


**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO**

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

**CARRERA DE TELECOMUNICACIONES**

**Tema:**

# SISTEMA DE MONITOREO PARA LA CALIDAD DE AIRE AMBIENTE DE LA CIUDAD DE AMBATO UTILIZANDO DRONES

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

**ÁREA:** Comunicaciones

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

**AUTOR:** Edgar Gustavo Martinez Diaz

**TUTOR:** Ing. Jesús Israel Guamán Molina, Mg.

**Ambato - Ecuador**

agosto – 2024

## APROBACIÓN DEL TUTOR

En calidad de tutor del trabajo de titulación con el tema: SISTEMA DE MONITOREO PARA LA CALIDAD DE AIRE AMBIENTE DE LA CIUDAD DE AMBATO UTILIZANDO DRONES, desarrollado bajo la modalidad Proyecto de Investigación por el señor Edgar Gustavo Martinez Diaz, 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 el estudiante ha sido tutorado 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, agosto 2024.

Firmado electrónicamente por:
JESUS ISRAEL GUAMAN MOLINA

---

Ing. Jesús Israel Guamán Molina, Mg.

TUTOR

## AUTORÍA

El presente trabajo de titulación con el tema: SISTEMA DE MONITOREO PARA LA CALIDAD DE AIRE AMBIENTE DE LA CIUDAD DE AMBATO UTILIZANDO DRONES 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, agosto 2024.



Edgar Gustavo Martinez Diaz

C.C. 1804540787

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, agosto 2024.



Edgar Gustavo Martinez Diaz

C.C. 1804540787

AUTOR

## APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

En calidad de par calificador del informe final del trabajo de titulación presentado por el señor Edgar Gustavo Martinez Diaz, 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 PARA LA CALIDAD DE AIRE AMBIENTE DE LA CIUDAD DE AMBATO UTILIZANDO DRONES, 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, agosto 2024.

Firmado electrónicamente por:
ELSA PILAR URRUTIA URRUTIA

---

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

Firmado electrónicamente por:
FRANKLIN WILFRIDO SALAZAR LOGRONO

---

Ing. Franklin Salazar Logroño, Mg.
PROFESOR CALIFICADOR

Firmado electrónicamente por:
SANTIAGO MAURICIO ALTAMIRANO MELENDEZ

---

Ing. Santiago Altamirano Meléndez, Mg.
PROFESOR CALIFICADOR

# DEDICATORIA

*Este trabajo lo dedico a mis padres Patricio, que con sus consejos y sabiduría ha sabido levantarme enseñándome a nunca darme por vencido, mi Glorita aquella mujer que con su amor y bendición estuvo con un "tu si puedes" , y a mi hermana que a pesar de ser menor supo llevar la altura en sus consejos.*

*Al amor de mi vida, mi Salomé esa personita que llego en el momento indicado que tan solo con su presencia me motivo a cumplir metas que parecían perdidas.*

***Edgar Martinez***

## AGRADECIMIENTO

*Un agradecimiento total a Dios que me dio una nueva oportunidad de vida, y enseñarme que de su mano todo es posible.*

*Mis Osis, gracias por ser esa familia imperfecta, pero con la visión de ir mejorando siempre.*

*Quisiera nombrar a todas las personas que me han apoyado en lo bueno y en lo malo, destacare a mis tías Ximena, Fanny y su esposo, a mi tío Fabian y su familia y a mis segundos padres, Floresmilo(+) y María mis viejitos .*

*Un agradecimiento especial a la madre de mi Hija Daniela, por tener 9 meses en su vientre a la personita que Dios nos mandó, gracias por darme ese motivo que me impulsó a comenzar nuevamente.*

*De la misma manera quiero agradecer a todos los profesores de la facultad quienes me han brindado los conocimientos que me permitirán escalar en la vida profesional. De manera muy especial al Ing. Jesús Guamán, quien con paciencia sabiduría y risas ha sabido brindarme el apoyo para realización de mi proyecto.*

*Si puedes creer, al que cree todo es posible.*

*Marcos 9:23*

***Edgar Martinez***

## 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** ..... **xii**

**ÍNDICE DE FIGURAS** ..... **xiv**

**ÍNDICE DE ANEXOS** ..... **xix**

**RESUMEN EJECUTIVO** ..... **xx**

**ABSTRACT** ..... **xxi**

**CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO** ..... **1**

1.1 Tema de investigación ..... 1

1.1.1 Planteamiento del problema ..... 1

1.2 Antecedentes investigativos ..... 2

1.3 Fundamentación teórica ..... 6

1.3.1 Contaminación del medio Ambientes ..... 6

1.3.2 Principales químicos contaminantes ..... 9

1.3.3 Rangos de los compuestos químicos ..... 12

1.3.4 Tecnología de comunicación inalámbrica ..... 15

1.3.5 Protocolos de mensajería ligera ..... 16

1.3.6 Tipos de sensores de factores químicos en el aire ..... 17

1.3.7 Sistemas electrónicos comerciales de monitoreo de la calidad del aire ..... 18

1.3.8 La evolución de la monitorización ambiental a través de la tecnología. ..... 19

Vehículos aéreos no tripulados VANTs ..... 21

1.3.9 Categorías de Vehículos Aéreos No Tripulados (UAV) de Alas Rotatorias ..... 22

1.3.10 Clasificación de los UAVs según su tipo de ala ..... 24

1.3.11 Uso de UAVS en la monitorización de diferentes aplicaciones ..... 24

1.3.12 Componentes principales de los UAVs ..... 25

1.3.13 Controladora de Vuelo ..... 28

1.4 Objetivos ..... 28

1.4.1 Objetivo general ..... 28

1.4.2 Objetivos específicos ..... 28

**CAPÍTULO II. METODOLOGÍA ..... 29**

2.1 Materiales ..... 29

2.2 Métodos ..... 30

2.2.1 Modalidad de la investigación ..... 30

2.2.2 Recolección de información ..... 31

2.2.3 Procesamiento y análisis de datos ..... 32

**CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN ..... 33**

3.1 Requerimientos del sistema ..... 33

3.2 Esquema general del sistema ..... 35

3.3 Diseño del prototipo ..... 37

3.3.1 Selección de dispositivos ..... 37

3.3.2 Selección de tecnologías ..... 40

3.3.3 Selección del dron para el sistema ..... 42

3.4 Consideraciones para el funcionamiento del Sistema ..... 43

3.5 Arquitectura del sistema ..... 46

3.6 Diseño del prototipo ..... 46

3.6.1 Diseño de la placa de control ..... 46

3.6.2 Construcción del prototipo ..... 50

3.6.3 Análisis de la estabilidad del Dron ..... 56

3.6.4 Acoplamiento de sistemas y pruebas ..... 67

3.6.5 Procesamiento y evaluación de los datos obtenidos ..... 103

3.6.6 Presupuesto ..... 105

**CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES ..... 106**

4.1 Conclusiones ..... 106

4.2 Recomendaciones ..... 108

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... 109**

**ANEXOS ..... 115**

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Rangos y efectos de los compuestos químicos ..... 13

Tabla 2. Resumen de rangos mínimos, máximos y peligrosos de los distintos compuestos químicos ..... 14

Tabla 3. Sistemas electrónicos comerciales de monitoreo de la calidad del aire..... 19

Tabla 4. Clasificación de los UAVs ..... 24

Tabla 5. Materiales implementados en el sistema de monitoreo ..... 29

Tabla 6.Caracteristicas de la zona céntrica de Ambato..... 33

Tabla 7. Factores químicos seleccionados para el monitoreo ..... 34

Tabla 8. Factores químicos ..... 35

Tabla 9. Características de sensores comerciales..... 38

Tabla 10: Características de los microcontroladores con tecnología Lora ..... 39

Tabla 11: Tabla comparativa de servomotores ..... 40

Tabla 12: Tabla comparativa de tecnologías inalámbricas ..... 40

Tabla 13: Tabla comparativa de sistemas gestores de bases de datos..... 41

Tabla 14. Comparativa de protocolos de mensajería ..... 41

Tabla 15: Características de las tecnologías de comunicación inalámbricas..... 42

Tabla 16.Caracteristicas de los drones..... 43

Tabla 17. Detalle de consumo eléctrico ..... 52

Tabla 18. Pines de conexión y datos de alimentación nodo 1..... 54

Tabla 19. Pines de conexión y datos de alimentación nodo 2..... 55

Tabla 20. Rangos considerados para los sensores ..... 71

Tabla 21. Valores capturados por los sensores ..... 71

Tabla 22. Comparación de los servidores en la nube ..... 81

Tabla 23. Rangos mínimos medios y máximos de los sensores usados en la estación desarrollada ..... 89

