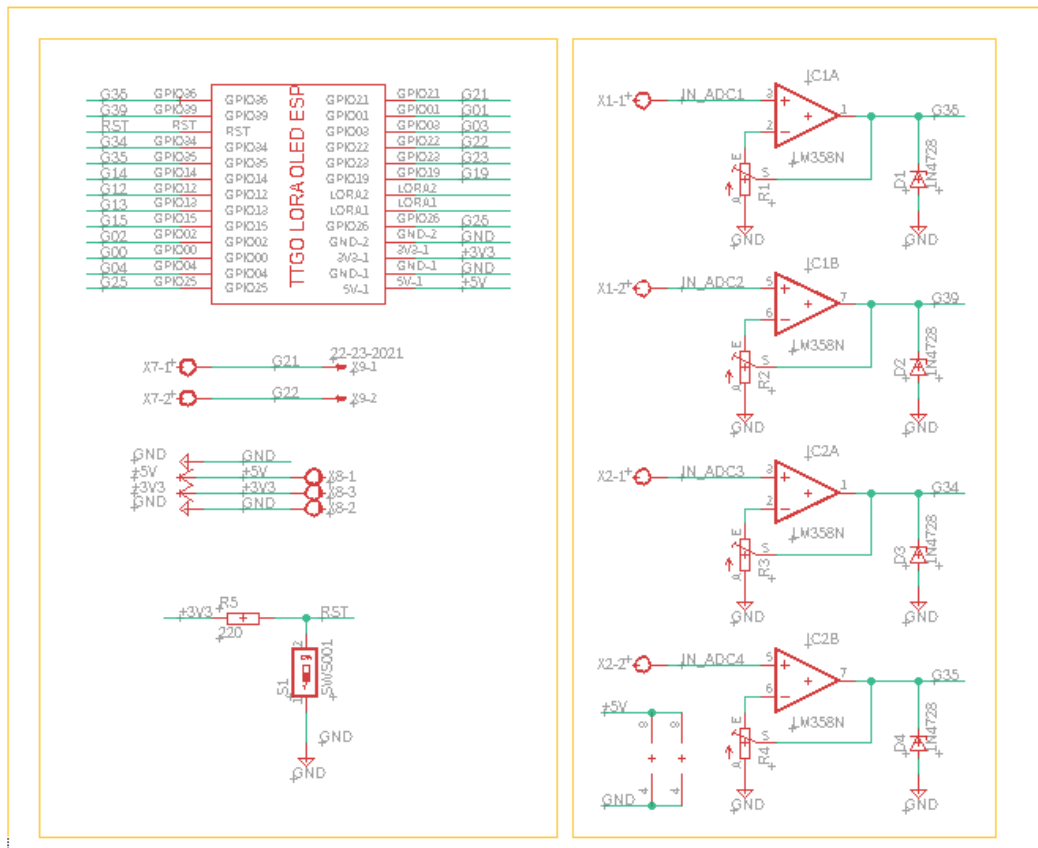


Figura 2. Diseño esquemático del nodo maestro

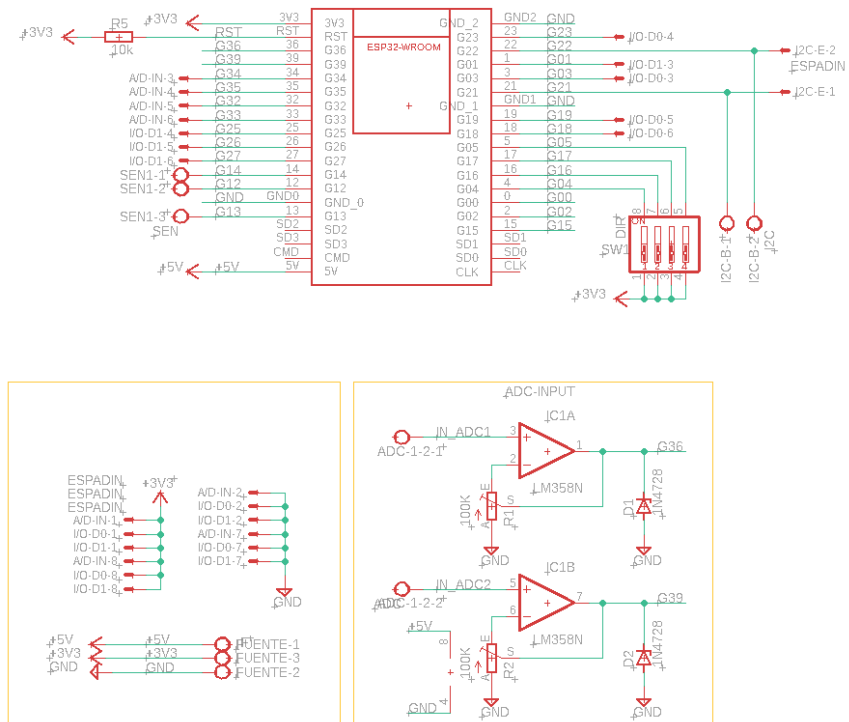


Figura 3. Diseño esquemático del nodo esclavo

Los módulos mencionados demandan corrientes de accionamiento que superan las capacidades de suministro de los microcontroladores. Por ende, se hace imprescindible contar con una fuente de alimentación externa para energizar eficazmente los módulos. Aunque los microcontroladores no pueden proporcionar la corriente requerida, desempeñan un papel crucial al enviar comandos de activación o desactivación mediante sus pines. La separación funcional entre la fuente de alimentación y los comandos del microcontrolador asegura un funcionamiento seguro y eficiente del sistema. Además, otorga una flexibilidad significativa en el diseño y la gestión de la energía, permitiendo adaptarse de manera óptima a los requisitos específicos del sistema.

En la Figura 4 se muestra la implementación de un Convertidor Analógico-Digital (ADC) dedicado para cada sensor en el dispositivo presenta diversos beneficios. En primer lugar, la estrategia garantiza una precisión óptima en las conversiones, ya que cada sensor puede tener características y rangos de salida únicos que requieren ajustes específicos de resolución. Al evitar el uso de un único ADC para múltiples sensores, se minimiza el riesgo de interferencias cruzadas entre las señales analógicas, contribuyendo a la integridad de las mediciones.

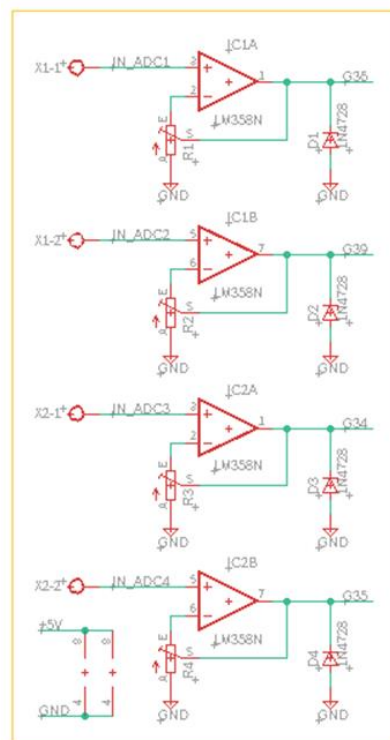


Figura 4. Convertidores Analógicos - Digitales

En la Figura 5 se visualiza la asignación individual de un ADC a cada sensor también permite la optimización de la resolución, adaptando cada convertidor a los requisitos particulares de cada sensor. La personalización no solo mejora la precisión, sino que también evita posibles distorsiones que podrían surgir al utilizar un ADC común. Además, al distribuir la carga de conversión entre varios ADC, se logra un rendimiento general mejorado del sistema, ya que cada convertidor puede operar de manera eficiente en su rango óptimo.

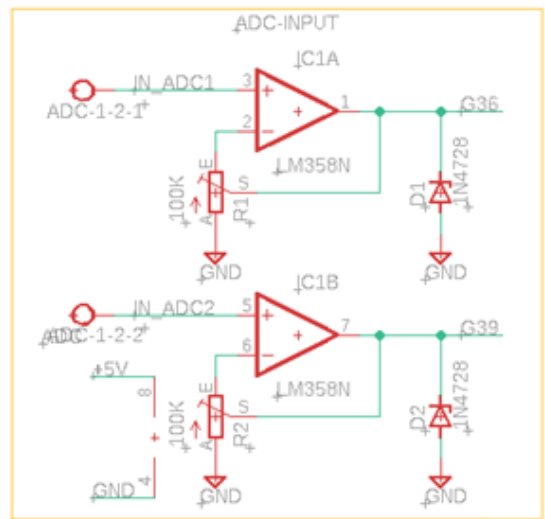


Figura 5. Generación de filtrado

La flexibilidad en el diseño se ve favorecida, ya que cada sensor es manejado de forma independiente, facilitando la incorporación de nuevos sensores o ajustes en la configuración sin afectar otros componentes. Además, la asignación individual de ADC brinda un mayor control y capacidad de diagnóstico. Se puede realizar un monitoreo preciso de la salud y el rendimiento de cada sensor, simplificando la identificación de posibles problemas o malfuncionamientos.

Como se muestra en la Figura 6 la ESP32-S2 TTGO LoRa cuenta con varios puertos analógicos a los cuales se les puede asignar funciones de Convertidores Analógico-Digitales (ADC). Los puertos ADC permiten la lectura de señales analógicas provenientes de sensores o dispositivos externos. La flexibilidad de la ESP32-S2 TTGO LoRa se destaca al ofrecer múltiples puertos ADC, lo que posibilita la conexión y lectura simultánea de diversos sensores analógicos.

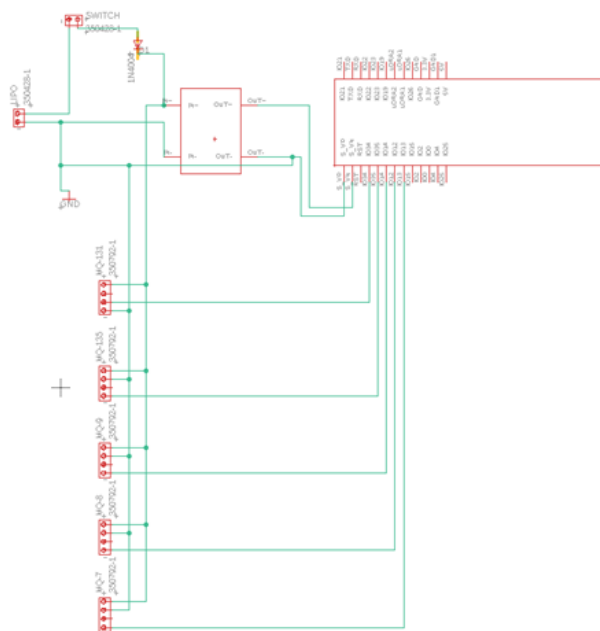


Figura 6. Conexión directa a puertos con ADC

La capacidad de la ESP32-S2 TTGO LoRa de manejar múltiples puertos ADC es especialmente beneficiosa en sistemas de monitoreo ambiental donde la diversidad de sensores es esencial. La asignación individual de puertos ADC facilita la integración de sensores específicos y optimiza la lectura de sus señales analógicas, contribuyendo a un monitoreo preciso y eficiente de los factores químicos presentes en el aire.

La comunicación inalámbrica entre nodos y una Raspberry Pi 4, que actúa como servidor central, es esencial. El diseño compacto prioriza la portabilidad y la eficiencia energética, para optimizar la duración de la batería. Se implementan medidas de protección, como diodos Zener y varistores, para salvaguardar el circuito contra posibles picos de voltaje. El código desarrollado permite la captura, formato y transmisión de datos, mientras que la Raspberry Pi 4 los recibe, procesa y almacena para análisis posterior. El proceso se replica en los nodos aplicados, cumpliendo con la escalabilidad del diseño, tomando en cuenta las características de un módulo esclavo o master, directamente en su código de programación.

El diseño integral proporciona una solución robusta y eficiente para el monitoreo inalámbrico de factores químicos, asegurando la fiabilidad de los datos y la protección del circuito en diversas condiciones.

b. PCB

El proceso de generación de la placa PCB de doble cara para el sistema de monitoreo inalámbrico de factores químicos se inicia con el diseño del esquemático, donde se detallan todos los componentes y conexiones. Luego, se procede al diseño de la placa PCB, optimizando el espacio y asegurando una disposición eficiente de los elementos como se muestra en la Figura 7 y Figura 8. La inclusión de filtros, circuitos de acondicionamiento y la ubicación estratégica de la ESP32 y el módulo LoRa en este caso están ubicados en la esquina superior derecha, por mejor visibilidad y aprovechamiento de espacio debido a la antena transmisora que poseen.

Se incorpora un sistema de alimentación mediante un circuito acoplador para batería LiPo, con medidas de protección contra sobretensiones. En la Figura 9 se visualiza el circuito impreso.

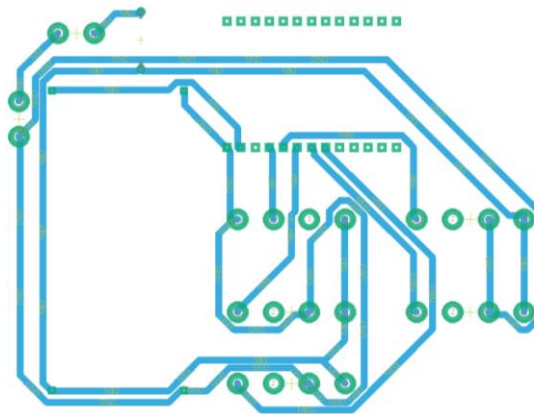


Figura 7. Cara superior del diseño de PCB

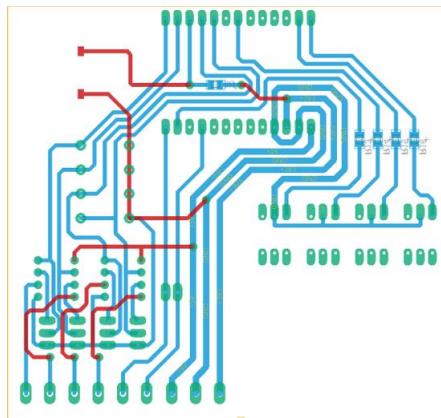


Figura 8. Cara inferior del diseño de PCB

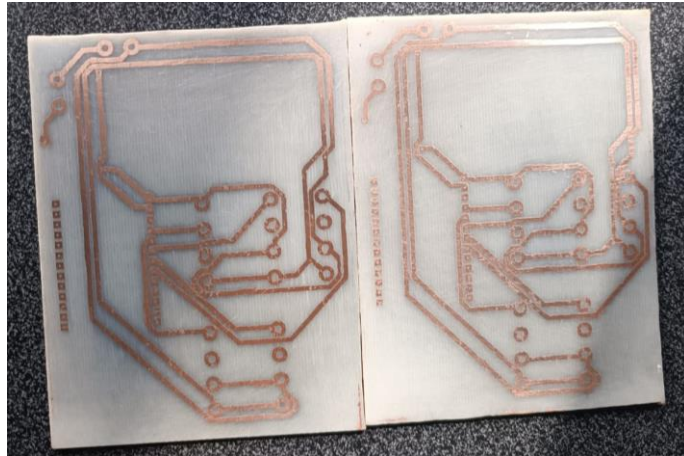


Figura 9. Circuito impreso

3.3.3 Construcción del prototipo

a. *Diseño 3D*

Para asegurar la protección efectiva del dispositivo en ambientes exteriores, se inicia el proceso con el modelado 3D del case protector. Utilizando software especializado como FUSION 360, se crea un diseño que se ajusta perfectamente a las dimensiones de la placa PCB y que garantiza un espacio adecuado para todos los componentes esenciales. En la Figura 10 se visualiza el diseño enfocado en la mejora de la resistencia a las condiciones climáticas adversas, incorporando refuerzos estructurales y una construcción robusta para soportar vientos fuertes, lluvia y cambios de temperatura. Además, se integran sellos y cierres herméticos para garantizar la impermeabilidad del case.

Se presta especial atención al acceso a los componentes esenciales, diseñando aberturas que permitan el fácil acceso a puertos de carga, botones y otros puntos importantes de la placa PCB, sin comprometer el sellado. También se incorporan características de drenaje para evitar la acumulación de agua de lluvia dentro del case, como canales de drenaje estratégicamente ubicados. En la Figura 11 se observa el prototipo físico.

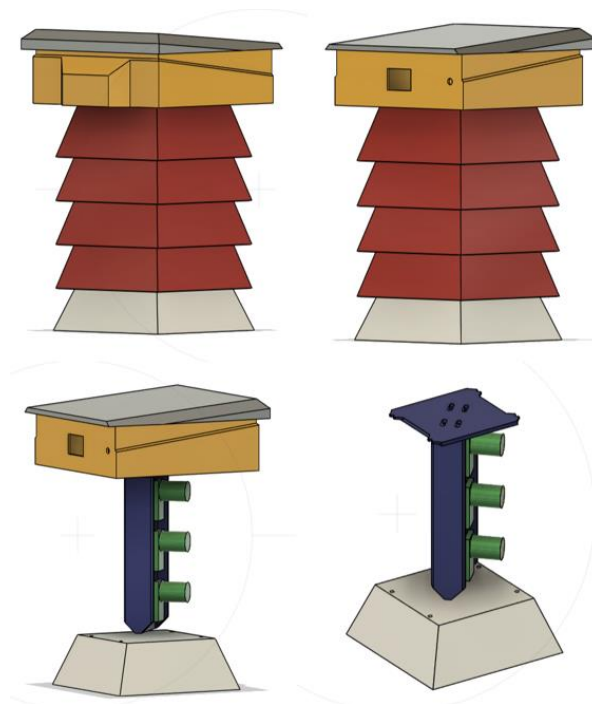


Figura 10. Diseño 3D del prototipo



Figura 11. Prototipo físico

b. Ensamblaje

El ensamblaje del prototipo del sistema de monitoreo inalámbrico de factores químicos se lleva a cabo de manera sistemática para garantizar una integración eficiente de todos los componentes como se puede visualizar en la Figura 12. En primer lugar, se conectan los sensores, como el MQ-4, MQ-7, MQ-8, MQ-9, MQ-135 y MG-811, a los puertos ADC disponibles en la ESP32-S2 TTGO LoRa. Cada sensor se coloca estratégicamente para obtener mediciones representativas de la calidad del aire en la parroquia Santa Rosa.