Tabla 24. Comparación de datos en diferentes tiempos ..... 98

Tabla 25. Comparación de datos en diferentes tiempos ..... 99

Tabla 26. Comparación de datos en diferentes tiempos ..... 101

Tabla 27 Comparación de datos en diferentes tiempos ..... 102

Tabla 28. Valores de la varianza de todos los sensores ..... 104

Tabla 29. Valores de ACF de $NO_2$ ..... 115

Tabla 30. Valores de ACF de NO ..... 116

Tabla 31. Valores de ACF de $SO_2$ ..... 117

Tabla 32. Valores de ACF de CO ..... 118

Tabla 33. Valores de ACF de $CO_2$ ..... 119

Tabla 34. Valores de ACF de $O_3$ ..... 120

Tabla 35. Valores de ACF de PM2.5: ..... 121

Tabla 36. Valores de ACF de PM10: ..... 122

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Partes de un UAV ..... 21

Figura 2.Tricopteros ..... 22

Figura 3. Cuadricóptero ..... 22

Figura 4. Hexacópteros ..... 23

Figura 5. Octocópteros ..... 23

Figura 6. Monitorización del UAV en diferentes áreas de aplicación ..... 24

Figura 7. Clasificación de los UAVs de acuerdo con el uso y la aplicación ..... 25

Figura 8. Marco Hexacópteros ..... 26

Figura 9. Motor Brushless ..... 27

Figura 10. Hélices de la aeronave ..... 27

Figura 11. Esquema general del sistema a implementar ..... 36

Figura 12. Esquema general de los sistemas del proceso ..... 44

Figura 13. Diagrama para adquisición de datos en Arduino ..... 44

Figura 14.Diagrama de registro en ingreso para visualización ..... 45

Figura 15. Arquitectura del sistema ..... 46

Figura 16. Diseño esquemático del nodo maestro ..... 47

Figura 17. Diseño esquemático del nodo esclavo ..... 47

Figura 18. Diseño para baquelita ..... 48

Figura 19. Muestra para el diseño de los sensores ..... 48

Figura 20. Flujo grama del funcionamiento del sistema de monitore ..... 49

Figura 21. Base para sujetar el servomotor ..... 50

Figura 22. Caja y tapa para el servomotor ..... 50

Figura 23. Carrete y tapa ..... 51

Figura 24. Estructura principal para el acople de la placa de sensores ..... 51

Figura 25. Tapa superior con orificios para el ajuste a la estructura principal ..... 52

Figura 26. Estructura completa con su respectiva tapa ..... 52

Figura 27. Circuito nodo 1 ..... 53

Figura 28. Circuito montado en el prototipo ..... 54

Figura 29. Circuito nodo dos ..... 55

Figura 30. Segundo circuito montado del prototipo. ..... 55

Figura 31. Carcasa y conexión del nodo 3 ..... 56

Figura 32. Hélices de 12plg ..... 60

Figura 33. Potencia requerida en vuelo estacionario en función de la altitud. ..... 61

Figura 34. Potencia necesaria para vuelo estacionario en relación con la tracción. .. 61

Figura 35. Potencia necesaria en vuelo ascendente en relación con la velocidad de ascenso. ..... 63

Figura 36. Cambios en la velocidad inducida durante el descenso vertical. ..... 64

Figura 37. Potencia necesaria en vuelo descendente axial en relación con la velocidad de descenso. ..... 65

Figura 38. Relación entre la velocidad de avance y la tracción ..... 66

Figura 39.Determinacion de los porcentajes ..... 67

Figura 40. Peso del sistema 1 Nodo 1 ..... 68

Figura 41. Peso del sistema 2 Nodo 2 ..... 68

Figura 42. Sujeción de caja con agujeros simétricos ..... 69

Figura 43. Acoplamiento del sistema al Dron ..... 69

Figura 44. Sistema total unificado ..... 70

Figura 45 Equipos PCE-PQC 13EU y DELTAOHM HD37AB134 ..... 72

Figura 46. Configuración inicial para medir PM10 y PM2.5 ..... 73

Figura 47. Selección de canal a usar y medición ..... 73

Figura 48.Transferencia de datos hacia el computador ..... 73

Figura 49. Diagrama de flujo de programación del sensor SDS011 ..... 74

Figura 50. Comparación de datos medidos de PPM ..... 75

Figura 51. Pantalla inicial del equipo ..... 76

Figura 52. Acoplamiento de la sonda y puesta en marcha del equipo ..... 76

Figura 53. Diagrama de flujo de programación del sensor MQ135 ..... 77

Figura 54. Comparación de los datos medidos CO2 ..... 78

Figura 55. Esquema general del servidor web ..... 81

Figura 56: Máquina virtual creada en Aws Cloud ..... 82

Figura 57. Instalación de PHP ..... 82

Figura 58. Estado funcional del servicio MySQL ..... 83

Figura 59. Instalación de Php MyAdmin ..... 83

Figura 60. Estado del bróker mosquitto ..... 84

Figura 61. Prueba de funcionamiento de Node-Red ..... 84

Figura 62. Creación de la base y de las tablas ..... 85

Figura 63. Grafica de la estructura ..... 85

Figura 64.Tabla de vuelos ..... 85

Figura 65.Tabla sensores ..... 86

Figura 66. Estructura general del bloque 1 ..... 86

Figura 67. Programación de Fuction para el envío de datos hacia MySQL ..... 86

Figura 68.Conexión a la base de datos dron ..... 87

Figura 69.Esquema general del bloque 2 ..... 87

Figura 70. Recepción desde nodo esclavo y publicación de datos mediante mqtt, visualización en la página Html ..... 88

Figura 71.Historial y graficas de los sensores ..... 88

Figura 72. Zonas céntricas de la ciudad de Ambato ..... 90

Figura 73. Delimitación de la parroquia Huachi ..... 91

Figura 74. Ingreso de datos para vuelo ..... 91

Figura 75: Inicio del vuelo ..... 92

Figura 76: Dron acoplado y ascendiendo ..... 93

Figura 77: Descenso del sistema de monitore para recolección de datos ..... 93

Figura 78. Ascenso del sistema y acoplamiento al Dron ..... 94

Figura 79. Estabilización del dron con el sistema de monitoreo para el aterrizaje ..... 94

Figura 80.Variación del sensor Mq-8 ..... 95

Figura 81. Variación del sensor Mq-7 ..... 95

Figura 82. Variación del sensor Sds2,5 ..... 95

Figura 83.Variación del sensor Sds10 ..... 95

Figura 84.Historial de los datos ..... 96

Figura 85. Historial Atocha – Ficoa ..... 97

Figura 86.Historial la Merced ..... 99

Figura 87.Historial de La Matriz ..... 100

Figura 88. Historial de Huachi Chico ..... 102

Figura 91. Función de autocorrelación para $NO_2$ ..... 116

Figura 92. Función de autocorrelación para NO ..... 117

Figura 93. Función de autocorrelación para $SO_2$ ..... 118

Figura 94. Función de autocorrelación para CO ..... 119

Figura 95. Función de autocorrelación para $CO_2$ ..... 120

Figura 96. Función de autocorrelación para $O_3$ ..... 121

Figura 97. Función de autocorrelación Sds2.5 ..... 121

Figura 98. Función de autocorrelación Sds10 ..... 122

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A. Datasheet de los sensores ..... 115

Anexo B. Códigos en Arduino ..... 122

Anexo C. Códigos en Node red ..... 123

Anexo D. Códigos en HTML ..... 123

Anexo E. Diseños en 3D ..... 123

Anexo F. Diseños en Proteus ..... 123

Anexo G. Código de base de datos ..... 124

## RESUMEN EJECUTIVO

El monitoreo para la calidad de aire ambiente de la ciudad de Ambato es una necesidad ambiental actual y relevante que permite identificar la contaminación del aire. En este trabajo de titulación se propone un sistema de monitoreo de la calidad de aire ambiente, que combina el uso de drones y sensores, principalmente el SDS011 para medir partículas PM2.5 y PM10, proporcionando datos en tiempo real.

La metodología aplicada se basa en el uso de drones equipados con sensores los mismos que recolectan datos de múltiples ubicaciones y alturas. La transmisión de los datos se realiza mediante dos nodos esclavos y un nodo maestro basados en esp32 Lora permitiendo una comunicación confiable y eficiente. El sistema propuesto cuenta con un servidor en la nube lo cual facilita el almacenamiento y análisis de datos desde cualquier parte del mundo.

La investigación está enmarcada en el uso de tecnología de monitoreo remoto, por lo que es de gran relevancia la integración de drones y sensores en un mismo prototipo para la evaluación aérea de la calidad de aire, de tal manera que ofrece una cobertura amplia y detallada que supera las limitaciones de sistemas ya existentes, Además tiene un enfoque en la integración de los datos en tiempo real con sistemas que ayudan a que la publicación de los datos sea más rápida y exacta. La estructura que tiene permite una escalabilidad y adaptabilidad en diferentes entornos y otras necesidades ambientales que se encuentren en el aire.

El análisis de los datos se realiza usando el software Minitab, donde se identifican patrones y relaciones significativos en la contaminación del aire. Los mismos que ayudan a tomar decisiones anticipadas ante una posible contaminación del aire , con estos sucesos se da la toma de estrategias efectivas para mejorar la calidad del aire en Ambato.



**Palabras clave:** Calidad del aire, drones, sensores, tecnología Lora, monitoreo ambiental, sds011

## ABSTRACT

Monitoring the ambient air quality of the city of Ambato is a current and relevant environmental need that allows air pollution to be identified. In this degree work, an ambient air quality monitoring system is proposed, which combines the use of drones and sensors, mainly the SDS011 to measure PM2.5 and PM10 particles, providing data in real time.

The applied methodology is based on the use of drones equipped with sensors that collect data from multiple locations and heights. Data transmission is carried out through two slave nodes and one master node based on esp32 Lora, allowing reliable and efficient communication. The proposed system has a cloud server which facilitates the storage and analysis of data from anywhere in the world.

The research is framed in the use of remote monitoring technology, so the integration of drones and sensors in the same prototype for the aerial evaluation of air quality is of great relevance, in such a way that it offers broad and detailed coverage. that overcomes the limitations of existing systems. It also has a focus on integrating data in real time with systems that help make data publication faster and more accurate. The structure it has allows for scalability and adaptability in different environments and other environmental needs found in the air.

Data analysis is carried out using Minitab software, where significant patterns and relationships in air pollution are identified. The same ones that help to make early decisions in the face of possible air pollution, with these events, effective strategies are taken to improve air quality in Ambato.



**Keywords:** First letter of the first word in capital letters, the following words with lowercase, except for proper names that start with a capital letter.

# CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

## 1.1 Tema de investigación

SISTEMA DE MONITOREO PARA LA CALIDAD DE AIRE AMBIENTE DE LA CIUDAD DE AMBATO UTILIZANDO DRONES.

### 1.1.1 Planteamiento del problema

A nivel mundial, la crisis de la calidad del aire ha alcanzado proporciones alarmantes. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), en 2016, 9 de cada 10 personas respiran aire contaminado, y la contaminación del aire ambiental fue responsable de aproximadamente 4.2 millones de muertes prematuras. Es así como para 2019, según los datos presentados por la Organización de Naciones Unidas (ONU), los gases de efecto invernadero se incrementaron a un ritmo acelerado de 1.5% anual. Datos presentados por el Word Air Quality Report, en 2020 indican que los niveles de contaminación de países del sur y del este de Asia son los más elevados. De la misma forma regiones como América Latina y el Caribe registraron una concentración de PM2.5, de gases contaminantes que superan los índices establecidos por la OMS [1]. Los altos índices de contaminación han hecho que el año 2023 sea uno de los más cálidos jamás registrados, con concentraciones de gases de efecto invernadero que no dejaban de aumentar. Los fenómenos meteorológicos extremos causaron muerte y devastación. Este problema no solo afecta la salud humana, sino que también contribuye significativamente al cambio climático [2]. La ausencia de un sistema de monitorización ambiental eficiente y en tiempo real dificulta la identificación precisa de áreas críticas, así como la aplicación de estrategias efectivas de gestión ambiental para abordar estos problemas a gran escala [3].

Según investigaciones recientes, las emisiones de gases contaminantes provenientes de diversas fuentes, como la industria y el transporte, han alcanzado niveles preocupantes en ciudades clave de la región. Ciudades como São Paulo, Lima y Buenos Aires enfrentan desafíos significativos, con niveles de contaminación del aire que superan regularmente los estándares internacionales [3].

En Ecuador, el contexto ecuatoriano, las ciudades enfrentan desafíos cruciales en cuanto a la calidad del aire. Datos del Ministerio del Ambiente revelan que el 98% de la población urbana en Ecuador está expuesta a niveles de contaminación que superan las recomendaciones de la OMS. El crecimiento económico y la urbanización acelerada han llevado a un aumento en las emisiones de contaminantes atmosféricos. En Ambato, específicamente, un estudio de la Universidad Técnica de Ambato identificó que las emisiones vehiculares y muchas de las actividades industriales son los factores primordiales y contaminantes atmosféricos en la zona. [4].

La Carrera de Ingeniería Química de la Universidad Central realizó un estudio sobre la calidad del aire en la ciudad de Ambato, trabajo mutuo al Municipio de Ambato. Este proyecto, financiado por Petroecuador, proporcionó una evaluación sectorizada utilizando el índice Oraqui. Sin embargo, la ausencia de un seguimiento constante por parte de las instituciones pertinentes en relación con las diversas emisiones contaminantes ha exacerbado el problema de la contaminación en Ambato [5]. Los datos presentados en el estudio revelan que la situación actual es crítica para los residentes. En los últimos cinco años, las concentraciones de partículas contaminantes han aumentado en un 15%, según estudios locales de calidad del aire. Este aumento tiene un impacto directo en la salud de la población, contribuyendo a un aumento del 25% en casos de enfermedades respiratorias, como el asma. En el presente estudio se propone abordar esta brecha investigativa al evaluar la viabilidad y eficacia de la monitorización de variables en el aire en la ciudad de Ambato mediante el uso de drones, además también identificar y analizar los principales problemas ambientales en las diferentes zonas de la ciudad de Ambato, evaluar la idoneidad de los drones como herramienta de recopilación de datos y proponer recomendaciones concretas para mejorar la calidad ambiental en la ciudad [6].

### 1.2 Antecedentes investigativos

Para realizar este estudio se analizaron distintas fuentes de información a nivel nacional e internacional. Las investigaciones que abordan el tema propuesto son presentadas a continuación como parte de una revisión bibliográfica de antecedentes. La revisión de estos estudios anteriores no sólo proporcionó una referencia útil, sino

que también ofreció ideas importantes para mejorar y fundamentar la propuesta actual, entre los cuales destacan los siguientes:

En la investigación de Ronald Fernando Erazo Godoy, en 2018, titulada "Prototipo de un sistema de monitorización ambiental mediante una red de sensores 802.1.5.4 para el jardín botánico de Quito", el objetivo principal fue instalar una red de sensores (ARD 360, LDR) inalámbricos para proporcionar información a través de nodos sensores que envían sus datos de manera inalámbrica. Las variables analizadas incluyen temperatura, humedad y luminosidad. Para el estudio se implementó una plataforma para el tratamiento de estos datos para el control de los rangos mínimos y máximos para cada variable. Una vez procesados, existe la opción de generar alertas que se visualizarán en una aplicación y se enviarán por correo a las personas encargadas del prototipo. La configuración de la red se basa en una estación base y varios nodos de sensores, utilizando una arquitectura WSN. Es importante destacar que la investigación emplea una arquitectura estrella de manera que cada nodo sensor se comunicara directamente con la estación base minimizando los conflictos de comunicación y teniendo así un margen de error del 10% en la trasmisión de los datos por cada nodo [10].

La investigación realizada por Giovanny Calderón Aragón, Jennifer Paola Cubillos Rodríguez y Pilar Delgado-Niño, y publicada en la revista Research in Computing Science en 2019, se centró en el "Uso de drones para el levantamiento de información en estudios ambientales por consultoras ambientales". Su objetivo principal fue contribuir al cuidado del medio ambiente y explorar aplicaciones en topografía. Durante el estudio, se destacó el uso de sensores para medir emisiones de gases, analizar factores bióticos y abióticos en tiempo real. También se analizó la creciente tendencia del uso de drones en la industria. La tecnología que destaca es la incorporación de sensores láser, radar sonar, sondas atómicas y cámaras. La investigación incluyó la toma de muestras de agua y el levantamiento de mapas en 3D. Como conclusión, se determinó que los drones son herramientas valiosas en zonas de difícil acceso, sustituyendo la intervención humana ya que disminuyen el tiempo de respuesta en la toma de datos en un 75% del tiempo habitual, además reduce los costos operativos en un 30% y aumentó la eficiencia en un 25% en comparación con métodos tradicionales. [7].