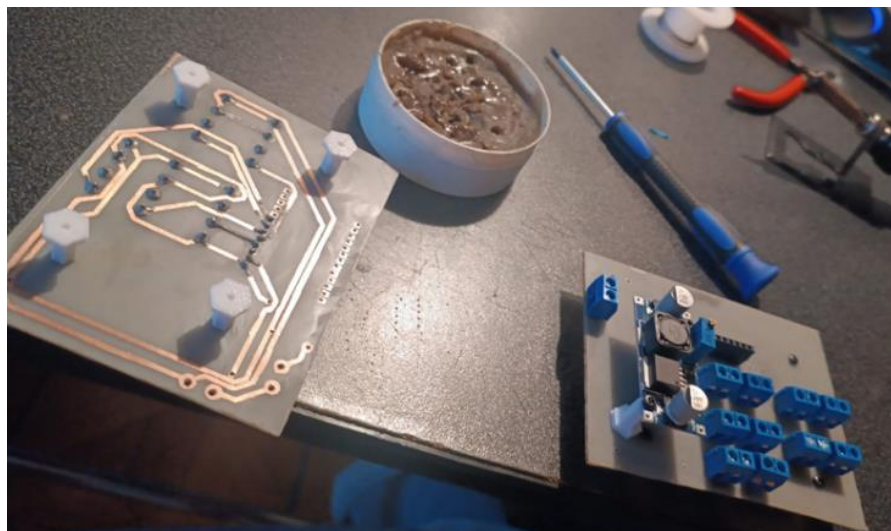


Figura 12. Soldadura de los componentes

Posteriormente, se implementan circuitos de protección eléctrica para asegurar el correcto funcionamiento de los sensores y la ESP32-S2 TTGO LoRa. Los circuitos incluyen filtros para atenuar el ruido en las señales de los sensores y sistemas de protección contra sobretensiones que resguardan tanto los sensores como el SBC de posibles picos de voltaje.

La alimentación del sistema se realiza mediante una batería tipo LiPo, para la cual se integran circuitos acopladores que regulan y estabilizan la energía suministrada. La elección de fuente de energía asegura una autonomía adecuada para el prototipo y facilita su implementación en entornos exteriores.

El proceso de comunicación LoRa entre una Raspberry Pi 4 y un dispositivo LoRa en modo master-slave implicó configurar adecuadamente ambos dispositivos para utilizar Node-RED y MQTT como protocolos de comunicación. En primer lugar, se configura el dispositivo LoRa como el nodo maestro, que será el encargado de iniciar la comunicación y enviar datos. Se estableció los parámetros de comunicación LoRa, como la frecuencia de operación, la velocidad de transmisión y la potencia de salida, utilizando el protocolo LoRa.

Por otro lado, la Raspberry Pi 4 se configura como el nodo esclavo, que actúa como receptor de los datos enviados por el nodo maestro LoRa. Se instaló y configuró Node-RED en la Raspberry Pi 4, es una herramienta de código abierto para conectar dispositivos, APIs y servicios de forma visual. Se utilizó Node-RED para crear flujos

de comunicación que gestionaron la recepción de datos LoRa a través de MQTT, un protocolo de mensajería ligero que funciona sobre TCP/IP y fue ideal para la comunicación en redes IoT.

Una vez configurados ambos dispositivos, se inicia el proceso de comunicación. El nodo maestro LoRa transmite mensajes o datos mediante la radiofrecuencia LoRa, empleando el protocolo LoRa. Los datos viajan a través del protocolo LoRa hasta alcanzar el nodo LoRa más cercano. Cada nodo envía los datos al servidor en la Raspberry Pi 4, donde son procesados y retransmitidos a través del protocolo MQTT.

La Raspberry Pi 4, configurada con Node-RED y un cliente MQTT, suscribe un tema específico para recibir los datos enviados por el nodo maestro LoRa. Cuando llegan los datos, Node-RED los procesa según la lógica de los flujos previamente configurados. Los datos se almacenan en una base de datos.

Finalmente, se diseñó e imprimió en 3D un estuche protector resistente a condiciones climáticas adversas para resguardar el conjunto de sensores y microcontrolador como se puede visualizar en la Figura 13. El estuche garantiza la durabilidad y la protección del sistema en entornos exteriores.



Figura 13. Estuche del dispositivo

En conjunto, el proceso de ensamblaje asegura la integración cohesiva y eficiente de todos los elementos del prototipo, creando un sistema de monitoreo completo y funcional para evaluar la contaminación del aire en la parroquia Santa Rosa.

c. Ubicación del dispositivo

Los dos dispositivos del sistema de monitoreo se ubican estratégicamente en el centro urbano de la parroquia Santa Rosa, específicamente a lo largo de la avenida principal debido a la gran concurrencia vehicular y humana. Para maximizar la cobertura y representatividad de los datos, se instalaron en postes de alumbrado público a una altura de 2,5 metros sobre el suelo. La distancia entre los nodos, es decir, la distancia entre los dos dispositivos se estableció en 280 metros como se puede visualizar en la Figura 14.

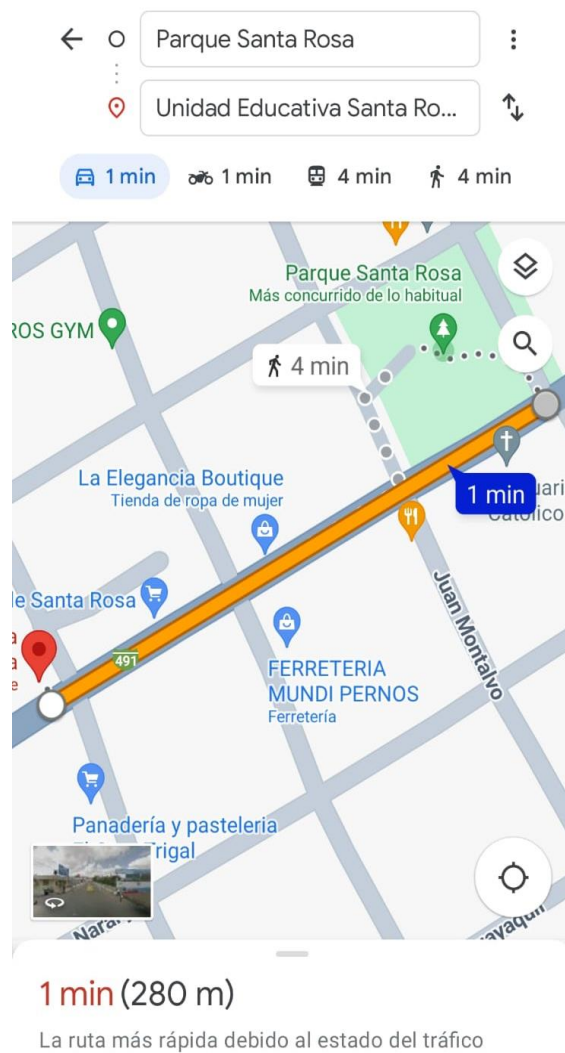


Figura 14. Distancia entre nodos

Se realizó la selección meticulosa de las ubicaciones específicas, designando el nodo 1 al Parque Santa Rosa y el nodo 2 a la Avenida Sucre, el último cercano tanto a la Unidad Educativa Santa Rosa como al mercado local como se puede visualizar en la Figura 15 y en el Anexo G. Las zonas se consideran puntos de alta concurrencia en la vida diaria de la población de Santa Rosa, lo que garantiza que los dispositivos puedan capturar de manera efectiva las variaciones en la calidad del aire en áreas centrales y de tráfico intenso. La disposición estratégica no solo permite una monitorización representativa, sino que también considera la exposición potencial de la población a diferentes factores químicos en el aire. La información recopilada desde las ubicaciones es fundamental para comprender la calidad del aire en el entorno cotidiano de la comunidad y tomar medidas adecuadas en función de los datos precisos.

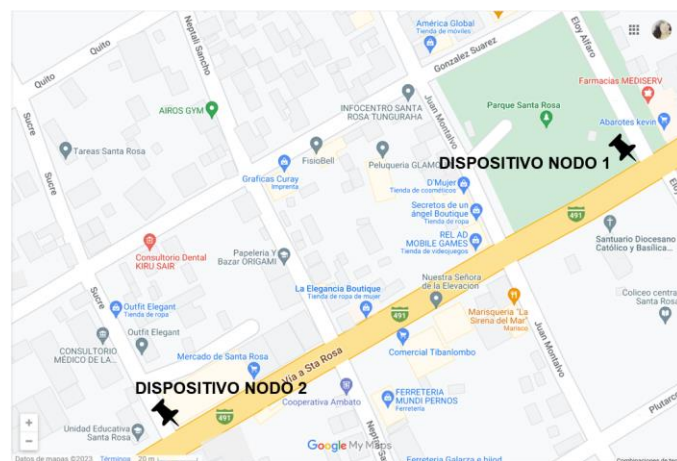


Figura 15. Ubicación de los dispositivos

d. Diagrama de flujo del sistema

El siguiente diagrama de flujo presentado en la Figura 16 representa el funcionamiento del sistema de monitoreo inalámbrico de factores químicos en la parroquia Santa Rosa, es una herramienta visual que ilustra de manera clara y concisa cada etapa crucial del proceso. Desde la captura de datos por los sensores MQ-4, MQ-7, MQ-8, MQ-9, MQ-135 y MG-811 conectados a la ESP32 LoRa, hasta la transmisión de los datos al servidor en la nube y a la Raspberry Pi, el diagrama proporciona una guía visual para comprender la secuencia de acciones. El enfoque gráfico no solo facilita la comprensión del flujo de trabajo, sino que también sirve como recurso valioso para identificar posibles puntos de mejora y optimización en el sistema.

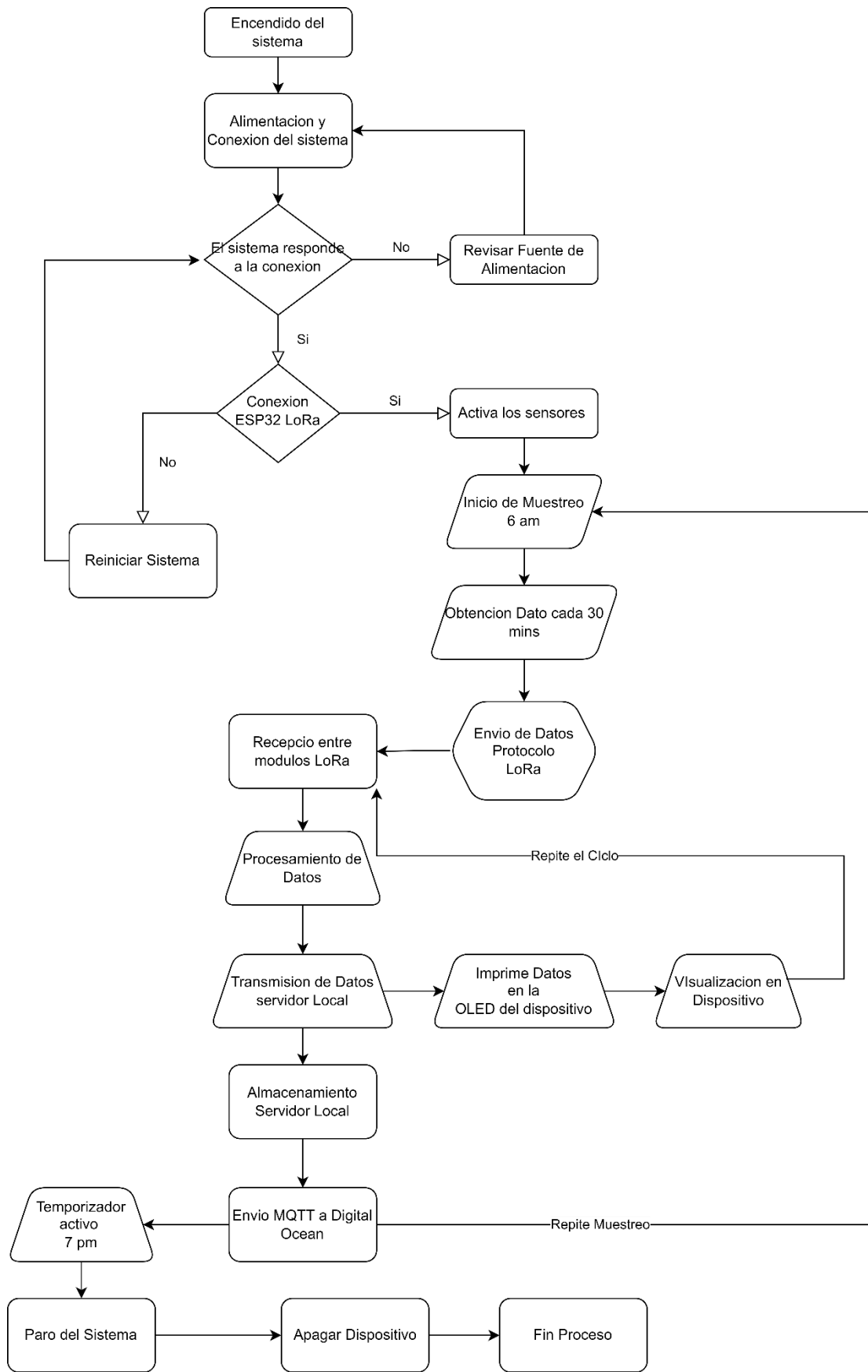


Figura 16. Diagrama de flujo

e. Algoritmo de desarrollo

En el desarrollo del dispositivo se utilizó el software libre Arduino, el cual permite el uso directo de cada uno de los sensores, al igual como IDE de programación se usa Platformio como compilador de código.

- Se incluyen las bibliotecas necesarias, como MQ Gas Sensor Library, Wire para la comunicación I2C, y se definen constantes y variables.

```
#include <Arduino.h>
#include <MQ Gas Sensor_DT.h>
#include <Wire.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
```

- Se establece el pinout del dispositivo, asignando pines a las entradas y salidas utilizadas para conectar los sensores y otros componentes.

```
#define DHTPIN 13
#define d_sw0 4
#define d_sw1 16
#define d_sw2 17
#define d_sw3 5
#define SDA 21
#define SCL 22
#define q0 2
#define q1 15
#define LoRa_BAND 915E6
#define OLED_ADD 0x3C
#define SCREEN_WIDTH 128 // OLED display width, in pixels
#define SCREEN_HEIGHT 64 // OLED display height, in pixels
#define resistor 10000
#define volt 3.3
#define timefilter 50
#define timei2c 10
#define id 1
```

- Se declara un objeto MQ Gas Sensor para manejar cada uno de los sensores usados.
- Se define un método "escritura" que envía datos a través del bus I2C. En este caso, se envían las lecturas de cada sensor en un formato específico.

```

void escritura() {

    // int s_hs = analogRead(sensor_hums);
    String x = "";
    x = (String(temp) + "t" + String(hum) + "h" + String(hums) +
"s");
    Wire.write(x.c_str());
    // Serial.print("valor envio de datos: ");
    // Serial.println(x);
}

void leer_sensores() {
    float S1 = dht.readHumidity();
    float S2 = dht.readTemperature();
    int s_hs = analogRead(sensor_gh);
    hums = 100 - (s_hs * 100 / 4096);
    // float hs = s_hs;
    if (isnan(h) || isnan(t)) {
        // Serial.println(F("Failed to read from sensor!"));
        return;
    }
    S1 = t;
    S2 = h;
    // Serial.println(analogRead(sensor_hums));
    // hums = hs;
}

```

- Se define un método "leer_sensores" para obtener las lecturas de los sensores y calcular los valores relativos a partir de la lectura analógica.
- Se establece un método "eventoRecepcion" que maneja la recepción de datos a través del bus I2C.

```

void eventoRecepcion(int event) {
    message = Wire.readString();
    Serial.println("Mensaje RX");
    Serial.println(message);
    q[0] = message.substring(0, message.indexOf('a')).toInt();
    q[1] = message.substring(message.indexOf('a') + 1,
message.indexOf('b')).toInt();
    Serial.println(q[0]); Serial.println(q[1]); }

```

- En el método "setup", se inicializan los pines y los sensores, se configura la dirección I2C según la posición de interruptores (d_sw0, d_sw1, d_sw2, d_sw3) y

se registra la función "escritura" para eventos de solicitud I2C y la función "eventoRecepcion" para eventos de recepción.

```
Serial.begin(115200);
Serial.println(F("DHTxx test!"));
pinMode(d_sw0, INPUT_PULLDOWN);
pinMode(d_sw1, INPUT_PULLDOWN);
pinMode(d_sw2, INPUT_PULLDOWN);
pinMode(d_sw3, INPUT_PULLDOWN);
pinMode(sensor_hums, INPUT);
pinMode(q0, OUTPUT);
pinMode(q1, OUTPUT);
```

- En el bucle principal ("loop"), se realiza la lectura de los sensores, se actualizan los valores de los pines de salida (q0, q1) y se espera un breve periodo de tiempo.

```
delay(500);
leer_sensores();
digitalWrite(q0, q[0]);
digitalWrite(q1, q[1]);
```

- Variables y Configuración Inicial:

Se declaran variables y constantes para el manejo de datos y configuración e inicializan objetos como el display OLED, se configuran los pines y la comunicación LoRa.

```
boolean fun, envio = 0;
byte dir_i2c[15];
char char_dir;
int counter = 0, n_dir = 0, s_luz = 0, s_ph = 0, s_cor = 0;
int id_e, id_r;
float tmp_s[15], hum_s[15], hums_s[15];
float tmp_p, hum_p, hums_p, pW, ph, pc, vr_luz, vr_ph;
long timeref = 0, timeaux = 0;
unsigned long aux_f = 0, cont_f = 0;
String datoI2Creceive = "", datoLoRareceive = "";
```

- Scanner:

Escanea la red I2C en busca de dispositivos conectados, especialmente aquellos relacionados con sectores de cada nodo.

```
Serial.println();
Serial.println("Buscando dispositivos I2C...");
```



```

byte count = 0;
n_dir = 0;
for (byte i = 0; i < 120; i++) {
  Wire.beginTransaction(i);
  if (Wire.endTransmission() == 0) {
    if (i < 16) { // direcciones para modulos esclavos de
invernaderos
      dir_i2c[n_dir] = i;
      n_dir++; }
    count++; }
}

```

- Monitor de Sectores:

Lee datos de cada uno de los sensores de múltiples sectores a través de I2C y calcula promedios de cada uno de los sensores.