La investigación realizada por Estefany Alejandra López Guaigua y Rosa Valeria Tonato Jarrin, en la Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito en 2019, presenta un estudio que se enfocó en la "Evaluación de impacto ambiental y plan de manejo ambiental en la cantera estancia 1 - cantón Mejía". Para esta investigación se usaron drones para calcular el volumen de producción de material pétreo, destacando su eficacia práctica como herramienta esencial. El objetivo principal fue demostrar la utilidad de los drones para obtener resultados precisos. Se empleó la aplicación Pix4D junto con los drones para calcular el material pétreo, identificando impactos generados durante las actividades en canteras. Estos datos se utilizaron para crear matrices de impacto y valoraciones ambientales, fundamentando la elaboración de planes para mitigar aspectos negativos en el medio ambiente. En el proceso operativo, el dron sobrevuela el perímetro trazado, toma fotografías y recolecta datos tipo nube de puntos y mallas. Como resultado al procesar los datos mediante el software Pix4D se evidencia una base sólida basada en las imágenes características para estudios posteriores en la industria minera. Otro resultado es la eficiencia en el procesamiento de datos que se tradujo en un aumento del 25% en la productividad del análisis, lo que subraya la contribución significativa de los drones en este proceso.

En el trabajo realizado por Carlos Eduardo Flores Gaona, en 2020, titulado "Diseño e implementación de un sistema de monitoreo en tiempo real de variables ambientales de áreas críticas del edificio SIS ECU-911 Loja", se destaca el uso de un protocolo industrial para el transporte confiable de datos. El sistema emplea un sensor de temperatura, humedad y luminosidad, cuyos datos son recibidos en una tarjeta Arduino y almacenados en una base de datos para análisis posterior en una interfaz web. El proceso de trabajo con los sensores incluyó la amplificación de señal, conversión mediante opto acoplador, filtrado y linealización del sensor. Un resultado evidente es la factibilidad del protocolo Modbus, con una arquitectura maestro-esclavo y una tasa de transmisión de 1200 bits a 256 kilobits. Este protocolo permite la comunicación eficiente en aplicaciones de monitoreo y control evidenciando así cada uno de los datos enviados con un retardo de 0.001 ms [11].

La investigación, realizada por Andrés Sebastián Villacis Lara en 2020, en la Escuela Politécnica Nacional, explora el tema "Desarrollo de un prototipo para la monitorización de parámetros ambientales utilizando un Raspberry Pi y un agente

multiprotocolo". El enfoque se centró en la monitorización de parámetros ambientales mediante una tarjeta programadora y un agente multiprotocolo. La captura de datos ambientales se llevó a cabo mediante sensores conectados a una tarjeta programadora llamada Arduino. Estos datos fueron transmitidos a la tarjeta programadora Raspberry Pi utilizando el protocolo Simple de Administración de Redes (SNMP). La Raspberry Pi almacenó los datos en formato de texto, generando un agente con el uso de una MIB, definiendo objetos accesibles mediante Protocolo Simple de Administración de Redes (SNMP) e Invocación Remota de Métodos (RMI). Para la visualización de datos, se creó una aplicación de escritorio en Java que se conecta a través del Invocación Remota de Métodos (RMI). Esta aplicación facilita la consulta de valores históricos en fechas específicas. Todos los datos se guardan en un servidor de datos, permitiendo consultas eficientes. En resumen, el artículo destaca el uso de drones en ingeniería civil que es beneficioso por su capacidad de obtener datos en tiempo real a bajo costo. La fotogrametría con drones asegura una alta precisión al recopilar datos clave para la evaluación ambiental, como el área de tierra vegetal, depósitos sobrantes, ocupación del suelo y, posiblemente, el volumen de deslizamiento de taludes y terraplenes. Estos datos son esenciales para la planificación óptima del monitoreo ambiental, contribuyendo a la reducción de riesgos en obras civiles. [12].

La investigación realizada por Ramos Santana Lisbeth Katherine en 2023, la Universidad Agraria del Ecuador, con el tema “Análisis de las emisiones contaminantes generadas por el transporte público urbano de la ciudad de Guayaquil”, se centra en el análisis de la concentración de contaminantes de Partículas en Suspensión PM, Dióxido de Carbono CO2, Óxidos de Nitrógeno NOX y Monóxido de Carbono CO que se encuentran en la emisión atmosférica. Se llevó a cabo un levantamiento de información geográfica mediante el seguimiento y monitoreo de autobuses seleccionados utilizando la herramienta GPSmap 62 de Garmin. Los datos recopilados se procesaron en el software Modelo Internacional de Emisiones Vehiculares (IVE), que permitió evaluar el estrés del transporte público en sus tres jornadas. El modelo generó la cuantificación de concentraciones en gramos por kilómetro para cada autobús seleccionado. Los resultados mostraron que las mayores emisiones se registraron en la jornada matutina, destacando el CO2 con 594,34 gr/km y las partículas en suspensión con 26,11 gr/km. Se identificaron también

concentraciones significativas de óxido de carbono (10,14 gr/km) y óxido de nitrógeno (11,04 gr/km). Estos hallazgos resaltan la necesidad de proponer medidas de mitigación para controlar y prevenir posibles impactos a largo plazo. [12]

Del análisis bibliográfico se puede determinar que muchas organizaciones tienen en el análisis parámetros ambientales en diferentes áreas. El analizar que los drones se han vuelto tan comunes en el uso doméstico e industrial además de ello se pueden acoplar a un sistema de monitorización en tiempo real que permita analizar los parámetros que influyen en la contaminación ambiental de diferentes zonas de la ciudad. Por lo que, la propuesta de la investigación es el acoplar un sistema de monitoreo de parámetros de contaminación ambiental mediante sensores especializados de tecnología TTL que permita medir la calidad del aire ambiente a una determinada distancia del suelo en diferentes sectores de la ciudad y enviar su información a una base de datos en tiempo real, mediante un sistema de comunicación inalámbrica para su posterior análisis.

## 1.3 Fundamentación teórica

### 1.3.1 Contaminación del medio Ambientes

La contaminación ambiental se refiere a la presencia o introducción de sustancias, agentes físicos o biológicos que tienen un impacto perjudicial en el entorno natural, afectando negativamente a las personas, la flora y la fauna y los ecosistemas en general. Es el resultado de las actividades humanas que liberan contaminantes en el aire, el agua o el suelo, alterando el equilibrio ambiental [13]**.**

#### *a. Contaminación atmosférica*

La contaminación del aire se produce cuando sustancias tóxicas, gases, partículas o compuestos químicos que se liberan al aire. Esto puede ser el resultado de emisiones industriales, quema de combustibles fósiles, uso de productos químicos, quema de desechos y actividad de transporte, entre otras cosas. La contaminación del aire puede dañar tanto los ecosistemas como la salud humana, contribuyendo al cambio climático y a la degradación de la calidad del aire .

Muchos factores juegan un papel en la contaminación atmosférica, los más relevantes se detallan en los siguientes párrafos:

- ***Emisiones industriales***

Los gases de efecto invernadero, los óxidos de azufre y nitrógeno, las partículas y los compuestos orgánicos volátiles son solo algunos de los contaminantes que las actividades industriales liberan al aire. La quema de combustibles fósiles, la manipulación de materiales y la generación de energía son algunos de los procesos que producen estos contaminantes [14]. Estas emisiones no sólo tienen un impacto en la calidad del aire, sino que también contribuyen al calentamiento global y pueden causar problemas de salud en las comunidades cercanas a las plantas industriales. Además, estos contaminantes pueden dañar la flora y fauna local y los ecosistemas cercanos.

- ***Emisiones vehiculares***

Los vehículos que funcionan con motores de combustión interna producen una variedad de contaminantes atmosféricos, incluidos dióxido de carbono (CO2), óxidos de nitrógeno (NOx), monóxido de carbono (CO) y partículas finas. Estas emisiones son un resultado directo de la quema de combustible dentro de los motores de los automóviles [15]. Estas sustancias liberadas al aire pueden contribuir a la contaminación atmosférica, teniendo un impacto negativo en la calidad del aire y la salud de las personas. Además, las emisiones vehiculares también contribuyen al cambio climático, ya que el CO2 es un importante gas de efecto invernadero que atrapa el calor en la atmósfera.

- ***Generación energética***

El uso de carbón, petróleo y gas natural como fuentes de energía para la producción de electricidad, calefacción y actividades industriales liberan grandes cantidades de dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno, azufre y otros contaminantes en el aire [16]. Estas emisiones contribuyen significativamente a la contaminación atmosférica, lo que puede afectar negativamente la salud humana y el medio ambiente. Además, el azufre puede reaccionar con otros elementos para formar lluvia ácida, que daña los ecosistemas acuáticos y terrestres.

- ***Actividades agrícolas***

Las actividades agrícolas, como la quema de desechos de cultivos, el uso de fertilizantes ricos en nitrógeno y la cría intensiva de animales, pueden liberar amoníaco y óxido nitroso al aire, lo que contribuye a la contaminación atmosférica [17]. Además, el óxido nitroso es un potente gas de efecto invernadero que juega un papel importante en el cambio climático, mientras que el amoníaco puede provocar desequilibrios en los suelos y el agua, afectando la biodiversidad local.

- ***Uso de productos químicos***

El empleo de productos químicos, como disolventes, pesticidas y productos de limpieza, puede liberar compuestos orgánicos volátiles al aire, contribuyendo a la formación de smog y otros problemas relacionados con la calidad del aire [18]. Estas sustancias pueden reaccionar con otros contaminantes en la atmósfera, formando niebla tóxica que perjudica la salud respiratoria de las personas. Además, la exposición a altos niveles de compuestos orgánicos volátiles puede provocar irritación en los ojos, la piel y el sistema respiratorio, así como contribuir a la contaminación del agua y el suelo si se dispersan o escurren en el entorno natural [19, 20, 21, 22].

- ***Gases***

Estas son sustancias en forma de gas o vapor que se encuentran presentes a temperatura y presión normales. Tienen la capacidad de difundirse en el aire y pueden transformarse en otros estados físicos si hay variaciones en la presión o la temperatura. [20]. Estos contaminantes pueden ser inhalados, absorbidos a través de la piel o ingeridos, y tienen el potencial de causar efectos adversos en la salud humana. Entre los ejemplos de contaminantes gaseosos se incluyen gases tóxicos, vapores químicos y gases de efecto invernadero, los cuales pueden desencadenar problemas respiratorios, afectar al sistema nervioso e incluso contribuir al calentamiento global si son liberados en grandes cantidades [21].

- ***Aerosoles***

Los aerosoles son partículas sólidas o líquidas que se mantienen suspendidas en el aire. A diferencia de los gases, estas partículas no se dispersan completamente en el aire,

sino que flotan en él. Los aerosoles se dividen en diferentes categorías según su composición, como polvo, humo y rocío, y su origen puede variar, ya sea de la combustión de materiales, la evaporación de líquidos o la atomización de un líquido que se desintegra.

### 1.3.2 Principales químicos contaminantes

- ***Gases de efecto invernadero***

Los gases como el dióxido de carbono (CO2), el metano (CH4) y el óxido nitroso (N2O) se emiten principalmente a través de la quema de combustibles fósiles, la deforestación y otras prácticas industriales y agrícolas. Estos gases tienen la capacidad de retener el calor en la atmósfera, lo que provoca un aumento en las temperaturas globales y contribuye al cambio climático [22]. Además de estas fuentes, la degradación de residuos orgánicos y la ganadería intensiva también liberan metano en cantidades significativas. Estos gases de efecto invernadero no solo afectan el clima, sino que también pueden alterar los patrones de lluvia, los ecosistemas y la salud de las personas, generando impactos de largo alcance en todo el mundo [23].

- ***Óxidos de azufre y nitrógeno***

Los óxidos de azufre (SOx) y los óxidos de nitrógeno (NOx) se generan principalmente durante la combustión de combustibles fósiles en industrias, plantas de energía y vehículos [24]. Estos gases pueden provocar la formación de lluvia ácida, que puede perjudicar los ecosistemas, incluyendo la vegetación y los cuerpos de agua, así como dañar infraestructuras como edificios y monumentos [25]. Además, la lluvia ácida puede alterar el pH del suelo y del agua, afectando negativamente a la vida acuática y a las plantas, y puede tener efectos adversos sobre la salud humana al contaminar fuentes de agua potable.

- ***Compuestos orgánicos volátiles***

Los compuestos orgánicos volátiles (COV) son sustancias químicas que se volatilizan con facilidad a temperatura ambiente. Estos se emiten a través de procesos industriales, la quema de combustibles fósiles, y de productos de uso diario como pinturas,

disolventes. Los COV pueden contribuir a la formación de smog, lo que afecta la calidad del aire en las ciudades, y pueden tener un impacto negativo en la salud humana. Además de causar irritación en ojos, nariz y garganta, la exposición prolongada a altos niveles de COV puede llevar a problemas respiratorios, enfermedades crónicas e incluso cáncer en algunos casos [26].

- ***Partículas en suspensión***

Las partículas finas (PM2.5) y las partículas en suspensión más grandes (PM10) provienen de diversas fuentes, como la quema de combustibles fósiles, incendios forestales, trabajos de construcción y procesos industriales. Estas partículas pueden provocar problemas respiratorios, especialmente en personas con afecciones pulmonares preexistentes, y también pueden reducir la visibilidad, lo que puede generar problemas de seguridad en las vías de transporte. Además, estas partículas contribuyen a la contaminación del aire, afectando negativamente la calidad de vida y la salud [27]. Las PM2.5, debido a su pequeño tamaño, pueden penetrar más profundamente en los pulmones e incluso ingresar al torrente sanguíneo, aumentando el riesgo de enfermedades cardiovasculares. Por otro lado, las PM10 pueden depositarse en las vías respiratorias superiores y causar irritación.

- ***Productos químicos tóxicos***

La emisión de sustancias químicas tóxicas, como metales pesados (como el plomo, el mercurio y el arsénico), compuestos orgánicos persistentes (COP) y otros contaminantes industriales, pueden tener consecuencias muy negativas para la salud de las personas y los ecosistemas. Estas sustancias pueden provenir de actividades industriales, vertederos, productos electrónicos y desechos peligrosos [28]. Su presencia en el medio ambiente puede causar problemas de salud, como enfermedades neurológicas, renales y cardiovasculares.

***a. Causa de la contaminación atmosférica***

- ***Pesticidas en la agricultura y ganadería***

Los pesticidas se aplican para controlar plagas y enfermedades en cultivos y animales de granja. Estos productos químicos pueden incluir antibióticos, hormonas y otros

compuestos sintéticos que, cuando no se manejan adecuadamente, pueden contaminar el suelo, el agua y el aire [29]. Además, el uso excesivo de pesticidas puede llevar a la resistencia de las plagas, lo que obliga a utilizar productos más potentes y tóxicos.

- ***Dioxinas***

Las dioxinas son sustancias químicas que se generan principalmente como subproductos de procesos industriales que involucran la combustión de materiales con cloro. Sin embargo, también se pueden producir naturalmente por ciertas actividades biológicas, como las que realizan algunos tipos de moho. Estas sustancias son extremadamente tóxicas y pueden persistir en el medio ambiente durante largos periodos, acumulándose en la cadena alimentaria [30].

- ***Emisiones de los vehículos***

Los vehículos de motor emiten una variedad de contaminantes, incluidos dióxido de carbono (CO2), óxidos de nitrógeno (NOx), monóxido de carbono (CO) y compuestos orgánicos volátiles (COV)[31].

- ***Basura***

La basura doméstica e industrial a menudo contiene productos químicos y materiales tóxicos que, si no se gestionan adecuadamente, pueden filtrarse al suelo y al agua, provocando contaminación ambiental [32]. Además, la quema de residuos puede liberar toxinas y gases peligrosos al aire, mientras que el vertido incontrolado de desechos puede afectar la biodiversidad y la calidad de vida de las comunidades cercanas.