- Lectura Analógica:

Utilizando métodos específicos del sensor, se procesan cada uno de los datos analógicos recibidos, logrando así obtener el valor final ya convertido.

```

if ((now_f - aux_f) > timefilter) {
  aux_f = now_f;
  cont_f++;
  s_luz = s_luz + analogRead(pin_sensor_luz);
  s_ph = s_ph + analogRead(pin_sensor_ph);
  s_cor = s_cor + analogRead(pin_sensor_cortinas);
  s_luz = s_luz / cont_f;
  s_ph = s_ph / cont_f;
  s_cor = s_cor / cont_f;
  pc = s_cor * 100 / 4095;
  vr_luz = (s_luz * 2 * volt / 4095) * 1000;
  vr_ph = ((4095 - s_ph) * volt / 4095) * 3.3;
  ph = vr_ph;
  pW = pow(vr_luz, 2) / resistor;
  cont_f = 0;
  s_luz = 0;
  s_ph = 0;
  s_cor = 0; }

```

- Impresión en OLED:

Muestra información clave en la pantalla OLED, como el contador de paquetes LoRa enviados, el número de sectores y mensajes de inicialización.

- Comunicación LoRa - Envío y Recepción:

Envía y recibe datos a través de la comunicación LoRa. Si recibe un mensaje LoRa, analiza la información para determinar el ID del emisor, el ID del receptor, la función a realizar y los datos asociados.

```
while (LoRa.available()) {
    String LoRaData = LoRa.readString();
    Serial.print("recivido --> ");
    Serial.println(LoRaData);
    byte pos1 = LoRaData.indexOf('r');
    byte pos2 = LoRaData.indexOf('e');
    byte pos3 = LoRaData.indexOf('f');
    id_r = LoRaData.substring(0, pos1).toInt();
    id_e = LoRaData.substring(pos1 + 1, pos2).toInt();
    fun = LoRaData.substring(pos2 + 1, pos3).toInt();
    datoLoRareceive = LoRaData.substring(pos3 + 1,
    LoRaData.length());
    envio = 1;
}
```

- Configuración Inicial:

Se inicia el dispositivo LoRa, el OLED y se realiza la exploración inicial de la red I2C.

- Bucle Principal:

El bucle principal ejecuta las funciones descritas anteriormente en un ciclo continuo.

```
if (id_r == id && envio == 1) {
    for (int i = 0; i < 2; i++) {
        if (fun == 0) {
            String datoLoRasned = (String(id_e) + 'r' + String(id_r) +
            'e' + String(1) + 'f' + datoI2Creceive + String(pW).c_str() + 'w'
            + String(ph).c_str() + 'p' + String(pc).c_str() + 'c');
            LoRa.beginPacket();
            LoRa.print(datoLoRasned);
            LoRa.endPacket();
            Serial.println(datoLoRasned);
            delay(10); } }
}
```

Se presenta de manera detallada el código de programación del microcontrolador en el Anexo H.

f. Estructura de lectura de la base de datos

En la Figura 17 se establece la entidad de relación de la base de datos, la tabla Sensores Nodo 1 y Sensores Nodo 2 almacena los datos de los sensores químicos. Cada registro está identificado por un Id único y contiene la fecha y hora de la medición, así como los valores de los diferentes gases medidos (NO₂, NO, SO₂, CO, CO₂ y O₃).

La tabla Herramientas contiene el tipo de base de datos, el protocolo MQTT donde se almacena los datos recibidos del servidor MQTT y Node-RED donde genera un llamado de la base de datos para la lectura de datos y su posterior presentación en un dashboard.

Cada una de estas tablas tiene un campo Id como clave primaria (PK) para identificar de manera única cada registro. Los datos son compartidos entre las diferentes tablas a través de la fecha y la hora de la medición.

- Las entidades se representan como rectángulos con sus atributos en su interior.
- Las relaciones se representan como flechas que conectan las entidades.
- La cardinalidad de las relaciones se indica cerca de las flechas.
- Los tipos de datos de los atributos se indican entre paréntesis.

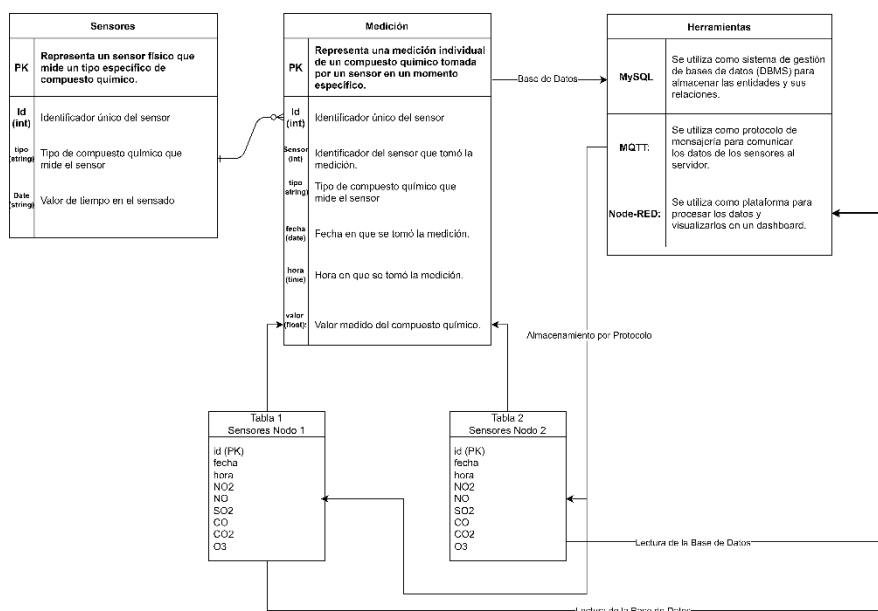


Figura 17. Estructura de lectura de la base de datos

g. Interfaz gráfica

En la Figura 18 se visualiza la interfaz gráfica del dispositivo, misma que ofrece una experiencia intuitiva y accesible para interactuar con los datos recopilados. Mediante el empleo de Node-RED, configuraciones en PHP y JavaScript se logró la creación de una página web para obtener información a través del protocolo MQTT. En cuanto al aspecto visual, se utilizó CSS como lenguaje de programación, proporcionando una interfaz estética. Esto permite a los usuarios acceder de forma remota y eficiente a los datos recopilados por el sistema de monitoreo, brindando una experiencia de usuario mejorada y accesible desde cualquier ubicación. La visualización de los datos se potencia mediante un dashboard interactivo, que utiliza widgets personalizados para presentar de manera clara y concisa la información. El enfoque no solo brinda acceso fácil a los datos ambientales, sino que también permite un monitoreo en tiempo real, facilitando la toma de decisiones informadas en respuesta a las condiciones del aire en la parroquia Santa Rosa.



Figura 18. Diseño de la interfaz

Al ingresar a la interfaz gráfica, se observa un botón que conduce al apartado de ingreso, en el cual, como se puede observar en la Figura 19 tenemos un ingreso por niveles, en el cual el primer nivel o “admin” en el cual tiene la capacidad de acceder, gestionar o modificar configuraciones de sistemas o cuentas, mientras que “usuario” solo tiene los permisos de acceder, gestionar, por último el “invitado” solo tiene permiso de visualización del sistema.

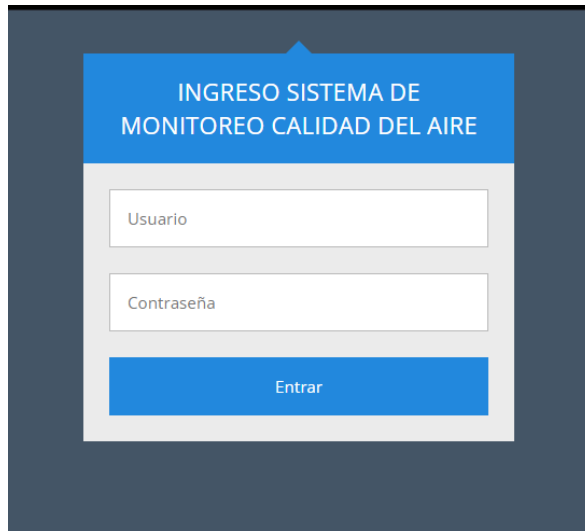


Figura 19. Ingreso del Sistema

La Figura 20 ilustra el valor en tiempo real de cada factor químico captado por cada nodo. Este valor se actualiza en tiempo real durante la toma de datos, que ocurre cada 2 segundos. El microcontrolador mide, registra y procesa este valor antes de transmitirlo al servidor en la nube a través de MQTT y también a los nodos de comunicación del sistema mediante comunicación inalámbrica.



Figura 20. Visualización de datos por Factor Químico

La representación gráfica de la Figura 21 de los valores de muestreo mediante un gráfico de barras de tres secciones en Highcharts ofrece una visión clara y diferenciada de la calidad del aire. Cada barra se divide en tres segmentos distintos: el primero representa el valor normal de referencia, el segundo refleja el margen de error asociado, y el tercero indica el aumento o disminución en los niveles de contaminación. La presentación visual permite una rápida identificación de la relación entre el valor medido y el valor medio de medición, dependiendo del porcentaje de error, se evidencian variaciones significativas.

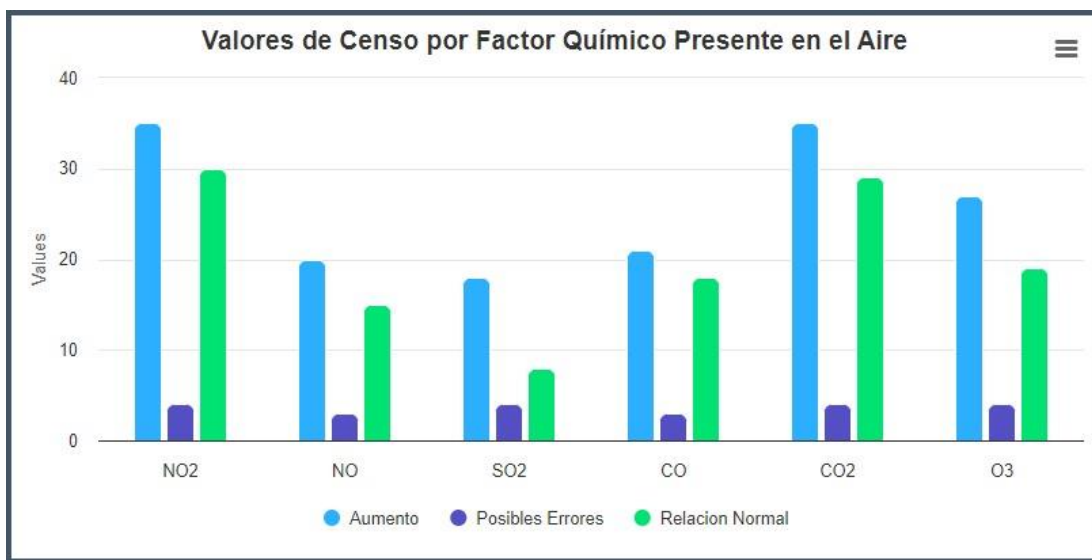


Figura 21. Valores de aumento, relación normal y error

En la Figura 22 se puede visualizar el porcentaje de mediciones de acuerdo con el aumento de medición durante el día, el gráfico Highcharts que ofrece una perspectiva detallada y organizada de la variación de factores químicos a lo largo del día, tomando en cuenta el aumento o disminución del valor. El gráfico proporciona una clara segmentación temporal, permitiendo a los usuarios identificar patrones específicos de contaminación con respecto al porcentaje obtenido.

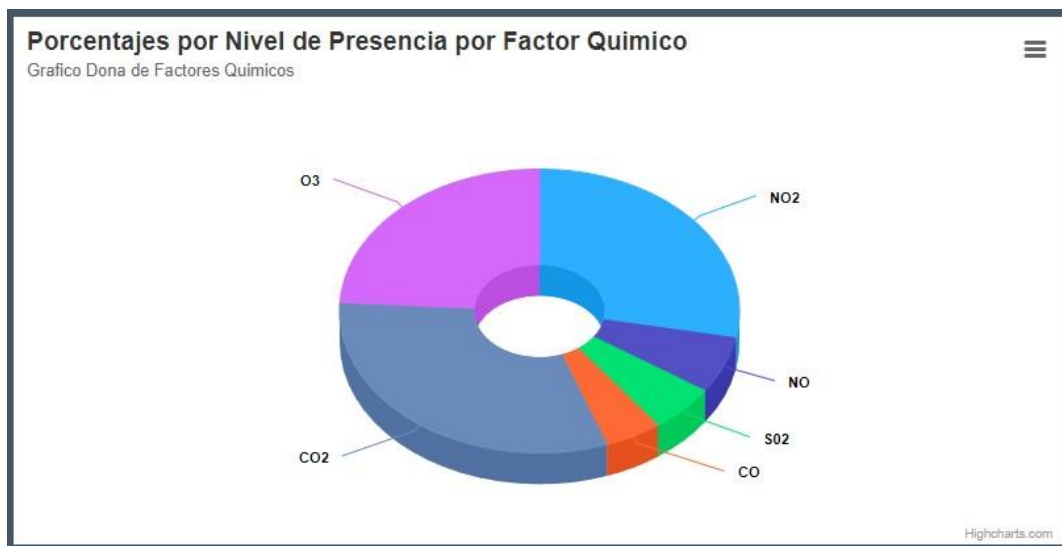


Figura 22. Nivel de presencia por factor químico

La visualización del historial de mediciones de la base de datos se presenta de manera dinámica y accesible a través de un gráfico interactivo Highcharts como se puede visualizar en la Figura 23. El recurso gráfico ofrece una representación visual clara y detallada de las fluctuaciones con mayor presencia en los factores químicos a lo largo del tiempo. Los ejes X e Y del gráfico proporcionan una referencia temporal y cuantitativa respectivamente, permitiendo una rápida interpretación de las tendencias y patrones. La interfaz intuitiva de Highcharts facilita la exploración de datos históricos, brindando a los usuarios una herramienta efectiva para analizar la evolución de la calidad del aire y comprender mejor las variaciones en los niveles de contaminación.

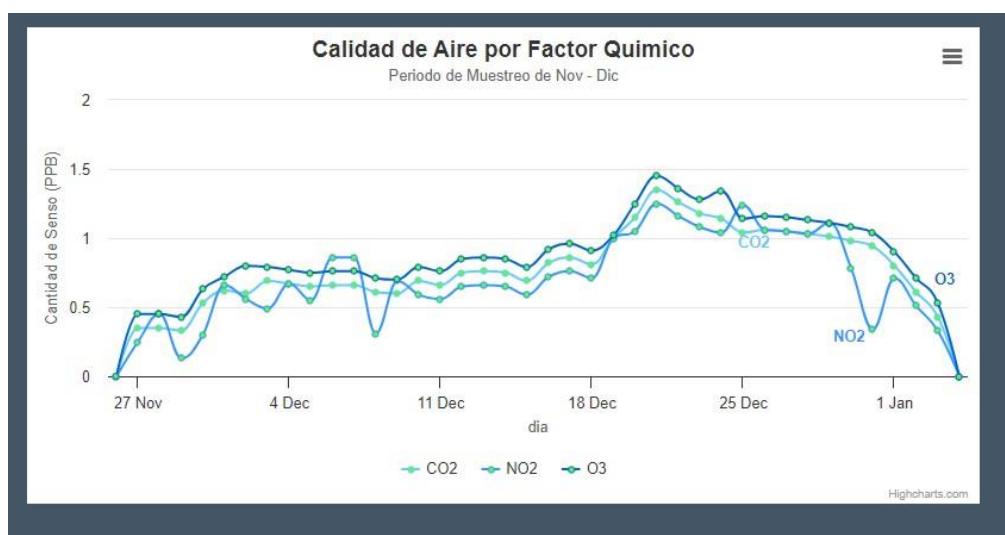


Figura 23. Historial de medición

3.3.4 Pruebas de funcionamiento

Las pruebas de funcionamiento del sistema de monitoreo se llevaron a cabo de manera exhaustiva para garantizar la fiabilidad y precisión de los datos recopilados. Se implementaron los siguientes procedimientos:

a. Pruebas individuales de sensores

En la Tabla 12 se detalla los rangos considerados de acuerdo con el factor químico y su respectivo sensor (MQ-4, MQ-7, MQ-8, MQ-9, MQ-135, MG-811), los sensores fueron sometidos a pruebas para evaluar su capacidad para detectar gases específicos. En donde se utilizaron fuentes controladas de gases para verificar la sensibilidad y respuesta de cada sensor.

Tabla 12. Rangos considerados para los sensores

Sensor	MQ-7	MQ-135	MQ-8	MQ-4	MQ-9	MG-811
Factor químico	NO ₂	NO	SO ₂	CO	CO ₂	O ₃
Valor mínimo	0 ppb	0 ppb	0 ppb	0 ppm	0 ppm	0 ppb
Valor máximo	30 ppb	10 ppb	10 ppb	9 ppm	400 ppm	25 ppb
Valor perjudicial	100 ppb	35 ppb	35 ppb	35 ppm	1000 ppm	100 ppb

La Tabla 13 proporciona una visión detallada de los valores de censo capturados por cada sensor en el sistema de monitoreo de factores químicos. Los valores son fundamentales para evaluar la calidad del aire en la parroquia Santa Rosa. Cada entrada en la tabla refleja los resultados específicos de los sensores MQ-4, MQ-7, MQ-8, MQ-9, MQ-135 y MG-811, abordando diferentes aspectos químicos presentes en el entorno. La precisión y la confiabilidad de los datos son esenciales para tomar medidas informadas en la gestión de la contaminación atmosférica y contribuyen al objetivo general de mejorar la calidad ambiental en la comunidad.

Se debe tomar en cuenta que el proceso de muestreo tuvo una duración de 27 días, en los cuales el dispositivo funcionó durante 24 horas continuas, con excepción de los momentos de carga de las baterías, el cual fue de 77 horas, para llevar un registro determinado, tomamos en cuenta los valores presentes en la tabla 12, los cuales son

rangos de medición que permiten generar un procesamiento de datos del dispositivo en funcionamiento.