### *b. Consecuencias de la contaminación atmosférica*

- ***Problemas respiratorios y cutáneos***

La exposición a largo plazo a contaminantes químicos puede desencadenar problemas respiratorios como asma y bronquitis, así como afecciones cutáneas como dermatitis. Estas enfermedades afectan tanto a humanos como a animales, comprometiendo su salud y bienestar [33]. Además, las personas con condiciones preexistentes pueden ver agravados sus síntomas debido a la exposición continua a los contaminantes.

- ***Índices altos de Mortalidad***

Los altos niveles de toxicidad en el entorno pueden causar la muerte en gran escala de plantas, animales y peces, lo que afecta negativamente la biodiversidad y los ecosistemas [34]. Este desequilibrio puede alterar las cadenas alimenticias y tener efectos a largo plazo en los ecosistemas.

- ***Lluvia ácida***

Los gases contaminantes como el dióxido de azufre y los óxidos de nitrógeno pueden combinarse con el vapor de agua en la atmósfera para formar ácidos que caen como lluvia ácida. Esta lluvia puede perjudicar suelos, cuerpos de agua y ecosistemas, además de dañar cultivos y vegetación. También puede deteriorar infraestructuras, edificios y monumentos, y afectar negativamente a la salud humana al contaminar el agua y los alimentos [35].

### 1.3.3 Rangos de los compuestos químicos

En Ecuador, la calidad del aire está regulada bajo el acuerdo N°97/A, que se establece en la norma de calidad del aire ambiente o nivel de inmisión. Este marco normativo, vigente desde mayo de 2015, es fundamental para monitorear y controlar la calidad del aire en relación con los compuestos químicos presentes en la atmósfera [36]. Establece estándares y límites aceptables para la concentración de diversos contaminantes químicos en el aire, con el objetivo de mantener un ambiente saludable y sostenible que proteja la salud pública y el entorno natural **[**37**]**.

El acuerdo proporciona directrices específicas para medir y evaluar de manera continua los factores químicos con el fin de asegurar que la calidad del aire se mantenga dentro de límites seguros y compatibles con el bienestar de la comunidad y el medio ambiente. La normativa abarca varios aspectos de la contaminación atmosférica, incluyendo límites precisos para partículas en suspensión (PM10 y PM2.5) tanto en el límite diario como en el anual [38].

Para los gases contaminantes, como dióxido de azufre (SO2), dióxido de nitrógeno (NO2), monóxido de carbono (CO) y ozono (O3), la regulación define valores límite

que varían según el contaminante y la duración de la exposición. Además, la normativa establece límites para compuestos orgánicos volátiles (COV), como el benceno, con un límite anual específico [39].

La regulación también se extiende al ozono troposférico, definiendo valores límite tanto para exposiciones horarias como para promedios de ocho horas. En conjunto, estas normas buscan proteger la salud de la población y preservar los ecosistemas locales, asegurando un entorno de vida seguro y de calidad [40].

El cumplimiento de estas regulaciones es crucial para proteger la salud pública y el medio ambiente, ya que establece un marco riguroso para controlar las concentraciones de contaminantes en el aire y fomentar prácticas sostenibles [40]. Al identificar los principales compuestos contaminantes mediante una revisión bibliográfica en la fundamentación teórica, se presentan los compuestos químicos de interés para el desarrollo del proyecto [41].

Es fundamental definir los niveles de exposición aceptables para cada compuesto químico, así como sus efectos potenciales en personas y plantas. La Tabla 1 muestra los valores mínimos y máximos de concentración de un compuesto químico que se consideran seguros para la salud humana y de las plantas. Los rangos peligrosos se refieren a los valores de concentración de un compuesto químico que pueden causar efectos adversos en la salud humana y de las plantas [42].

Estos límites son clave para garantizar un entorno seguro y sostenible, así como para orientar a las autoridades y a la industria en la implementación de medidas de control de calidad del aire. Establecer parámetros claros ayuda a prevenir impactos negativos en la salud y el medio ambiente, promoviendo así un desarrollo más equilibrado y responsable [43].

Tabla 1. Rangos y efectos de los compuestos químicos [5]

| Compuesto | Rangos | Efectos en humanos |
|---|---|---|
| Dióxido de nitrógeno ($NO_2$) | Rango mínimo: 0 ppb<br>Rango máximo: 30 ppb<br>Rango perjudicial: >100 ppb | • Irritación de las vías respiratorias<br>• Dificultad para respirar<br>• Tos<br>• Dolor de cabeza<br>• Náuseas<br>• Vómitos<br>• Daño al pulmón |

| Compuesto | Rangos | Efectos en humanos |
|---|---|---|
| Óxido nítrico (NO) | Rango mínimo: 0 ppb<br>Rango máximo: 10 ppb<br>Rango perjudicial: >35 ppb | • Irritación de las vías respiratorias<br>• Dificultad para respirar<br>• Tos<br>• Dolor de cabeza<br>• Náuseas<br>• Vómitos |
| Monóxido de carbono (CO) | Rango mínimo: 0 ppm<br>Rango máximo: 9 ppm<br>Rango perjudicial: >35 ppm | • Disminución de la capacidad de transporte de oxígeno de la sangre<br>• Dolor de cabeza<br>• Mareos<br>• Visión borrosa<br>• Pérdida del conocimiento<br>• Muerte |
| Dióxido de carbono ($CO_2$) | Rango mínimo: 0 ppm<br>Rango máximo: 400 ppm<br>Rango perjudicial: >1000 ppm | • Aumento de la frecuencia respiratoria<br>• Aumento de la frecuencia cardíaca<br>• Dolor de cabeza<br>• Náuseas<br>• Vómitos |
| Ozono troposférico ($O_3$) | Rango mínimo: 0 ppb<br>Rango máximo: 25 ppb<br>Rango perjudicial: >100 ppb | • Irritación de los ojos, la nariz y la garganta<br>• Reducción de la función pulmonar<br>• Daño al pulmón |
| PM10 | Rango mínimo: 0 ug/m3<br>Rango máximo: 50 ug/m3<br>Rango perjudicial: >150 ug/m3 | • Irritación de las vías respiratorias<br>• Dificultad para respirar, tos<br>• Aumento del riesgo de enfermedades respiratorias |
| PM2.5 | Rango mínimo: 0 ug/m3<br>Rango máximo: 25 ug/m3<br>Rango perjudicial: >57 ug/m3 | • Irritación de los ojos, nariz y garganta<br>• Tos, dificultad para respirar<br>• Aumento de enfermedades cardiovasculares |

En la Tabla 2, se proporciona un resumen más compacto de los datos detallados en la Tabla 1, ofreciendo una visión general de los rangos de diferentes compuestos químicos importantes para el monitoreo de la calidad del aire. Este formato más conciso facilita la comprensión de los niveles de concentración de cada compuesto, lo que permite una evaluación rápida y eficaz de los parámetros clave **[**43**]**.

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

| 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 |
| PM10 | 0 ug/m3 | 50 ug/m3 | 150 ug/m3 |
| PM2.5 | 0 ug/m3 | 25 ug/m3 | 75 ug/m3 |

### 1.3.4 Tecnología de comunicación inalámbrica

Las redes inalámbricas permiten la comunicación entre dispositivos utilizando ondas de radio, eliminando la necesidad de cables físicos. Estas redes facilitan la transferencia de datos y permiten la conexión entre dispositivos como laptops, computadoras de escritorio, teléfonos móviles, tabletas y otros equipos con capacidad de conectividad inalámbrica **[**44**]**.

Las tecnologías de comunicación inalámbrica de largo alcance han transformado la forma en que se interactúa con la tecnología, ofreciendo soluciones versátiles y eficientes en una variedad de contextos. Algunas de las tecnologías inalámbricas más notables incluyen Zigbee, Sigfox y Lora [45].

- ***Zigbee***

Esta tecnología está diseñada para interconectar dispositivos en redes de área personal y local. Es comúnmente utilizada en aplicaciones domésticas e industriales, especialmente para redes de sensores y control de dispositivos. Trabaja en la banda de 2.4 GHz bajo el estándar IEEE 802.15.4, y su énfasis en la eficiencia energética y en la comunicación de baja potencia la hace ideal para dispositivos con recursos energéticos limitados. Zigbee emplea una topología de malla, permitiendo que los dispositivos se comuniquen entre sí, lo que facilita la creación de redes robustas y la transmisión de datos de forma eficiente [45].