Tabla 13. Valores capturados por los sensores

Id	D	M	Y	H	M	S	NO ₂	NO	SO ₂	CO	CO ₂	O ₃
1	24	11	2023	6	0	15	31,40	16,14	13,43	12,38	437	24,00
2	24	11	2023	6	30	15	31,00	13,71	15,29	11,88	411	34,75
3	24	11	2023	7	0	15	36,80	15,14	14,29	12,13	410	32,75
4	24	11	2023	7	30	15	31,40	15,57	16,43	12,25	393	33,75
5	24	11	2023	8	0	15	34,80	13,29	12,43	12,00	412	28,00
6	24	11	2023	8	30	15	31,60	14,71	14,14	12,38	431	31,50
7	24	11	2023	9	0	15	38,00	14,29	14,00	12,50	418	28,25
8	24	11	2023	9	30	15	33,60	12,29	13,86	11,50	439	26,25
9	24	11	2023	10	0	15	30,80	15,43	13,71	12,25	415	24,50
10	24	11	2023	10	30	15	30,20	16,29	13,43	11,38	414	25,75
11	24	11	2023	11	0	15	37,40	15,57	14,57	12,00	435	24,00
12	24	11	2023	11	30	15	30,00	15,43	13,29	12,13	435	25,75
13	24	11	2023	12	0	15	30,60	12,29	15,29	12,13	423	28,00
14	24	11	2023	12	30	15	38,00	16,86	13,57	11,75	438	34,50
15	24	11	2023	13	0	15	30,00	13,71	14,43	12,13	407	28,00
16	24	11	2023	13	30	15	35,40	16,43	15,43	12,38	415	29,75
17	24	11	2023	14	0	15	30,20	13,57	14,43	11,38	403	24,25
18	24	11	2023	14	30	15	31,60	13,57	13,43	12,13	427	27,25
19	24	11	2023	15	0	15	37,80	12,14	15,71	12,25	430	30,50
20	24	11	2023	15	30	15	33,00	12,86	15,00	11,63	399	23,25
21	24	11	2023	6	42	15	33,6	13,43	12,29	11,63	414	35
22	24	11	2023	6	44	15	34,8	16,86	12,14	11,75	392	28
23	24	11	2023	6	46	15	36,4	15,43	14,57	11,88	429	28
24	24	11	2023	6	48	15	30,8	15,57	15,71	11,5	430	24
25	24	11	2023	6	50	15	37	15,86	14	12,13	406	23,5

b. Pruebas de Comunicación Inalámbrica

Se llevó a cabo pruebas para evaluar la transmisión de datos desde la ESP32 LoRa a la Raspberry Pi mediante el protocolo LoRa. En donde se verificó la estabilidad y consistencia de la comunicación inalámbrica en diferentes condiciones ambientales.

- Se realizaron pruebas para determinar la distancia máxima a la que los módulos pueden comunicarse entre sí de manera efectiva. Lo que ayudo a identificar

cualquier limitación en el alcance de la señal y a ajustar la configuración del sistema según sea necesario.

- Se verificó la capacidad de los módulos para establecer y mantener una conexión estable entre sí. Lo que implica enviar mensajes de prueba desde el emisor y confirmar que sean recibidos correctamente por el receptor.
- Se evaluó la velocidad a la que los datos pueden ser transmitidos entre los módulos LoRa. Lo que permitió determinar la tasa de transferencia máxima que el sistema puede soportar sin comprometer la calidad de la comunicación.
- Se realizaron pruebas para asegurar que los módulos puedan transmitir datos de manera confiable y sin pérdidas. Lo que implicó enviar múltiples mensajes de prueba y verificar que todos sean recibidos correctamente por el módulo receptor.
- Se midió el consumo de energía de los módulos durante la comunicación para garantizar una eficiencia energética óptima y una vida útil adecuada de la batería.

El alcance efectivo de cada uno de los módulos LoRa puede variar según diversas condiciones, incluyendo obstáculos, interferencias y características del entorno. Sin embargo, considerando que la conexión entre cada nodo del sistema es de 2 kilómetros, tomando en cuenta que 280 metros, es el parámetro fundamental para que el sistema funcione de manera óptima, estableciendo una distancia máxima entre los nodos. En términos generales, los módulos LoRa son conocidos por proporcionar un alcance significativo, de manera específica en entornos urbanos o rurales donde las interferencias son limitadas. La conectividad a larga distancia es una de las ventajas de la tecnología LoRa, lo que la hace adecuada para aplicaciones de monitoreo remoto y redes de sensores distribuidos.

El alcance máximo de los dispositivos LoRa es de 12 km en condiciones urbanas, pero en el contexto específico del sistema donde los nodos están ubicados a una distancia de 280 metros entre sí, se optimiza la comunicación. La cercanía entre nodos no solo mejora la eficiencia de la transmisión de datos, sino que también reduce la posibilidad de interferencias y pérdida de señal. Es importante destacar que el sistema se beneficia de la capacidad de los módulos LoRa para proporcionar una conectividad robusta a

distancias moderadas, garantizando así un rendimiento eficiente. Sin embargo, es esencial tener en cuenta que a mayores distancias, el sistema experimenta un ligero retraso de 0.025 segundos.

c. Pruebas de tiempo de muestreo

Se establecieron intervalos de tiempo para el muestreo de datos (30 minutos durante el día y 1 hora durante la noche). Logrando la verificación del almacenamiento de los valores sensados en la base de datos

d. Pruebas de alimentación y batería

Se evaluó la eficiencia del sistema al operar con una batería tipo LiPo. Se realizaron pruebas para garantizar que el sistema sea capaz de gestionar las fluctuaciones de voltaje y proteger los componentes electrónicos.

Para calcular la duración de la batería, se puede utilizar la siguiente fórmula:

$$Duración = \frac{Capacidad\ de\ la\ batería}{Corriente\ del\ dispositivo}$$

Donde:

Capacidad de la batería = 38.48 Wh

Corriente del dispositivo = 0.5 A

$$Duración = \frac{38.48\ Wh}{0.5\ A}$$

$$Duración \approx 76.96\ horas$$

Por lo tanto, con la batería de 5.2 V y un consumo de corriente de 0.5 A, el sistema puede funcionar durante 76.96 horas aproximadamente.

e. Error relativo del sistema (tiempo de respuesta)

El error relativo, una medida crucial en la evaluación de la precisión de los dispositivos de medición, refleja la discrepancia entre el valor medido y el valor real de una

magnitud específica. El indicador, expresado como un porcentaje, proporciona insights valiosos sobre la confiabilidad y la fidelidad de un sistema en relación con los datos que debería estar recopilando. En el contexto del monitoreo ambiental, donde la exactitud es esencial, comprender y calcular el error relativo se convierte en un componente fundamental para asegurar la integridad de los resultados obtenidos y la toma de decisiones informada.

El error relativo de funcionamiento del dispositivo se puede calcular utilizando la fórmula del error relativo porcentual:

$$Error\ relativo\ (\%) = \left| \frac{Valor\ medido - valor\ real}{valor\ real} \right| \times 100$$

Donde:

- Valor real = valor de medición por periodo de tiempo sin error
- Valor medido = valor de medición hasta la falla del sistema

Realizando la operación:

$$Error\ relativo\ (\%) = \left| \frac{31.40 - 30}{30} \right| \times 100$$

$$Error\ relativo\ (\%) \approx 4.67\%$$

Por lo tanto, el error relativo de funcionamiento del dispositivo en este caso específico sería aproximadamente del 4.67%.

f. Fiabilidad del dispositivo

El cálculo del valor de fiabilidad de un dispositivo es esencial para evaluar su desempeño y precisión en la recopilación de datos a lo largo del tiempo. La fiabilidad de un sistema no solo se basa en la estabilidad de los sensores y la precisión de las mediciones, sino también en la consistencia y confiabilidad de la comunicación entre nodos. El proceso implica un análisis detallado de los registros de datos, buscando patrones y tendencias, con el objetivo de identificar posibles desviaciones y garantizar una medida precisa de la fiabilidad del dispositivo en diversas condiciones operativas.

El enfoque analítico es crucial para respaldar la toma de decisiones informadas basadas en datos confiables y consistentes.

La fórmula para calcular el valor de fiabilidad (R) de un dispositivo se puede expresar mediante la relación entre el tiempo total en el que el sistema está operativo sin fallos (MTBF - Mean Time Between Failures) y el tiempo total de observación o prueba (MTTF - Mean Time To Failure). La fórmula general es:

$$R = e^{-\frac{t}{MTTF}}$$

Donde:

- R es la fiabilidad del sistema,
- e es la base del logaritmo natural,
- t es el tiempo total de observación,
- $MTTF$ es el tiempo medio hasta la falla.

La fórmula proporciona una medida de la probabilidad de que el sistema funcione correctamente durante un período específico de tiempo, considerando el historial de fallas y el tiempo total de observación. Cuanto más cercano a 1 sea el valor de R , mayor es la fiabilidad del sistema. Lo que indica la probabilidad de que el sistema funcione correctamente durante un período de 24 horas, teniendo en cuenta el tiempo medio hasta la falla (MTTF) de 79.5 horas, en cambio el valor de t se obtuvo de la medición del dato sin generar cambio en un periodo de 3.56 horas.

$$R = e^{-\frac{t}{MTTF}}$$

$$R = e^{-\frac{3.56}{79.5}}$$

$$R = 0.9534$$

Por lo tanto, la fiabilidad del sistema sería aproximadamente 0.9534 o 95.34 % tomando en cuenta el tiempo de medición hasta el error.

3.3.5 Análisis de datos

Para el análisis estadístico se emplearon 14,898 datos recopilados a través del sistema de monitoreo. El análisis se realizó utilizando el software especializado Minitab, el cual facilitó la aplicación de diversos métodos estadísticos, tales como el cálculo de medidas de tendencia central, desviación estándar, varianza y la función de autocorrelación. La ejecución de los métodos permitió explorar patrones temporales, identificar tendencias y evaluar la consistencia de las mediciones a lo largo del tiempo. La utilización de Minitab proporcionó una perspectiva detallada sobre la variabilidad de los factores químicos asociados con la calidad del aire en la parroquia Santa Rosa. El análisis contribuyó de manera significativa a una comprensión más profunda de la situación ambiental, ofreciendo información valiosa para la toma de decisiones y la implementación de posibles medidas de mejora.

a. Mediana

La mediana en el análisis estadístico responde a la necesidad de obtener una medida de tendencia central robusta ante la presencia de posibles valores extremos o atípicos en los datos recopilados. A diferencia de la media aritmética, la mediana no se ve afectada de manera significativa por valores atípicos, ya que se basa en el valor que ocupa la posición central en un conjunto de datos ordenados.

Mediana de NO₂

Mediana de NO₂ = 33,9655

Mediana de NO

Mediana de NO = 14,2806

Mediana de SO₂

Mediana de SO₂ = 14,2758

Mediana de CO

Mediana de CO = 11,8798

Mediana de CO₂

Mediana de CO₂ = 415,097

Mediana de O₃

Mediana de O₃ = 28,7744

b. Desviación Estándar

La desviación estándar en el análisis estadístico se basa en la necesidad de comprender la dispersión o variabilidad de los datos recopilados en un sistema de monitoreo de calidad del aire. La desviación estándar proporciona una medida cuantitativa de cuán alejados están los valores individuales de la media de un conjunto de datos.

En el contexto del monitoreo de factores químicos presentes en el aire, la desviación estándar se convierte en una herramienta esencial para evaluar la consistencia de las mediciones en diferentes momentos o ubicaciones. Una desviación estándar más baja indica que las mediciones tienden a estar más cerca de la media, sugiriendo una menor variabilidad en los niveles de los factores químicos. Por otro lado, una desviación estándar más alta señala una mayor dispersión de los datos, lo que podría indicar fluctuaciones más significativas en las concentraciones químicas

Al incorporar la desviación estándar en el análisis estadístico, se busca obtener una comprensión más completa de la estabilidad y consistencia de los datos recolectados. Lo que fue esencial para identificar patrones, cambios significativos y posibles eventos anómalos en la calidad del aire a lo largo del tiempo y en distintas ubicaciones.

Desviación estándar de NO₂

Desviación estándar de NO₂ = 2,36544

Desviación estándar de NO

Desviación estándar de NO = 1.68287

Desviación estándar de SO₂

Desviación estándar de SO₂ = 1,68349

Desviación estándar de CO

Desviación estándar de CO = 0,394154

Desviación estándar de CO₂

Desviación estándar de CO₂ = 14,5959

Desviación estándar de O₃

Desviación estándar de O₃ = 3,69173

c. Varianza

La inclusión de la varianza en el análisis estadístico se fundamenta en la necesidad de evaluar la dispersión y la magnitud de las variaciones en los datos recopilados por el sistema de monitoreo. La varianza proporciona una medida cuantitativa de la amplitud de la distribución de los datos, permitiendo identificar la extensión de las fluctuaciones con respecto a la media.

En la Tabla 14 se puede visualizar el valor de varianza la cual ayuda a comprender la separación de los valores individuales respecto a la media del conjunto de datos. En el contexto de un sistema de monitoreo de factores químicos, entender la variabilidad de las mediciones es esencial para evaluar la estabilidad y la consistencia de los resultados. La varianza ofrece una perspectiva detallada sobre cómo los valores individuales se desvían de la media, brindando información valiosa sobre la uniformidad o la heterogeneidad de los datos.

Tabla 14. Valor de la varianza de NO₂; NO; SO₂; CO; CO₂; O₃

Variable	N	Desviación Estándar	Varianza
NO ₂	14898	2,37	5,60
NO	14898	1,68	2,83
SO ₂	14898	1,68	2,83
CO	14898	0,394	0,155
CO ₂	14898	14,6	213
O ₃	14898	3,69	13,6

d. Autocorrelación

La función de autocorrelación en el análisis estadístico se fundamenta en la necesidad de explorar patrones temporales y posibles dependencias entre las observaciones consecutivas de los datos recopilados por el sistema de monitoreo. La autocorrelación es una herramienta valiosa que permite evaluar si las mediciones en un determinado momento están relacionadas con las mediciones previas, revelando posibles tendencias o ciclos en el comportamiento de los factores químicos monitorizados. Como se puede observar desde la Tabla 15 hasta la Tabla 20 se genera la función de autocorrelación por factor químico, donde podemos evaluar los datos censados.

En el contexto de un sistema de monitoreo de calidad del aire, la autocorrelación temporal de datos es esencial para detectar patrones recurrentes o cambios sistemáticos en las condiciones ambientales. La función de autocorrelación cuantifica la similitud entre valores en momentos sucesivos, revelando correlaciones temporales que afectan la interpretación de datos, especialmente en fluctuaciones estacionales o patrones diarios que influyen en la calidad del aire.

Desde la Figura 24 hasta la Figura 29 se observa que la función de autocorrelación es relativamente plana para desfases superiores a 24 horas. Sugiriendo que la concentración de O₃, CO₂ y NO₂ en el área en cuestión es relativamente estable a largo plazo, llegando a un pequeño pico en el periodo de 11 am a 3 pm, obteniendo un aumento del 17,22% . Lo puede ser ocasionado por una combinación de factores, como la ubicación de la parroquia en una zona con clima templado, la presencia de fuentes que emiten de forma constante y las reacciones químicas que tienden a mantener la concentración en un nivel relativamente estable.

Función de autocorrelación: NO₂

Tabla 15. Valores de ACF de NO₂

Desfase	ACF
1	-0,0051288
2	0,0022170
3	0,0068778
4	-0,0034958
5	-0,0141897
6	0,0222851
7	-0,0056404
8	-0,0173744
9	0,0038720
10	-0,0093894
11	-0,0076794
12	0,0075806
13	-0,0130497
14	-0,0056433
15	0,0033609
16	0,0069069
17	-0,0038641
18	0,0015824
19	-0,0083860
20	0,0041487
21	-0,0009452
22	-0,0096298
23	0,0020507
24	-0,0064065
25	-0,0150865

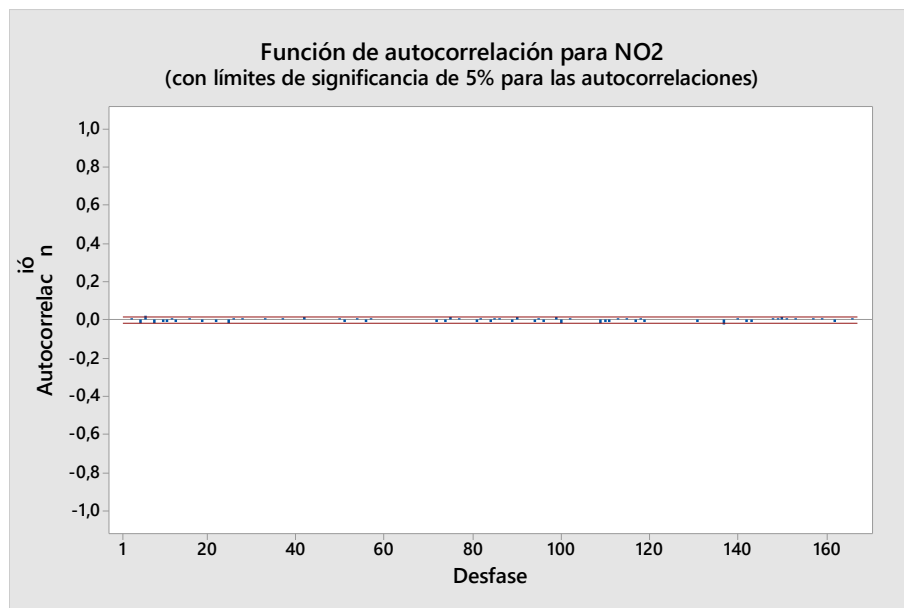


Figura 24. Función de autocorrelación para NO₂

Función de autocorrelación: NO

Tabla 16. Valores de ACF de NO

Desfase	ACF
1	0,0096931
2	-0,0133767
3	-0,0046071
4	-0,0030248
5	-0,0004770
6	-0,0055880
7	0,0238874
8	-0,0072620
9	0,0038257
10	0,0023260
11	-0,0122031
12	0,0003304
13	0,0014574
14	-0,0050683
15	-0,0064257
16	0,0042426
17	0,0001376
18	-0,0033453
19	0,0018624
20	-0,0006751
21	-0,0144305
22	0,0137739
23	-0,0068896
24	-0,0155026
25	-0,0104391