- ***Sigfox***

Esta es una tecnología de red de área amplia de baja potencia (LPWAN) diseñada para facilitar la comunicación de dispositivos IoT a larga distancia. Opera en una banda de frecuencia no licenciada y se destaca por su bajo consumo de energía y su capacidad de ofrecer una cobertura amplia. Sigfox es especialmente útil para aplicaciones que requieren comunicaciones esporádicas de pequeños volúmenes de datos, como sensores remotos o dispositivos de rastreo. Funciona a través de estaciones base que

transmiten y reciben mensajes de los dispositivos, permitiendo la conectividad global [45].

- ***Lora (Long Range)***

Lora es otra tecnología de red de área amplia de baja potencia que se caracteriza por su alcance extremadamente largo. Al igual que Sigfox, Lora es perfecta para dispositivos IoT que necesitan enviar datos a largas distancias. Utiliza modulación de espectro ensanchado para lograr comunicación de largo alcance con un bajo consumo de energía. Funciona en varias bandas de frecuencia, lo que le permite adaptarse a diferentes regiones y regulaciones. Lora es especialmente valiosa en entornos donde la conectividad celular es limitada o costosa, como en aplicaciones de agricultura inteligente o monitoreo ambiental [45].

### 1.3.5 Protocolos de mensajería ligera

- ***COAP (Constrained Application Protocol)***

COAP es un protocolo diseñado para dispositivos de bajos recursos, como sensores y actuadores en el ámbito del Internet de las Cosas (IoT). Funciona sobre UDP y se destaca por su eficiencia y ligereza, lo que lo hace ideal para redes de IoT con limitaciones de energía y capacidad de procesamiento [46].

- ***XMPP (Extensible Messaging and Presence Protocol)***

XMPP es conocido por su uso en aplicaciones de mensajería instantánea, pero también puede adaptarse para ser más liviano y se ha aplicado en entornos de IoT para facilitar la comunicación entre dispositivos [46].

- ***MQTT (Message Queuing Telemetry Transport)***

MQTT es un protocolo de mensajería ligero desarrollado especialmente para aplicaciones IoT y comunicaciones M2M (Machine To Machine). Se caracteriza por su eficiencia en el uso de ancho de banda y su estructura de publicación y suscripción, lo que permite una transmisión de datos rápida y efectiva [46].

### 1.3.6 Tipos de sensores de factores químicos en el aire

Los sensores de calidad del aire se han vuelto indispensables para monitorear y analizar la composición atmosférica de manera instantánea. Estos dispositivos innovadores están diseñados para medir diferentes parámetros ambientales y proporcionan una visión precisa de la calidad del aire que se respira. Combinando tecnología y funcionalidad, estos sensores brindan información detallada sobre la presencia de partículas, gases y otros contaminantes en el aire, lo que permite tomar decisiones informadas para proteger la salud pública y el medio ambiente **[**47**]**.

***a. Tipos de sensores de factores químicos en el aire***

- ***Sensores de dispersión de luz láser***

Utilizan un láser para detectar partículas en el aire. El láser ilumina las partículas, y un detector mide la cantidad de luz dispersada, lo que permite calcular la concentración de partículas en el aire, como PM2.5 y PM10 **[**48**]**.

- ***Sensores de fotoionización (PID)***

Los sensores de fotoionización miden compuestos orgánicos volátiles (COVs) en el aire. Funcionan utilizando una fuente de luz ultravioleta (UV) que ioniza las moléculas de los COVs. Luego, un detector mide la corriente generada por los iones, lo que permite determinar la concentración de COVs en el aire [48].

- ***Sensores de metal-óxido-semiconductor (MOS)***

Los sensores MOS detectan gases y vapores cambiando su resistencia en presencia de estos compuestos. Estos sensores son útiles para medir una variedad de gases como monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO2), amoníaco (NH3) y compuestos orgánicos volátiles (COVs) **[**48**]**.

- ***Sensores de fluorescencia***

Los sensores de fluorescencia se utilizan principalmente para medir el ozono (O3). Funcionan iluminando una muestra de aire con luz UV, lo que provoca que el ozono

emita luz fluorescente. La intensidad de esta luz se mide para determinar la concentración de ozono en el aire **[**48**]**.

- ***Sensores de conductividad térmica***

Estos sensores miden la conductividad térmica de un gas para determinar su concentración. Se usan comúnmente para medir gases como el hidrógeno y el helio [49].

- ***Sensores de interferencia infrarroja (NDIR)***

Los sensores NDIR (Non-Dispersive Infrared) son dispositivos especializados diseñados para medir la concentración de gases específicos en el aire. Estos sensores funcionan basándose en la absorción de radiación infrarroja por parte de ciertos gases, lo que los hace especialmente adecuados para medir gases de efecto invernadero y otros compuestos presentes en la atmósfera [50].

- ***Sensores Electroquímicos.*** Los sensores electroquímicos son dispositivos que emplean principios electroquímicos para detectar y cuantificar la concentración de diversos gases en el aire. Estos sensores son ampliamente utilizados para monitorear la calidad del aire y garantizar la seguridad, gracias a su sensibilidad a una variedad de gases tóxicos y peligrosos [51].

### 1.3.7 Sistemas electrónicos comerciales de monitoreo de la calidad del aire

En el mudo actual, la preocupación por los problemas ambientales ha resaltado la necesidad imperativa de mantener un seguimiento constante y exacto de la calidad del aire [45]. Este estudio se adentra en esta problemática, investigando de qué manera diferentes dispositivos electrónicos disponibles en el mercado se convierten en instrumentos esenciales para analizar y comprender los elementos químicos que afectan la atmósfera. En la Tabla 3 se proporciona un desglose detallado de las especificaciones de estos dispositivos [52].

Tabla 3. Sistemas electrónicos comerciales de monitoreo de la calidad del aire

| Sistema Electrónico | Marca/Modelo | Factores Químicos Medidos | Principales Características |
|---|---|---|---|
| Sensor Box Pro | Aeroqual | CO2, NO2, CO, Humedad, etc. | Sensor múltiple todo en uno, compacto y portátil |
| ChemSense | AirVisual (IQAir) | SO2, O3, NO, NH3, etc. | Array de sensores para múltiples compuestos |
| Air Quality Monitor | Teledyne AP | PM2.5, PM10, CO2, TVOC, etc. | Enfoque en la calidad del aire y partículas |
| Enviro+ | Pimoroni | CO2, NO2, SO2, Luz, Sonido | Diseñado para uso con Raspberry Pi |
| Aeroqual Series | MET One Instruments | O3, NO2, CO, SO2, etc. | Instrumentos robustos para monitoreo ambiental |
| Smart Citizen Kit | Thermo Fisher Scientific | CO, NO2, Humedad, etc. | Sistema de sensor ciudadano de código abierto |
| SensorBox Pro | Wi-Fi, Ethernet, USB | Plataforma basada en la nube | USB, Batería Recargable |
| ChemSense | Ethernet, RS485 | Software de escritorio, aplicación móvil | Fuente de Alimentación Externa |
| Air Quality Monitor | Wi-Fi, Bluetooth | Plataforma en línea | USB, Adaptador de Corriente |
| Enviro+ | I2C, GPIO | Scripts y bibliotecas Python | Raspberry Pi (conexión directa) |
| Aeroqual Series | RS485, Modbus, USB | Software de monitoreo en tiempo real | Fuente de Alimentación Externa |
| Smart Citizen Kit | Wi-Fi, Ethernet | Plataforma en línea | Adaptador de Corriente USB |

### 1.3.8 La evolución de la monitorización ambiental a través de la tecnología.

La creciente conciencia social sobre la calidad ambiental tanto en áreas abiertas como en interiores requiere medidas de prevención y control confiables. [14]Las tecnologías inalámbricas de monitorización son una herramienta valiosa para abordar este desafío.

La creciente atención hacia la calidad ambiental en espacios interiores y exteriores, impulsada por normativas y preocupaciones ciudadanas, destaca la necesidad de medidas efectivas. Las tecnologías inalámbricas de monitorización se presentan como herramientas valiosas para abordar este desafío [14].. [53]

La evaluación de las condiciones ambientales requiere la medición sistemática de variables, demandando tecnologías e infraestructuras de sensores para una

monitorización dinámica y continua. Cuatro herramientas esenciales facilitan el control integral de la calidad ambiental: sensores calibrados, tecnologías de comunicación inalámbrica, plataformas de software para gestión de datos y sistemas de seguimiento y control en dispositivos móviles [14][54].