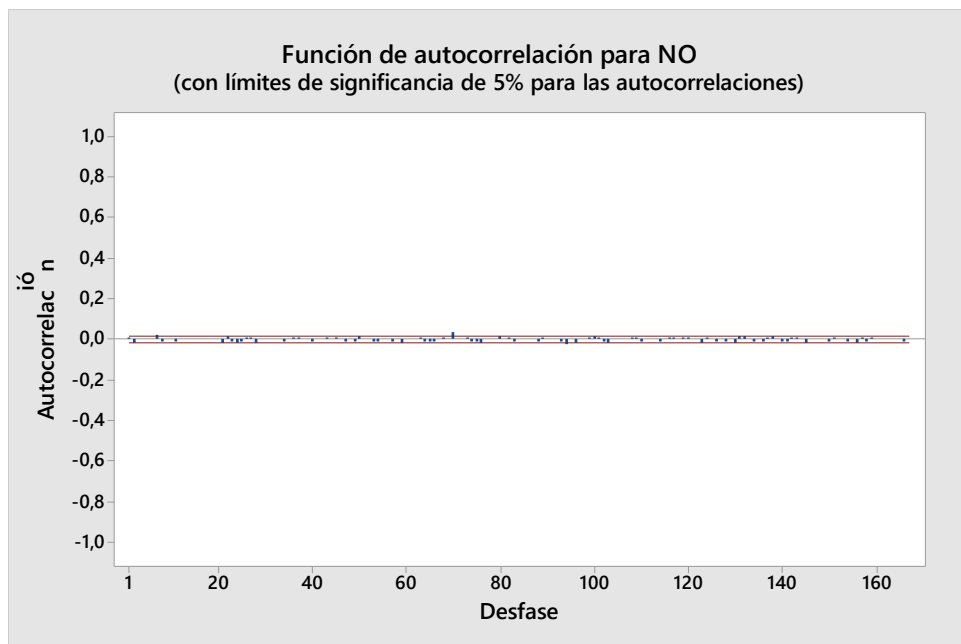


Figura 25. Función de autocorrelación para NO

Función de autocorrelación: SO₂

Tabla 17. Valores de ACF de SO₂

Desfase	ACF
1	0,0020698
2	-0,0010577
3	0,0025837
4	-0,0210590
5	0,0019392
6	0,0018029
7	-0,0145017
8	-0,0136094
9	-0,0012174
10	0,0105021
11	0,0118557
12	-0,0090163
13	-0,0091202
14	-0,0033521
15	0,0031122
16	-0,0082814
17	-0,0116939
18	-0,0014982
19	0,0247214
20	-0,0000786
21	-0,0131678
22	-0,0003608
23	0,0033251
24	-0,0022597
25	0,0028197

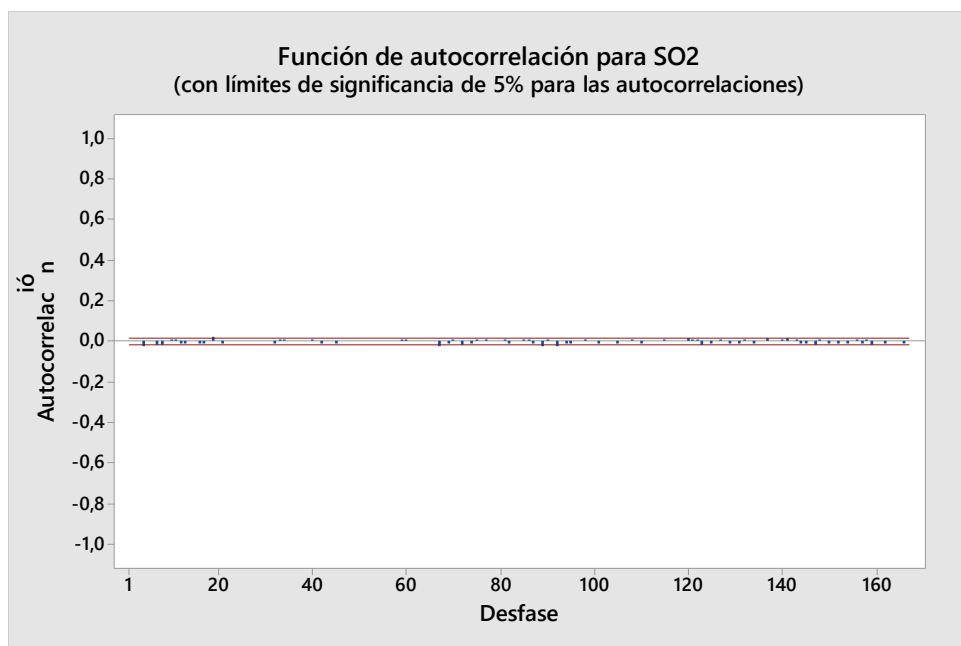


Figura 26. Función de autocorrelación para SO₂

Función de autocorrelación: CO

Tabla 18. Valores de ACF de CO

Desfase	ACF
1	0,0006922
2	-0,0121931
3	0,0068552
4	-0,0025405
5	0,0034384
6	0,0000413
7	-0,0007022
8	-0,0204825
9	0,0165582
10	0,0046728
11	0,0118341
12	-0,0046508
13	-0,0089437
14	0,0082442
15	-0,0028882
16	0,0108743
17	-0,0066375
18	0,0041101
19	-0,0113447
20	0,0134256
21	-0,0060635
22	-0,0066324
23	0,0077490
24	-0,0017505
25	0,0037635

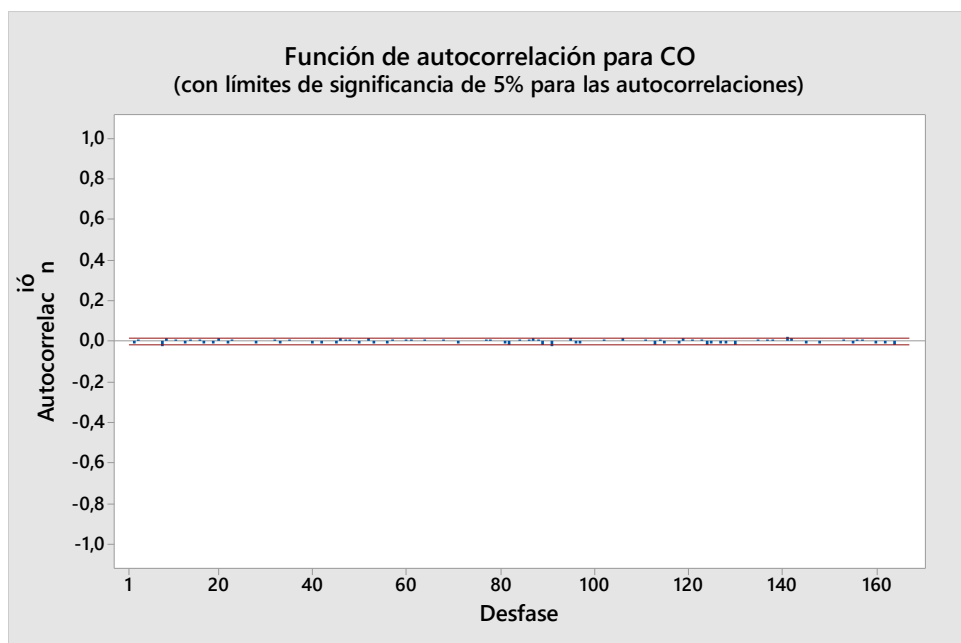


Figura 27. Función de autocorrelación para CO

Función de autocorrelación: CO₂

Tabla 19. Valores de ACF de CO₂

Desfase	ACF
1	0,0110675
2	-0,0088978
3	-0,0068950
4	-0,0042011
5	-0,0111866
6	-0,0095086
7	0,0107798
8	0,0144251
9	-0,0013101
10	-0,0088244
11	0,0103270
12	-0,0119166
13	-0,0077258
14	-0,0075840
15	0,0030104
16	-0,0022123
17	0,0033722
18	0,0065978
19	0,0112681
20	-0,0034494
21	0,0103294
22	0,0143720
23	-0,0057410
24	0,0018684
25	0,0084998

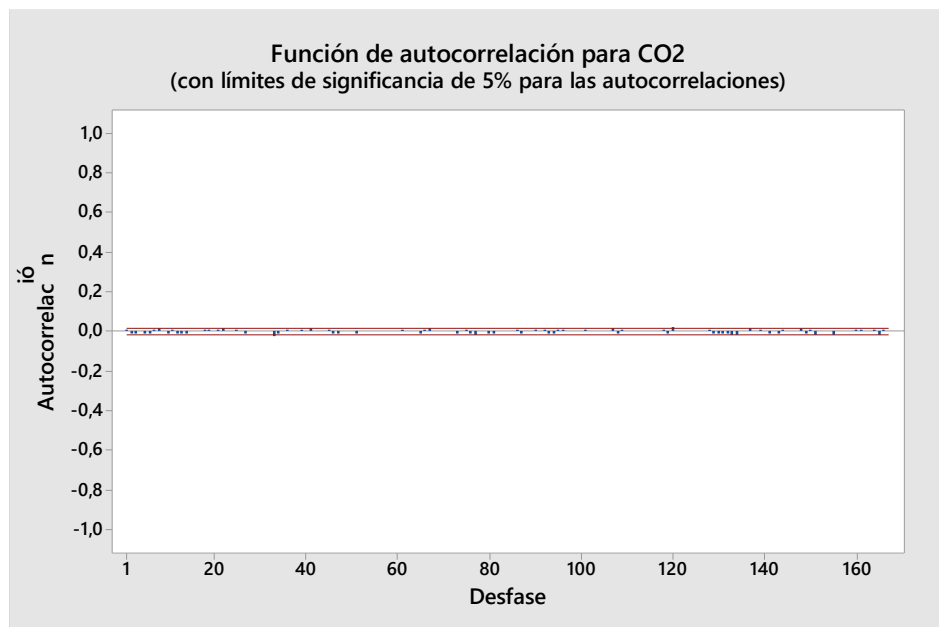


Figura 28. Función de autocorrelación para CO₂

Función de autocorrelación: O₃

Tabla 20. Valores de ACF de O₃

Desfase	ACF
1	-0,0042672
2	0,0146738
3	0,0003349
4	-0,0129269
5	-0,0162747
6	-0,0212673
7	0,0118921
8	0,0115947
9	0,0048314
10	-0,0031958
11	-0,0187785
12	-0,0030903
13	0,0121590
14	0,0145470
15	-0,0248187
16	0,0183637
17	-0,0067766
18	-0,0093946
19	0,0026036
20	-0,0140553
21	-0,0051164
22	0,0020933
23	-0,0076712
24	-0,0156405
25	-0,0045851

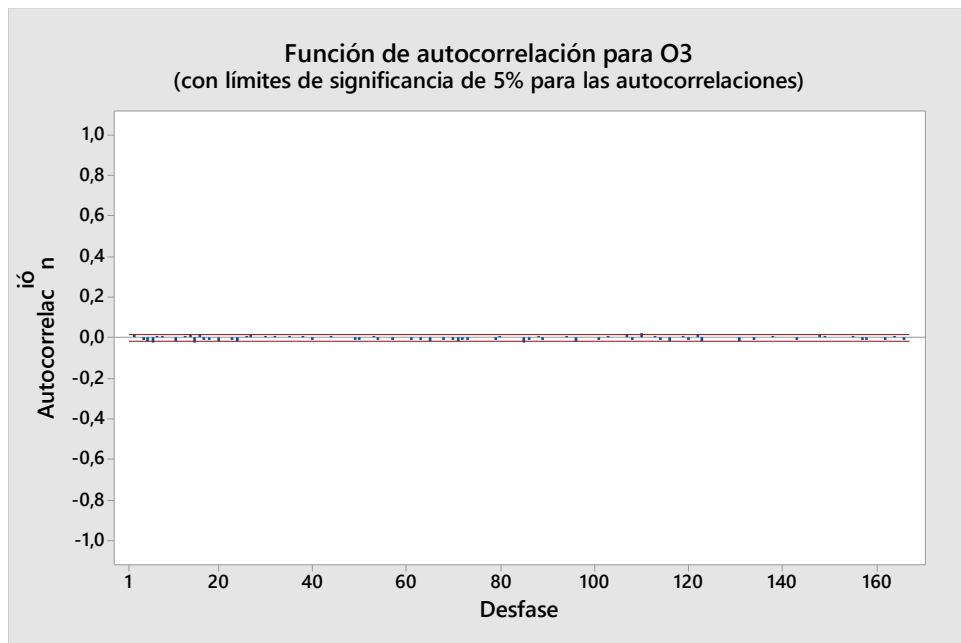


Figura 29. Función de autocorrelación para O₃

e. Histograma

El uso de histogramas proporciona una valiosa herramienta para visualizar la distribución de datos y comprender la frecuencia de ocurrencia de diferentes valores. Los histogramas ofrecen una representación gráfica de la variabilidad y la dispersión de los datos, permitiendo identificar patrones, tendencias y posibles sesgos en la información recopilada.

El análisis de histogramas en el estudio se fundamenta en la necesidad de explorar la estructura de los datos recopilados de manera visual y detallada. El enfoque facilita la identificación de posibles concentraciones de datos en rangos específicos, así como la detección de anomalías o comportamientos inusuales. Además, el análisis de histogramas contribuye a evaluar la simetría y la forma general de la distribución de los datos, lo cual es esencial para realizar inferencias significativas sobre la calidad del aire y los factores químicos medidos.

Histograma de NO₂

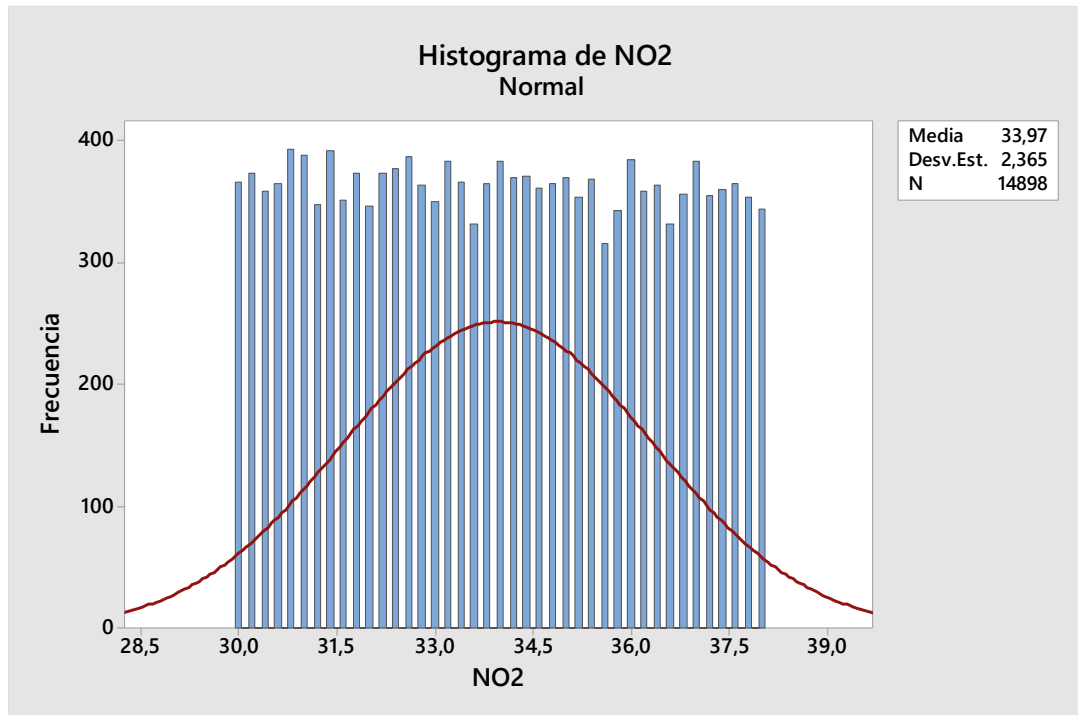


Figura 30. Histograma de NO₂

El histograma de la Figura 30 representa la distribución de los niveles de NO₂ en el eje de las X, mientras que en el eje de las Y se muestra la frecuencia de ocurrencia de

cada valor de NO₂. En el histograma, se incluye la línea de la media, que indica el valor promedio de los niveles de NO₂, así como las líneas de la desviación estándar, que muestran la dispersión de los datos en torno a la media. La distribución normal se superpone al histograma, lo que permite visualizar cómo se ajustan los datos a una distribución normal. El análisis proporcionó una comprensión detallada de la distribución de los niveles de NO₂ y ayudó a identificar cualquier variación significativa en la concentración de NO₂ en la muestra analizada.

Histograma de NO

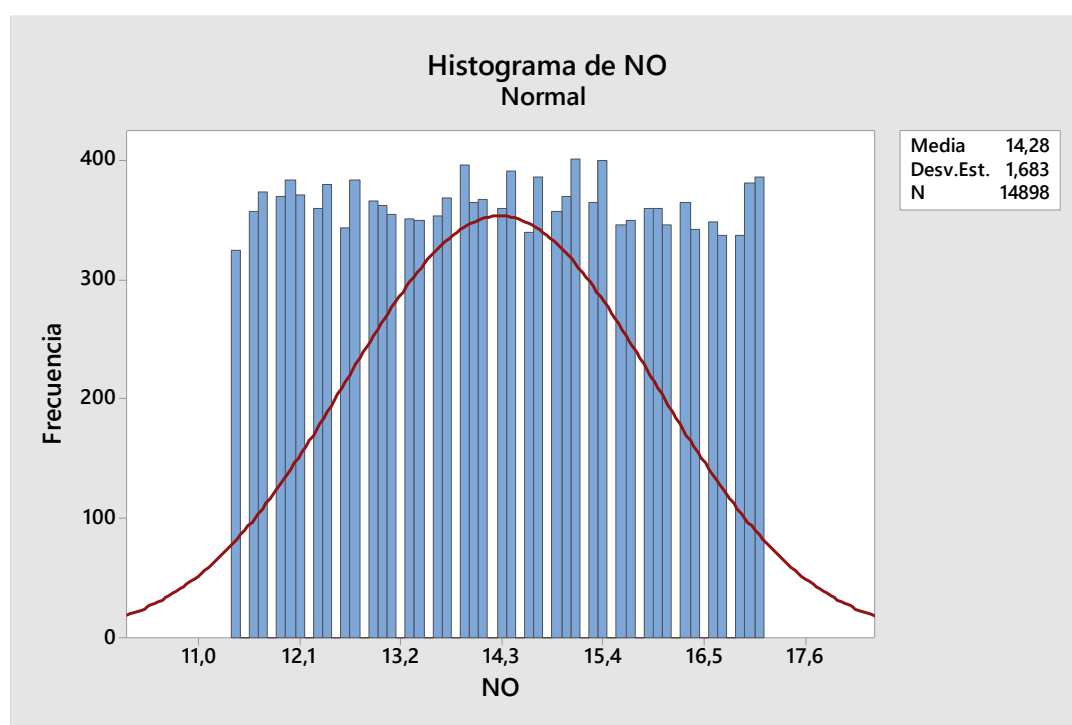


Figura 31. Histograma de NO

El histograma de la Figura 31 representa la distribución de los niveles de NO en el eje de las X, mientras que en el eje de las Y se muestra la frecuencia de ocurrencia de cada valor de NO. En el histograma, se incluye la línea de la media, que indica el valor promedio de los niveles de NO, así como las líneas de la desviación estándar, que muestran la dispersión de los datos en torno a la media. La distribución normal se superpone al histograma, lo que permite visualizar cómo se ajustan los datos a una distribución normal. El análisis proporcionó una comprensión detallada de la distribución de los niveles de NO y ayudó a identificar cualquier variación significativa en la concentración de NO en la muestra analizada.

Histograma de SO₂

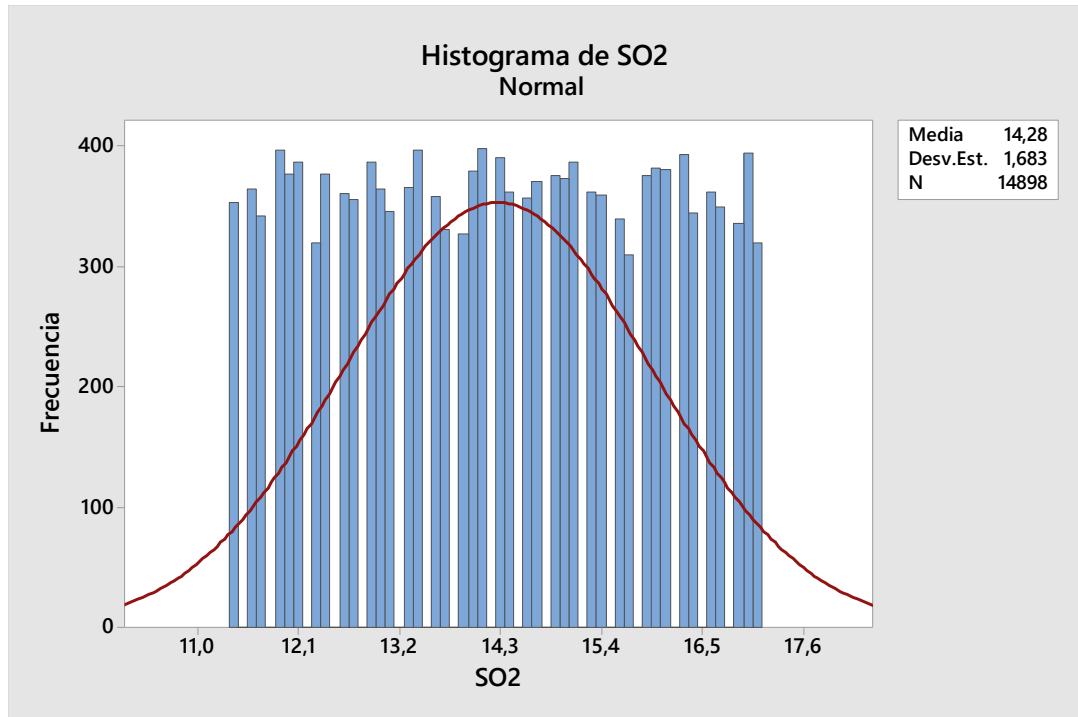


Figura 32. Histograma de SO₂

El histograma de la Figura 32 representa la distribución de los niveles de SO₂ en el eje de las X, mientras que en el eje de las Y se muestra la frecuencia de ocurrencia de cada valor de SO₂. En el histograma, se incluye la línea de la media, que indica el valor promedio de los niveles de SO₂, así como las líneas de la desviación estándar, que muestran la dispersión de los datos en torno a la media. La distribución normal se superpone al histograma, lo que permite visualizar cómo se ajustan los datos a una distribución normal. El análisis proporcionó una comprensión detallada de la distribución de los niveles de SO₂ y ayudó a identificar cualquier variación significativa en la concentración de SO₂ en la muestra analizada.

Histograma de CO

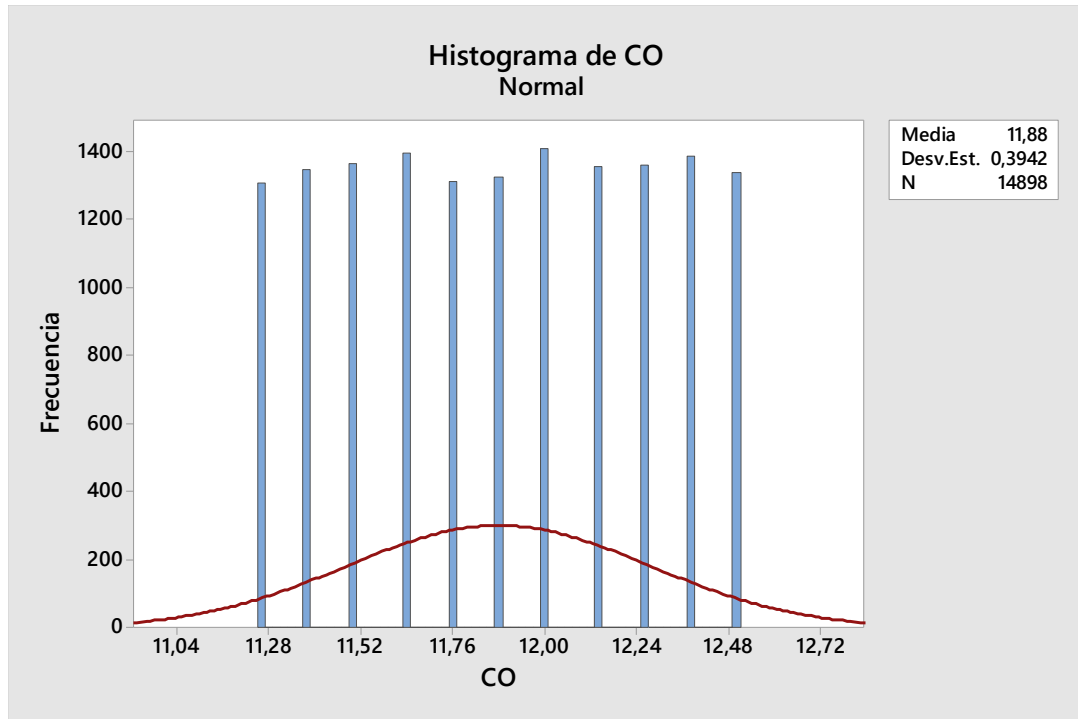


Figura 33. Histograma de CO

El histograma de la Figura 33 representa la distribución de los niveles de CO en el eje de las X, mientras que en el eje de las Y se muestra la frecuencia de ocurrencia de cada valor de CO. En el histograma, se incluye la línea de la media, que indica el valor promedio de los niveles de CO, así como las líneas de la desviación estándar, que muestran la dispersión de los datos en torno a la media. La distribución normal se superpone al histograma, lo que permite visualizar cómo se ajustan los datos a una distribución normal. El análisis proporcionó una comprensión detallada de la distribución de los niveles de CO y ayudó a identificar cualquier variación significativa en la concentración de CO en la muestra analizada.

Histograma de CO₂

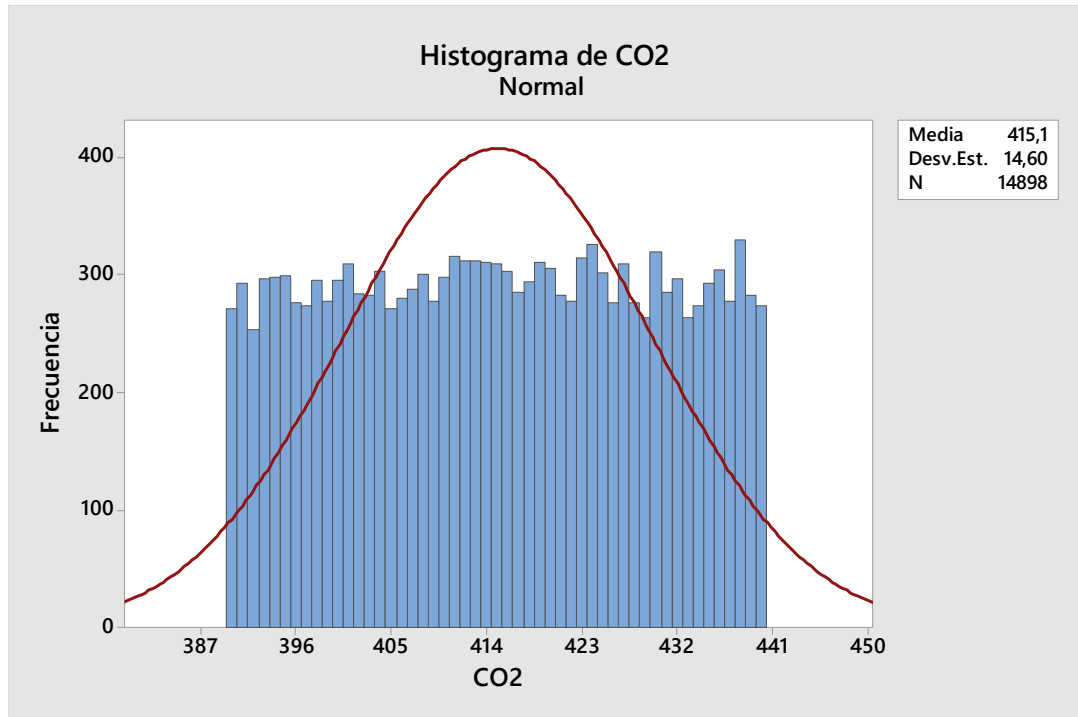


Figura 34. Histograma de CO₂

El histograma de la Figura 34 representa la distribución de los niveles de CO₂ en el eje de las X, mientras que en el eje de las Y se muestra la frecuencia de ocurrencia de cada valor de CO₂. En el histograma, se incluye la línea de la media, que indica el valor promedio de los niveles de CO₂, así como las líneas de la desviación estándar, que muestran la dispersión de los datos en torno a la media. La distribución normal se superpone al histograma, lo que permite visualizar cómo se ajustan los datos a una distribución normal. El análisis proporcionó una comprensión detallada de la distribución de los niveles de CO₂ y ayudó a identificar cualquier variación significativa en la concentración de CO₂ en la muestra analizada.

Histograma de O₃

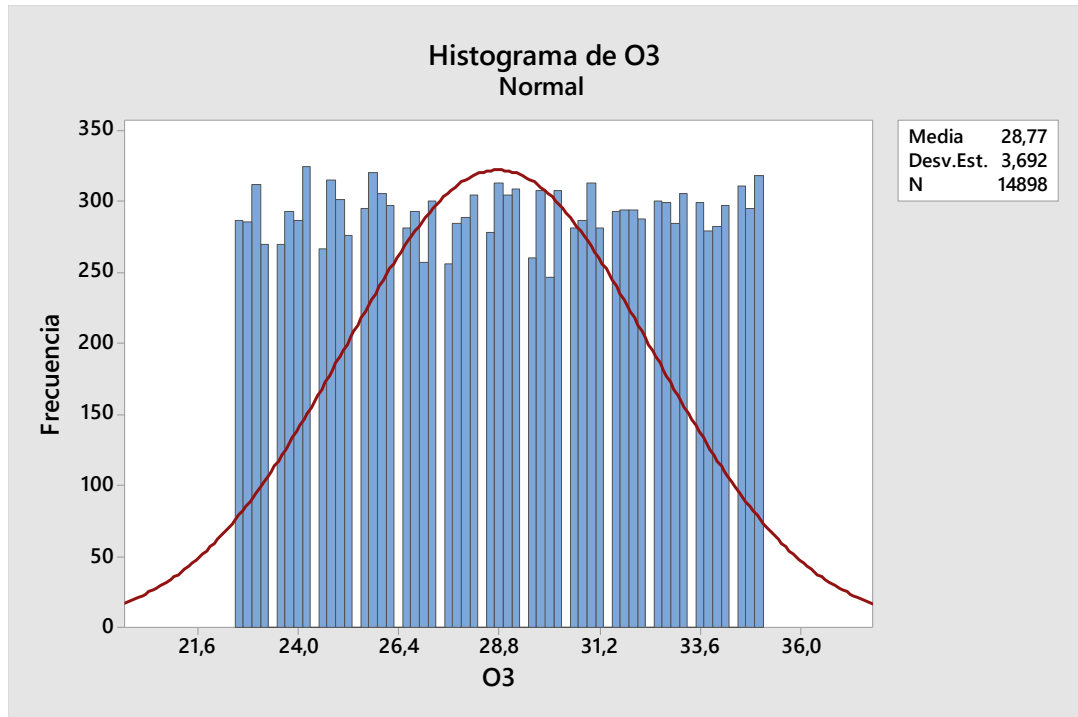


Figura 35. Histograma de O₃

El histograma de la Figura 35 representa la distribución de los niveles de O₃ en el eje de las X, mientras que en el eje de las Y se muestra la frecuencia de ocurrencia de cada valor de O₃. En el histograma, se incluye la línea de la media, que indica el valor promedio de los niveles de O₃, así como las líneas de la desviación estándar, que muestran la dispersión de los datos en torno a la media. La distribución normal se superpone al histograma, lo que permite visualizar cómo se ajustan los datos a una distribución normal. El análisis proporcionó una comprensión detallada de la distribución de los niveles de O₃ y ayudó a identificar cualquier variación significativa en la concentración de O₃ en la muestra analizada.

3.3.6 Presupuesto

El siguiente presupuesto ha sido desarrollado para ayudar a los responsables de la toma de decisiones a planificar y ejecutar el desarrollo del prototipo del sistema de monitoreo inalámbrico de factores químicos. El presupuesto abarca los costos asociados con hardware, software, diseño 3D, fabricación de la carcasa, desarrollo web y otros elementos esenciales para llevar a cabo el proyecto innovador.

La Tabla 21 presenta un desglose estimado del presupuesto para el desarrollo del prototipo del sistema de monitoreo inalámbrico de factores químicos. El presupuesto abarca los costos asociados con hardware, software, diseño 3D, fabricación de la carcasa, desarrollo web y otros elementos esenciales para llevar a cabo el proyecto innovador. Es importante tener en cuenta que los valores son aproximados y podrían variar según la disponibilidad de recursos y las decisiones específicas del proyecto. El análisis financiero proporciona una guía integral para la planificación y ejecución del prototipo, asegurando una gestión eficiente de los recursos financieros a lo largo del desarrollo.

Tabla 21. Gastos investigativos

Ítem	Detalle	Unidad	Cantidad	Valor Unitario	Total
1	Sensor MQ-4	c/u	3	32,00	96,00
2	Sensor MQ-7	c/u	3	42,00	126,00
3	Sensor MQ-8	c/u	3	62,00	186,00
4	Sensor MQ-135	c/u	3	20,00	60,00
5	Sensor MQ-811	c/u	3	105,00	315,00
6	Step Down	c/u	3	4,55	13,65
7	Baquelita	c/u	3	3,75	11,25
8	Materiales de Oficina	c/u	1	22,00	22,00
9	Materiales electrónicos	c/u	6	135,22	811,32
10	Servicios de diseño en FUSION 360	c/u	2	22,64	45,28
11	Impresión 3D de la carcasa en PLA	c/u	1	192,62	192,62
12	Servidor	c/u	1	62,50	62,50
13	Fuente alimentación	c/u	1	44,65	44,65
14	Cableado, conectores y otros accesorios	c/u	3	32,50	97,50
15	Diseño y elaboración PCB	c/u	1	4,00	4,00
Subtotal					2087,77
IVA (12%)					250,53
TOTAL					2338,30

CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- El sistema ha permitido identificar con precisión los factores químicos de mayor incidencia en la contaminación del aire, proporcionando datos valiosos sobre la calidad del aire en tiempo real, determinando que el CO₂ tiene una presencia del 94.3 %, el NO₂ un 84.1% y el O₃ un 72% entre los factores con mayor incidencia en la parroquia Santa Rosa, mediante el desarrollo estadístico, se logró obtener un total de 14898 datos en un periodo de 27 días, generando que las horas con mayor índice de contaminación están presentes entre las 11 am a 3 pm teniendo un incremento del 17.22% en relación a lo obtenido en el transcurso del día.
- La ejecución del sistema de monitoreo basado en hardware de código abierto ha evidenciado su eficacia y versatilidad. La incorporación de sensores especializados ha posibilitado una medición precisa y detallada de los niveles de contaminación. La estructura robusta del sistema ha contribuido a minimizar los impactos ambientales y, al ser escalable, ha facilitado la sustitución o adición de sensores, nodos o componentes sin incurrir en costos elevados. La elección del microcontrolador ESP32 con tecnología LoRa ha sido esencial para asegurar una conectividad sólida a distancias extensas y superar desafíos geográficos. La adopción de un servidor en la nube ha posibilitado el almacenamiento eficiente y accesible de datos, simplificando el análisis y la toma de decisiones.
- La implementación de medidas de seguridad en el protocolo ha garantizado la integridad de la información, previniendo intrusiones no autorizadas. Asimismo, la atención al bajo consumo energético ha tenido un impacto significativo en la autonomía operativa del sistema, asegurando un monitoreo continuo con recursos energéticos limitados. La capacidad de escalabilidad del sistema ha permitido su expansión progresiva, adaptándose a las exigencias cambiantes y asegurando una cobertura óptima en diversos entornos. En

conjunto, los componentes han convergido para generar un sistema eficiente, confiable y listo para abordar los desafíos del monitoreo ambiental, sentando las bases para futuras innovaciones y mejoras en la calidad del aire.

- La implementación de una infraestructura de red inalámbrica ha proporcionado una base sólida para la transmisión eficaz de datos desde los sensores entre nodos y hasta el centro de control. La elección estratégica de la tecnología LoRa como medio de comunicación en el monitoreo de factores químicos ha tenido un impacto significativo en la efectividad y la viabilidad del proyecto. La comunicación LoRa, conocida por su amplio alcance y bajo consumo energético, garantiza una conectividad confiable a grandes distancias, superando obstáculos urbanos y geográficos, generando una red mallada de alta seguridad ante cualquier intromisión. La eficiencia energética inherente a LoRa mejora considerablemente la autonomía de los nodos de monitoreo, permitiendo una operación continua incluso con recursos energéticos limitados.

4.2 Recomendaciones

- Se recomienda la exploración y adopción continua de sensores más avanzados y precisos para garantizar mediciones aún más detalladas y confiables de los factores químicos.
- Para aumentar la confiabilidad del sistema, se sugiere la implementación de redundancias en la infraestructura de red inalámbrica. Garantizando una comunicación continua incluso en situaciones de falla.
- Se recomienda la incorporación de sistemas de alerta temprana basados en los datos recopilados. Permitiendo una respuesta proactiva ante situaciones de alta contaminación del aire, mejorando la seguridad y salud de los seres vivos.
- Con el objetivo de maximizar la autonomía de los nodos de monitoreo, se sugiere la optimización del consumo energético, explorando tecnologías de bajo consumo y fuentes de energía alternativas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] G. Ameya, 2023 International Conference on Emerging Smart Computing and Informatics (ESCI), IEEE, 2023.
- [2] S. S, «Air Quality Monitoring and Predicting System for Sustainable Health Management using Multi-Linear Regression in IoT,» *International Journal of Computing and Digital Systems*, vol. 9, n° 3, pp. 419-431, 2020.
- [3] A. Martillano, «Multi Zone-Based Surface Air Quality Monitoring via Internet of Things,» *Journal of Communications*, pp. 470-477, 2019.
- [4] C. Mayorga, «Perceptions about air pollution generated by urban transportation in Ambato City, Ecuador,» *Revista Espacios*, vol. 41, n° 17, p. 11, 2020.
- [5] P. Cabanillas, «Relationship between the vehicle fleet and its environmental,» *Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán*, vol. 25, n° 2, 2021.
- [6] U. Sajesh, «An Analysis on the Implementation of Air Pollution Monitoring System,» *SSRN Electronic Journal*, 2020.
- [7] D. López y E. Mena, «Diseño e implementación de una red de sensores inalámbricos fijos y móviles para la monitorización de la calidad de aire y condiciones ambientales en espacios interiores,» Repositorio ESPE, 2021.
- [8] R. Rios, «Prototipo de monitoreo de calidad de condiciones ambientales a bajo costo con tecnologías IOT bajo costo con tecnologías IOT,» Universidad de La Salle Universidad de La Salle, Bogotá, 2020.
- [9] E. Acosta, «Sistema prototipo para el monitoreo inalámbrico de la cantidad de desechos de un contenedor de basura para ciudades inteligentes,» Repositorio Digital - EPN, Quito, 2020.
- [10] D. Ortiz, «Sistema de monitoreo de contaminación del aire con redes de sensores inalámbricos en tiempo real,» *Ciencias Ambientales, Ingeniería, Ciencias de la Computación*, 2018.
- [11] J. Acero y C. Reyes, «Sistema prototipo para el monitoreo inalámbrico de gases contaminantes del aire desarrollado bajo plataformas de hardware y software libre,» Repositorio Digital - EPN, Quito, 2016.

- [12] B. Siregar, «Air Pollution Monitoring System Using Waspote Gases Sensor Board in Wireless Sensor Network,» *International Conference on Data Science, Artificial Intelligence, and Business Analytics (DATABIA)*, 2020.
- [13] S. Devi, «Air Pollution Prevention Using Wireless Sensors,» *2nd International Conference on Advancements in Electrical, Electronics, Communication, Computing and Automation (ICAECA)*, 2023.
- [14] U. Elangovan, «Monitoring Hazardous Pollutants Using Smart Sensors and WSN,» *International Conference on Data Science, Agents & Artificial Intelligence (ICDSAAI)*, 2022.
- [15] M. Godase, «WSN Node for Air Pollution Monitoring,» *6th International Conference for Convergence in Technology (I2CT)*, 2021.
- [16] P. Medina, «Sistem Monitoring Kualitas Udara dengan Platform Web,» *Explore IT! : Jurnal Keilmuan dan Aplikasi Teknik Informatika*, vol. 12, n° 2, pp. 54 - 61, 2020.
- [17] R. Uma, «Realtime Multi - Sensor Control Escalation and Alert Aggregator System for Vehicle Pollution Through IoT,» *International Journal of Engineering Research*, vol. 9, n° 2, 2020.
- [18] M. Rogulski, «Current trends in network based air quality monitoring systems,» *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 214, pp. 85-100, 2019.
- [19] P. Gokul, «Internet of Things Based Air Pollution Monitoring and Forecasting System,» *Sustainable Communication Networks and Application*, pp. 439-451, 2019.
- [20] A. Janarthanan, «Real-time indoor air quality monitoring using the Internet of Things,» *Third International Conference on Intelligent Computing Instrumentation and Control Technologies (ICICICT)*, 2022.
- [21] R. T. Minkov, «Air Pollution Monitoring System,» *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, vol. 8, n° 11, pp. 2275-2279, 2019.
- [22] A. Raghad, «A Survey on Smart Monitoring System of Environment Based on IoT,» *Al-Rafidain Engineering Journal (AREJ)*, vol. 26, n° 1, pp. 147-159, 2021.
- [23] K. Reddy, «On Air Pollution Monitoring Systems using IoT,» *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, vol. 8, n° 63, pp. 1861-1862, 2019.

- [24] A. Marini, «Design of an Urban Monitoring System for Air Quality in Smart Cities,» *10th International Conference on Smart Cities and Green ICT Systems*, 2021.
- [25] S. Shakeela, «Novel Computational and Forecasting Strategy For Environment Quality Monitoring using Deep Learning,» *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, vol. 8, n° 3, pp. 2222-2227, 2019.
- [26] S. Brijesh, «A Review on Various Methods Employed to Measure Air Quality in the Vicinity Using Internet of Things,» *5th Biennial International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE)*, 2023.
- [27] D. Suriano, «Preface to State-of-the-Art in Real-Time Air Quality Monitoring through Low-Cost Technologies,» *Atmosphere*, vol. 14, n° 3, p. 554, 2023.
- [28] B. Marinov, «Smart Multisensor Node for Environmental Parameters Monitoring in Urban Areas,» *National Conference with International Participation (ELECTRONICA)*, 2019.
- [29] Z. Dahari, «Enhancement of real-time IoT-based air quality monitoring system,» *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, vol. 11, n° 1, p. 390, 2020.
- [30] N. Thakur, «IoT based Air Pollution Monitoring System,» *International Conference on Computational Intelligence and Knowledge Economy (ICCIKE)*, 2023.
- [31] Q. Han, «A Wireless Sensor Network for Monitoring Environmental Quality in the Manufacturing Industry,» *IEEE Access*, vol. 7, pp. 78108-78119, 2019.
- [32] R. Mishra, «Recent developments in the production of inexpensive indoor air quality monitoring device,» *International Journal of Science and Research Archive*, vol. 7, n° 2, pp. 357-363, 2022.
- [33] R. Ghosh, «Air Pollution Monitoring Using Near Room Temperature Resistive Gas Sensors: A Review,» *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 66, n° 8, pp. 3254-3264, 2019.
- [34] G. Akhobadze, «Diagnosing Technosphere Pollution to Form Environmental Policy,» *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 988, n° 3, pp. 11-32, 2022.
- [35] U. Komarudin, «Design and Implementation of A Low-Cost Air Quality Measurement Instrumentation Using Internet-of-Things Platform and Cloud-based Messaging Service,» *1st International Conference on Electronic and Electrical Engineering and Intelligent System (ICE3IS)*, 2021.

- [36] N. Garciga, MEASUREMENT OF ENVIROMENTAL VARIABLES IN DIFFERENT SCENARIOS, 2021.
- [37] A. Silvia, «PERANCANGAN WIRELESS SENSOR NETWORK MENGGUNAKAN TEKNOLOGI MULTISENSOR SEBAGAI SISTEM MONITORING KUALITAS UDARA,» *Jurnal Qua Teknika*, vol. 10, n° 2, pp. 1-13, 2020.
- [38] H. Surjeet, Air Pollution Quality Monitoring System Using Internet of Things for Smart Cities, 2021.
- [39] E.Kavitha, AIR QUALITY MONITORING USING NODE MICROCONTROLLER UNIT AND BLYNK SOFTWARE, 2020.
- [40] T. Srikanth, Iot BASED SMART INDUSTRY POLLUTION MONITORING, 2021.
- [41] E. Kavitha, AIR QUALITY MONITORING USING NODE MICROCONTROLLER UNIT AND BLYNK SOFTWARE, 2022.
- [42] R. Singh, AIR AND SOUND POLLUTION MONITORING SYSTEM USING IOT, 2022.
- [43] S. Irhami, Air pollution monitoring system with internet of thing [IOT] technology/Afif Irhami Shaik Amair, 2021.
- [44] H. Zhang, «A Systematic Review of Air Quality Sensors, Guidelines, and Measurement Studies for Indoor Air Quality Management,» *Sustainability*, vol. 12, n° 21, pp. 45-59, 2020.
- [45] P. Posina, «Recent advancements in Wireless Sensor Networks for Air Pollution Monitoring: A Survey Report of 2021-2022,» *International Conference on Advances in Electronics, Communication, Computing and Intelligent Information Systems (ICAECIS)*, 2023.

ANEXOS

Anexo A. Datasheet del sensor MQ-4



炜盛科技 Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Ltd

www.winsensor.com

MQ-4 Semiconductor Sensor for Flammable Gas

Profile

Sensitive material of MQ-4 gas sensor is SnO₂, which with lower conductivity in clean air. When the target flammable gas exist, the sensor's conductivity gets higher along with the gas concentration rising. Users can convert the change of conductivity to correspond output signal of gas concentration through a simple circuit.

MQ-4 gas sensor has high sensitivity to methane, also has anti-interference to alcohol and other gases.

Features

It has good sensitivity to methane in wide range, and has advantages such as long lifespan, low cost and simple drive circuit &etc.

Main Applications

It is widely used in domestic gas leakage alarm, industrial flammable gas alarm and portable gas detector.

Technical Parameters Stable.1

Model		MQ-4	
Sensor Type		Semiconductor	
Standard Encapsulation		Bakelite, Metal cap	
Target Gas		Methane	
Detection range		300~1000ppm(CH ₄)	
Standard Circuit Conditions	Loop Voltage	V _L	≤24V DC
	Heater Voltage	V _H	5.0V±0.1V AC or DC
	Load Resistance	R _L	Adjustable
Sensor character under standard test conditions	Heater Resistance	R _H	26Ω±3Ω(room tem.)
	Heater consumption	P _H	≤950mW
	Sensitivity	S	R _s (in air)/R _s (in 5000ppmCH ₄)≥5
	Output Voltage	V _S	2.5V~4.0V (in 5000ppm CH ₄)
	Concentration Slope	α	≤0.6(R _{s5000ppm} /R _{s1000ppm} CH ₄)
Standard test conditions	Tem. Humidity	20℃±2℃; 55%±5%RH	
	Standard test circuit	V _L :5.0V±0.1V; V _H :5.0V±0.1V	
	Preheat time	Over 48 hours	

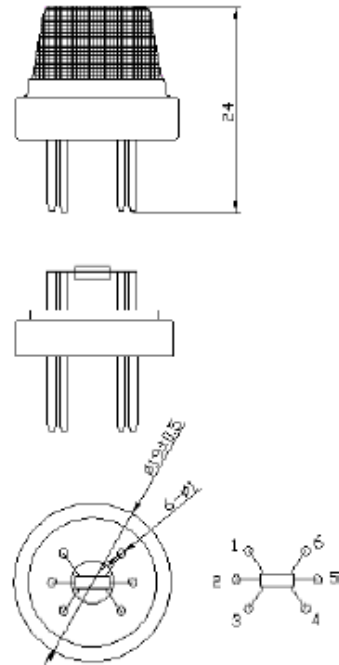


Fig1.Sensor Structure

Unit: mm

NOTE: Output voltage (V_S) is V_{R_L} in test environment.

Tel: 86-371-67169097/67169670 Fax: 86-371-60932988

Email: sales@winsensor.com

Anexo B. Datasheet del sensor MQ-7



SGX Europe Sp. z o.o.
Building 11
Ligocka St. 103,
40-588 Katowice,
Poland

T: +48 (0) 32 438 4778

E: sales.is@sgxsensortech.com
www.sgxsensortech.com

IR15 Dual Gas Series Datasheet

Infrared Dual Gas Sensor for Hazardous Environments
(Portable and Fixed Systems)

The SGX infrared sensors use the proven Non-Dispersive Infrared (NDIR) principle to detect and monitor the presence of gases. With an infrared source and specific filtering on the pyroelectric detectors mounted inside the optical/gas cavity, individual gases or types of gas can be identified and their concentrations determined.

These sensors are suitable for reliable monitoring of gas levels in general safety applications where the sensor size is restricted and require a flameproof enclosure for hazardous environments.

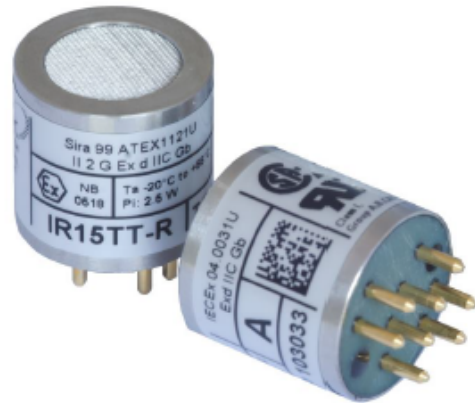
The IR15 Series contain two active detector elements for simultaneous monitoring of Carbon Dioxide and Methane or Hydrocarbon mixtures in the same size housing as some of the single gas sensors from the IR1xxx series sensors, making the sensor more cost effective than two separate sensors.

APPLICATIONS

- Oil & Gas
- Petrochemical
- Biogas
- Wastewater
- Utilities
- Steelworks
- Confined Space Entry
- Indoor Air Quality

FEATURES

- For detection of the following gases:
 - Carbon Dioxide & Hydrocarbons,
 - Hydrocarbons Mixtures
- Gas concentration ranges:
 - 0 - 5% Carbon Dioxide (also suitable for 0 to 0.5%v/v)
 - 0 - 100% Carbon Dioxide (also suitable for 0 to 10%)
 - 0 - 100%v/v Hydrocarbons (also suitable for 0 to 100%LEL)
- 19mm sensor height
- Embedded thermistor for improved temperature compensation
- Diffused gas sampling via mesh
- Low power
- Reference channel for self-compensation
- Special gold plated optical gas cavity for stable signal levels
- Operational in varying temperature, pressure and humidity
- Fast response
- Rugged stainless steel construction
- No moving parts
- Immunity from 'poisoning'
- Reliable fail-safe operation
- Certified: ATEX, IECEx, CSA and UL



OPERATION

To operate, the sensors must be interfaced to a suitable circuit for power supply, output amplification and signal processing. Sensor outputs require linearisation and compensation for ambient temperature variation using algorithms in the system firmware. This is necessary for sensors to meet their full performance specification. An embedded temperature sensor facilitates this compensation on certain types. Further compensation for pressure changes can also be made in an algorithm, provided there is a suitable input from a pressure sensor.

A set of Application Notes is available from the SGX Sensortech Ltd website, to explain more about NDIR gas sensing and provide advice for the end-user on interfacing the sensors and processing signals.

TECHNICAL SPECIFICATION

Mechanical

Dimensions	See Outlines
Body material	Stainless Steel
Approximate Weight	35g

Environmental

Ambient temperature range for operation:	-20°C to +55°C
storage:	-20°C to +55°C
Operational pressure range	30kPa to 130kPa
Humidity range for operation and storage	0 to 95% RH (Non-condensing)

Electrical

DC supply to detectors	3V to 5V
Typical power	180mW @ 5V
IR Source Supply (Recommended)	+5V, 60mA (Square Wave at 4Hz, 50% duty cycle)

Whilst SGX has taken care to ensure the accuracy of the information contained herein it accepts no responsibility for the consequences of any use thereof and also reserves the right to change the specification of goods without notice. SGX accepts no liability beyond the set out in its standard conditions of sale in respect of infringement of third party patents arising from the use of SGX products in accordance with information contained herein. In case of modification of the product, SGX disclaims all liability.

Anexo C. Datasheet del sensor MQ-8



SGX Europe Sp. Z o.o.
Building 11
Ligocka St. 103,
40-668 Katowice,
Poland

T: +48 (0) 32 438 4778
E: sales.is@sgxsensortech.com
www.sgxsensortech.com

SGX-4OX Datasheet

Industrial Oxygen Sensor
(Application: Portable Gas Detectors)

PERFORMANCE

Range	0 – 25% O ₂
Zero Current (Offset)	< 0.6 %v/v O ₂
Output Signal in Air	70 to 130 µA
Linearity	Linear
Response Time (T ₉₀)	<15 s
Maximum Overload	30% O ₂
Long-term Output Drift	<5% per annum
Recommended Load Resistor	100 ohms
Warranty	2 years

OPERATING CONDITIONS

Temperature Range	-30°C to +50°C
Operating Humidity	5 – 95% RH (non-condensing)
Pressure range	800 to 1200 mbar
Recommended Storage Temperature	0°C to 20°C
Expected Operating Life	>2 years in air

INTRINSIC SAFETY DATA

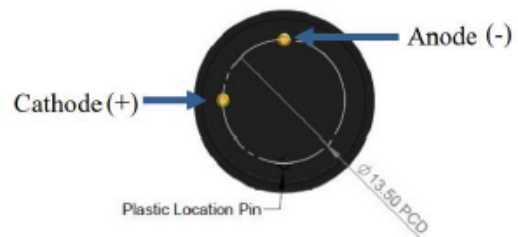
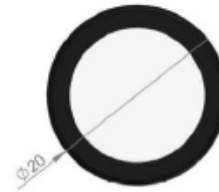
Maximum Current in Normal Operation (pure O ₂)	0.01 A
Maximum o/c Voltage (10 to 100% O ₂)	0.9 V
Maximum s/c Current (10 to 100% O ₂)	0.5 A

SENSOR OUTPUT

The output signal (in mA) is derived by measuring the voltage drop across a resistor placed across the sensor output pins. A value of 100 Ohms is the suggested value.

OUTLINE

All dimensions are in mm
All tolerances are ±0.15mm
Pin diameter = 1.50 mm



IMPORTANT NOTES

- All performance is based on conditions at 20°C, 50% RH and 1 atm, using SGX recommended circuitry.
- Sensor performance is temperature dependant; please contact SGX for temperature performance other than 20°C.
- Do not solder to the connector pins as this may damage the sensor and thereby invalidate the warranty.
- Details on recommended connector pins can be found in the Frequently Asked Questions within the Gas Sensor section of the SGX website.

Anexo D. Datasheet del sensor MQ-9

Profile

Sensitive material of MQ-6 gas sensor is SnO_2 , which with lower conductivity in clean air. When the target flammable gas exist, the sensor's conductivity gets higher along with the gas concentration rising. Users can convert the change of conductivity to correspond output signal of gas concentration through a simple circuit.

MQ-6 gas sensor can detect kinds of flammable gases, especially has high sensitivity to LPG (propane). It is a kind of low-cost sensor for many applications.

Features

It has good sensitivity to flammable gas(especially propane) in wide range, and has advantages such as long lifespan, low cost and simple drive circuit &etc.

Main Applications

It is widely used in domestic gas leakage alarm, industrial flammable gas alarm and portable gas detector.

Technical Parameters

Stable 1.

Model		MQ-6	
Sensor Type		Semiconductor	
Standard Encapsulation		Bakelite, Metal cap	
Target Gas		LPG	
Detection range		300~10000ppm (Propane)	
Standard Circuit Conditions	Loop Voltage	V_c	$\leq 24V$ DC
	Heater Voltage	V_H	$5.0V \pm 0.1V$ AC or DC
	Load Resistance	R_L	Adjustable
Sensor character under standard test conditions	Heater Resistance	R_H	$26\Omega \pm 3\Omega$ (room tem.)
	Heater consumption	P_H	$\leq 950mW$
	Sensitivity	S	$R_s(\text{in air})/R_s(\text{in } 2000ppm \text{ C}_3\text{H}_8) \geq 5$
	Output Voltage	V_s	$2.5V \sim 4.0V$ (in 2000ppm C_3H_8)
Standard test conditions	Concentration Slope	α	$\leq 0.6(R_{1000ppm}/R_{1000ppm} \text{ C}_3\text{H}_8)$
	Tem. Humidity	$20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}; 55\% \pm 5\%RH$	
	Standard test circuit	$V_c: 5.0V \pm 0.1V;$ $V_H: 5.0V \pm 0.1V$	
Pre heat time		Over 48 hours	

NOTE: Output voltage (V_s) is V_{RL} in test environment.

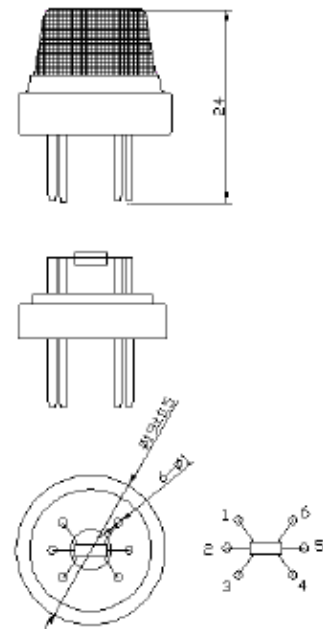


Fig1.Sensor Structure

Unit: mm

Tel: 86-371-67169097/67169670 Fax: 86-371-60932988

Email: sales@winsensor.com

Anexo E. Datasheet del sensor MQ-811



SGX Europe Sp. z o.o.
Building 11
Ligocka St. 103,
40-568 Katowice,
Poland

T: +48 (0) 32 438 4778
E: sales.is@sgxsensortech.com
www.sgxsensortech.com

IR1 Single Gas Series Datasheet

**Infrared Single Gas Sensor for Hazardous Environments
(Portable and Fixed Systems)**

The SGX infrared sensors use the proven Non-Dispersive Infrared (NDIR) principle to detect and monitor the presence of gases. With an infrared source and specific filtering on the pyroelectric detectors mounted inside the optical/gas cavity, individual gases or types of gas can be identified and their concentrations determined.

These sensors are suitable for reliable monitoring of gas levels in general safety applications where the sensor size is restricted and require a flameproof enclosure for hazardous environments.

APPLICATIONS

- Oil & Gas
- Petrochemical
- Biogas
- Wastewater
- Utilities
- Steelworks
- Confined Space Entry
- Indoor Air Quality

FEATURES

- For detection of the following gases:
 - Carbon Dioxide (IR11 Series),
 - Hydrocarbons (IR12 series, IR13 series)
 - Acetylene (IR14 series)
- Gas concentration ranges:
 - 0 - 5% Carbon Dioxide (also suitable for 0 to 0.5%v/v)
 - 0 - 100% Carbon Dioxide (also suitable for 0 to 10%)
 - 0 - 100%v/v Hydrocarbons (also suitable for 0 to 100%LEL)
 - 0 - 100%v/v Acetylene (also suitable for 0 to 100%LEL)
- 18.8mm or 19.0mm sensor heights available
- Embedded temperature sensor in some versions for improved temperature compensation
- Shock-resistant IR Source version available on certain types
- Diffused gas sampling via mesh
- Low power
- Reference channel for self-compensation
- Special gold plated optical gas cavity for stable signal levels
- Operational in varying temperature, pressure and humidity
- Fast response
- Rugged stainless steel construction
- No moving parts
- Immunity from 'poisoning'
- Reliable fail-safe operation
- Certified: ATEX, IECEx, CSA and UL



OPERATION

To operate, the sensors must be interfaced to a suitable circuit for power supply, output amplification and signal processing. Sensor outputs require linearisation and compensation for ambient temperature variation using algorithms in the system firmware. This is necessary for sensors to meet their full performance specification. An embedded temperature sensor facilitates this compensation on certain types. Further compensation for pressure changes can also be made in an algorithm, provided there is a suitable input from a pressure sensor.

A set of Application Notes is available from the SGX Sensortech Ltd website, to explain more about NDIR gas sensing and provide advice for the end-user on interfacing the sensors and processing signals.

TECHNICAL SPECIFICATION

Mechanical

Dimensions	See Outlines
Body material	Stainless Steel
Approximate Weight	30g

Environmental

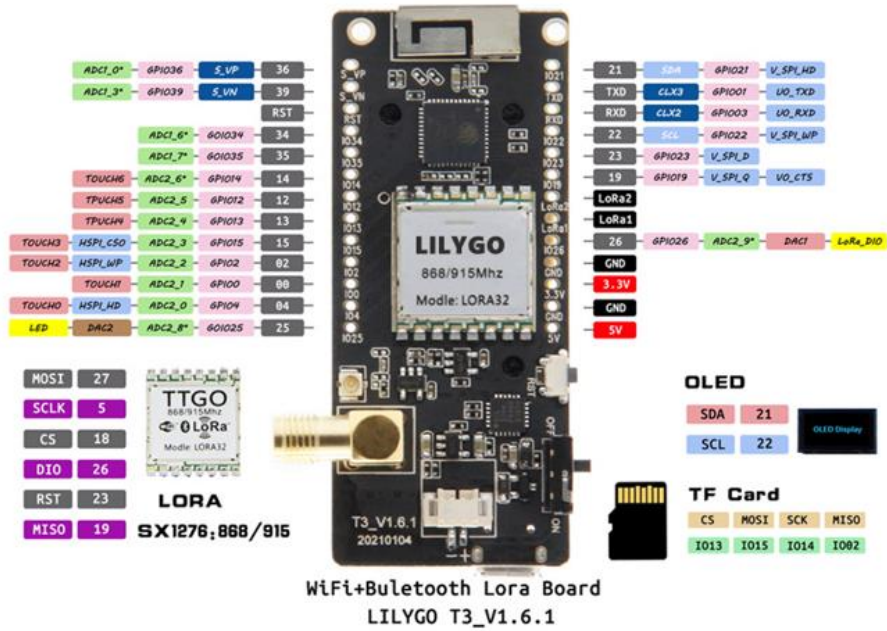
Ambient temperature range for operation:	-20°C to +55°C
storage:	-20°C to +55°C
Operational pressure range	30kPa to 130kPa
Humidity range for operation and storage	0 to 95% RH (Non-condensing)

Electrical

DC supply to detectors	3V to 5V
Typical power	180mW @ 5V
IR Source Supply (Recommended)	+5V, 60mA (Square Wave at 4Hz, 50% duty cycle)

Whilst SGX has taken care to ensure the accuracy of the information contained herein it accepts no responsibility for the consequences of any use thereof and also reserves the right to change the specification of goods without notice. SGX accepts no liability beyond the set out in its standard conditions of sale in respect of infringement of third party patents arising from the use of SGX products in accordance with information contained herein. In case of modification of the product, SGX disclaims all liability.

Anexo F. Datasheet de Lilygo LoRa32 915 MHz Esp 32



Product Description



Working voltage: 1.8~3.7v

Transmit current:

120mA@+20dBm

90mA@+17dBm

29mA@+13dBm

Receive sensitivity

-139dBm@LoRa & 62.5Khz&SF=12&146bps

-136dBm@LoRa & 125Khz&SF=12&293bps

-118dBm@LoRa & 125Khz&SF=6&9380bps

-123dBm@FSK&5Khz&1.2Kbps

- Acceptable current: 10~14mA
- Operating frequency: 868/915/923MHz
- Transmit power: +20dBm
- FIFO space: 64Byte
- Frequency error: +/-15KHz

Data rate:

1.2K~300Kbps@FSK

0.018K~37.5Kbps@LoRa

Modulation Mode:

FSK,GFSK,MSK,GMSK,LoRa ,OOK

Interface form: SPI

Sleep current:

334µA@SLEEP//1.5µA@IDLE

Operating temperature: -40°C~+85°C

Anexo G. Ubicación de los dispositivos



Anexo H. Código de programación del microcontrolador

```

1 | #include "LoRa.h"
2 |
3 | // registers
4 | #define REG_FIFO                0x00
5 | #define REG_OP_MODE             0x01
6 | #define REG_FRF_MSB             0x06
7 | #define REG_FRF_MID             0x07
8 | #define REG_FRF_LSB             0x08
9 | #define REG_PA_CONFIG           0x09
10 | #define REG_LR_OCP              0x0b
11 | #define REG_LNA                  0x0c
12 | #define REG_FIFO_ADDR_PTR       0x0d
13 | #define REG_FIFO_TX_BASE_ADDR   0x0e
14 | #define REG_FIFO_RX_BASE_ADDR   0x0f
15 | #define REG_FIFO_RX_CURRENT_ADDR 0x10
16 | #define REG_IRQ_FLAGS           0x12
17 | #define REG_RX_NB_BYTES         0x13
18 | #define REG_PKT_RSSI_VALUE       0x1a
19 | #define REG_PKT_SNR_VALUE       0x1b
20 | #define REG_MODEM_CONFIG_1      0x1d
21 | #define REG_MODEM_CONFIG_2      0x1e
22 | #define REG_PREAMBLE_MSB        0x20
23 | #define REG_PREAMBLE_LSB        0x21
24 | #define REG_PAYLOAD_LENGTH      0x22
25 | #define REG_MODEM_CONFIG_3      0x26
26 | #define REG_RSSI_WIDEBAND        0x2c
27 | #define REG_DETECTION_OPTIMIZE   0x31
28 | #define REG_DETECTION_THRESHOLD 0x37
29 | #define REG_SYNC_WORD           0x39
30 | #define REG_DIO_MAPPING_1       0x40
31 | #define REG_VERSION             0x42
32 | #define REG_PaDac                0x4d//add REG_PaDac
33 |
34 | // modes
35 | #define MODE_LONG_RANGE_MODE    0x80
36 | #define MODE_SLEEP               0x00
37 | #define MODE_STDBY               0x01
38 | #define MODE_TX                  0x03
39 | #define MODE_RX_CONTINUOUS       0x05
40 | #define MODE_RX_SINGLE           0x06
41 |
42 | // PA config
43 | //#define PA_BOOST                0x80
44 | //#define RFO                      0x70
45 | // IRQ masks
46 | #define IRQ_TX_DONE_MASK         0x08
47 | #define IRQ_PAYLOAD_CRC_ERROR_MASK 0x20
48 | #define IRQ_RX_DONE_MASK        0x40
49 |
50 | /*!
51 |  * RegInvertIQ
52 |  */
53 | #define RFLR_INVERTIQ_RX_MASK    0xBF
54 | #define RFLR_INVERTIQ_RX_OFF    0x00
55 | #define RFLR_INVERTIQ_RX_ON     0x40
56 | #define RFLR_INVERTIQ_TX_MASK    0xFE
57 | #define RFLR_INVERTIQ_TX_OFF    0x01
58 | #define RFLR_INVERTIQ_TX_ON     0x00
59 |
60 | #define REG_LR_INVERTIQ           0x33
61 |
62 | /*!
63 |  * RegInvertIQ2
64 |  */
65 | #define RFLR_INVERTIQ2_ON        0x19
66 | #define RFLR_INVERTIQ2_OFF      0x1D
67 |
68 | #define REG_LR_INVERTIQ2         0x3B
69 |
70 |
71 | #define MAX_PKT_LENGTH           255

```

```

72|
73| LoRaClass::LoRaClass() :
74|   _spiSettings(8E6, MSBFIRST, SPI_MODE0),
75|   _ss(LORA_DEFAULT_SS_PIN), _reset(LORA_DEFAULT_RESET_PIN),
76|   _dio0(LORA_DEFAULT_DIO0_PIN),
77|   _frequency(0),
78|   _packetIndex(0),
79|   _implicitHeaderMode(0),
80|   _onReceive(NULL)
81| {
82|   // override Stream timeout value
83|   setTimeout(0);
84| }
85| int LoRaClass::begin(long frequency, bool PABOOST)
86| {
87|   // setup pins
88|   pinMode(_ss, OUTPUT);
89|   pinMode(_reset, OUTPUT);
90|   pinMode(_dio0, INPUT);
91|   // perform reset
92|   digitalWrite(_reset, LOW);
93|   delay(20);
94|   digitalWrite(_reset, HIGH);
95|   delay(50);
96|   // set SS high
97|   digitalWrite(_ss, HIGH);
98|   // start SPI
99|   SPI.begin();
100|   // check version
101|   uint8_t version = readRegister(REG_VERSION);
102|   if (version != 0x12) {
103|     return 0;
104|   }
105|   // put in sleep mode
106|   sleep();
107|   // set frequency
108|   setFrequency(frequency);
109|   // set base addresses
110|   writeRegister(REG_FIFO_TX_BASE_ADDR, 0);
111|   writeRegister(REG_FIFO_RX_BASE_ADDR, 0);
112|   // set LNA boost
113|   writeRegister(REG_LNA, readRegister(REG_LNA) | 0x03);
114|   // set auto AGC
115|   writeRegister(REG_MODEM_CONFIG_3, 0x04);
116|   // disable LDR by default
117|   disableLowDataRate();
118|   // set output power to 14 dBm
119|   if(PABOOST == true)
120|     setTxPower(14, RF_PACONFIG_PASELECT_PABOOST);
121|   else
122|     setTxPower(14, RF_PACONFIG_PASELECT_RFO);
123|   setSpreadingFactor(11);
124|   // put in standby mode
125|   setSignalBandwidth(125E3);
126|   //setCodingRate4(5);
127|   setSyncWord(0x34);
128|   disableCrc();
129|   crc();
130|   idle();
131|   return 1;
132| }
133|
134| void LoRaClass::end()
135| {
136|   // put in sleep mode
137|   sleep();
138|   // stop SPI
139|   SPI.end();
140| }
141|
142| int LoRaClass::beginPacket(int implicitHeader)
143| {
144|   // put in standby mode
145|   idle();

```

```

146|     if (implicitHeader) {
147|         implicitHeaderMode();
148|     } else {
149|         explicitHeaderMode();
150|     }
151|     // reset FIFO address and paload length
152|     writeRegister(REG_FIFO_ADDR_PTR, 0);
153|     writeRegister(REG_PAYLOAD_LENGTH, 0);
154|     return 1;
155| }
156|
157| int LoRaClass::endPacket(bool async)
158| {
159|     // put in TX mode
160|     writeRegister(REG_OP_MODE, MODE_LONG_RANGE_MODE | MODE_TX);
161|
162|     if (async) {
163|         // grace time is required for the radio
164|         delayMicroseconds(150);
165|     } else {
166|         // wait for TX done
167|         while ((readRegister(REG_IRQ_FLAGS) & IRQ_TX_DONE_MASK) == 0) {
168|             yield();
169|         }
170|         // clear IRQ's
171|         writeRegister(REG_IRQ_FLAGS, IRQ_TX_DONE_MASK);
172|     }
173|
174|     return 1;
175| }
176|
177| int LoRaClass::parsePacket(int size)
178| {
179|     int packetLength = 0;
180|     int irqFlags = readRegister(REG_IRQ_FLAGS);
181|
182|     if (size > 0) {
183|         implicitHeaderMode();
184|         writeRegister(REG_PAYLOAD_LENGTH, size & 0xff);
185|     } else {
186|         explicitHeaderMode();
187|     }
188|
189|     // clear IRQ's
190|     writeRegister(REG_IRQ_FLAGS, irqFlags);
191|
192|     if ((irqFlags & IRQ_RX_DONE_MASK) && (irqFlags & IRQ_PAYLOAD_CRC_ERROR_MASK)
== 0) {
193|         // received a packet
194|         _packetIndex = 0;
195|         // read packet length
196|         if (_implicitHeaderMode) {
197|             packetLength = readRegister(REG_PAYLOAD_LENGTH);
198|         } else {
199|             packetLength = readRegister(REG_RX_NB_BYTES);
200|         }
201|         // set FIFO address to current RX address
202|         writeRegister(REG_FIFO_ADDR_PTR, readRegister(REG_FIFO_RX_CURRENT_ADDR));
203|         // put in standby mode
204|         idle();
205|     }
206|     else if (readRegister(REG_OP_MODE) != (MODE_LONG_RANGE_MODE | MODE_RX_SINGLE))
{
207|         // not currently in RX mode
208|         // reset FIFO address
209|         writeRegister(REG_FIFO_ADDR_PTR, 0);
210|         // put in single RX mode
211|         writeRegister(REG_OP_MODE, MODE_LONG_RANGE_MODE | MODE_RX_SINGLE);
212|     }
213|     return packetLength;
214| }
215|
216| int LoRaClass::packetRssi()
217| {
218|     int8_t snr=0;

```