La combinación de estas herramientas permite el control continuo de las condiciones ambientales en interiores y exteriores. En interiores, los sistemas inalámbricos posibilitan el monitoreo en tiempo real de indicadores como la presencia de contaminantes químicos, partículas en suspensión, confort termo higrométrico e iluminación. En entornos urbanos, la monitorización ambiental se vuelve esencial, especialmente en el contexto de ciudades inteligentes. La medición y transmisión inalámbrica de parámetros como la contaminación del aire, ruido, luminosidad, capacidad de contenedores de residuos, plazas de aparcamiento, calidad del agua y estado de playas se vuelve crucial para tomar decisiones informadas y abordar episodios críticos [14] [54].

Los sensores remotos son esenciales para la monitorización ambiental en la industria de la energía y el petróleo, ya que recopilan datos de manera eficiente y segura sin intervención directa [15][55]. Desde la detección de gases hasta la evaluación de la calidad del aire, proporcionan información detallada sobre las condiciones ambientales.

Los drones han transformado el monitoreo en áreas de difícil acceso al emplear cámaras de alta resolución y sensores especializados. Esto agiliza la inspección de instalaciones, la detección de posibles fugas y la evaluación del impacto ambiental, mejorando la seguridad y reduciendo costos operativos.

Los satélites ofrecen una perspectiva global del impacto ambiental en la industria energética y petrolera mediante la teledetección satelital. Esto posibilita la monitorización continua de grandes áreas, identificación de patrones y evaluación de cambios a lo largo del tiempo, siendo crucial para comprender el impacto a nivel regional y global [15][55]. El Internet de las Cosas (IoT) ha permitido la creación de redes de sensores interconectados que recopilan datos en tiempo real para monitorizar diversas condiciones ambientales. «Sensor Vital», una empresa líder en innovación destaca en este campo al ofrecer soluciones avanzadas que integran la última

tecnología IoT en el monitoreo ambiental. La empresa desempeña un papel clave en la promoción de prácticas sostenibles y la reducción del impacto ambiental en la industria [15] [55].

**Vehículos aéreos no tripulados VANTs**

Los Vehículos Aéreos No Tripulados conocidos por sus siglas en inglés como Unmanned Aerial Vehicles (UAV), son aeronaves con capacidad de vuelo autónomo, lo que significa que pueden volar sin la necesidad de un piloto humano a bordo. Estos pueden ser controlados de forma remota o volar de manera autónoma siguiendo un plan de vuelo previamente establecido mediante sistemas de control avanzados. La Figura 1 proporciona una referencia visual de un UAV de ala fija y sus partes. [56]

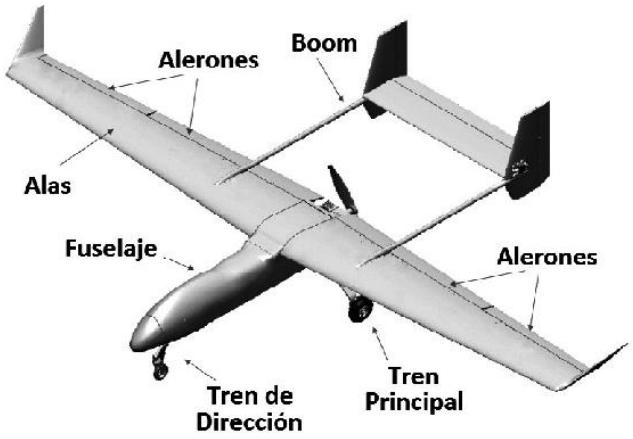



Figura 1. Partes de un UAV[56]

La autonomía de estos vehículos está directamente vinculada a su capacidad para enfrentar sucesos inesperados o aleatorios durante diversas misiones de vuelo. Inicialmente desarrollados con propósitos militares para aumentar la autonomía y evitar riesgos a los pilotos humanos, los UAV han demostrado ventajas como la ausencia de fatiga física y la reducción de peso al eliminar elementos de conducción humana. Además de su aplicación militar, los UAV también se utilizan en aplicaciones civiles, experimentando un crecimiento y popularidad notables, según sus diversos usos. Entre las aplicaciones a las que pueden destinarse se encuentran vigilancia aérea, búsqueda y rescate, inspección agrícola e industrial, fotografía aérea convencional, mapeo y modelados en 3D [57].

### 1.3.9 Categorías de Vehículos Aéreos No Tripulados (UAV) de Alas Rotatorias

***Tricópteros:*** Estos son modelos que cuentan con tres brazos y tres motores, con un motor asignado a cada brazo. Los dos motores frontales giran en direcciones opuestas para lograr un vuelo suave, mientras que el motor posterior generalmente contribuye a la estabilidad, como se puede observar en la Figura 2 [58]



Figura 2.Tricópteros [58]

***Cuadricópteros:*** Este tipo de UAV se caracteriza por contar con cuatro brazos y, como su nombre indica, cuatro motores. Son especialmente destacados por su popularidad y amplio uso en actividades recreativas, siendo, por lo tanto, uno de los tipos de UAV más comercializados [58]. Estos cuadricópteros se han ganado la preferencia de los usuarios debido a su versatilidad y fácil manejo, lo que ha contribuido significativamente a su elevada demanda en el mercado. En la Figura 3, se observa un cuadricóptero comercial.



Figura 3. Cuadricóptero [58]

***Hexacópteros:*** Estos UAV, denominados así por sus seis brazos, presentan la particularidad de contar con un motor para cada uno de estos brazos, Figura 4. Esta configuración proporciona una notable estabilidad durante el vuelo, convirtiéndolos en una elección preferida para actividades como la captura de fotografías o la grabación de vídeos desde altitudes elevadas [58]. Su capacidad para mantener una posición estable en el aire los hace ideales para aplicaciones que requieren imágenes nítidas y vídeos fluidos, consolidándose como una opción destacada en el ámbito de la fotografía y videografía aérea.



Figura 4. Hexacópteros[58]

***Octocópteros***: Este tipo de UAV, dispone de ocho brazos y motores respectivos, se destacan por ofrecer una estabilidad aún mayor en comparación con los modelos de seis brazos, Figura 5. No obstante, es importante tener en cuenta que el aumento en el número de brazos conlleva un incremento en la potencia total de los motores y en el peso de la aeronave. Esta característica puede hacer que los Octocópteros sean un tanto más desafiante de controlar, especialmente en espacios confinados [58]. A pesar de esta consideración, su robusta estabilidad los hace idóneos para aplicaciones que requieren un control preciso y una plataforma de vuelo fiable



Figura 5. Octocópteros[58]

### 1.3.10 Clasificación de los UAVs según su tipo de ala

Los UAVs se pueden clasificar en base al peso, tipos de construcción, autonomía y tipo de control. Sin embargo, una de las clasificaciones más usadas para definir a estas aeronaves es en base al tipo de ala como se presenta en la Tabla 4 [10] [59].

Tabla 4. Clasificación de los UAVs [10]

| Clasificación | Características Físicas | Características de operación |
|---|---|---|
| Ala fija | Requieren de pista para aterrizar | Larga resistencia |
| Ala rotatoria | Tipo helicóptero, Posibilidad de despegue y aterrizaje vertical | Alta maniobra |
| Alas mixtas | Modelo intermedio que incluye las mismas prestaciones que los anteriores en una única aeronave | Larga resistencia |

### 1.3.11 Uso de UAVS en la monitorización de diferentes aplicaciones

La utilización de los UAVs está experimentando un crecimiento significativo en la actualidad, impulsado por la eficacia que brindan al posibilitar la monitorización autónoma en ubicaciones y momentos específicos. Esta alternativa se destaca por su coste considerablemente inferior en comparación con los métodos convencionales. Además de su capacidad para acceder a zonas de difícil entrada, los UAVs ofrecen una recopilación de datos a una escala precisa, como se ilustra en la Figura 6, que muestra la monitorización en varias áreas cubiertas por el UAV [60].



Figura 6. Monitorización del UAV en diferentes áreas de aplicación [60].

Al examinar una zona afectada por desastres, UAVs representan una opción más segura y práctica para la obtención de datos, gracias a que poseen diversas capacidades. Entre estas, destacan su capacidad de despegue sencillo, ya que pueden ser lanzados "a mano" o mediante catapulta, y tienen la capacidad de aterrizar en áreas de terreno reducidas. Además, pueden despegar rápidamente en situaciones desafiantes, en contraste con las limitaciones de las aeronaves tripuladas [61]. La Figura 7 presenta la clasificación de los UAVs según parámetros de aplicación y logística específicos para un área determinada.

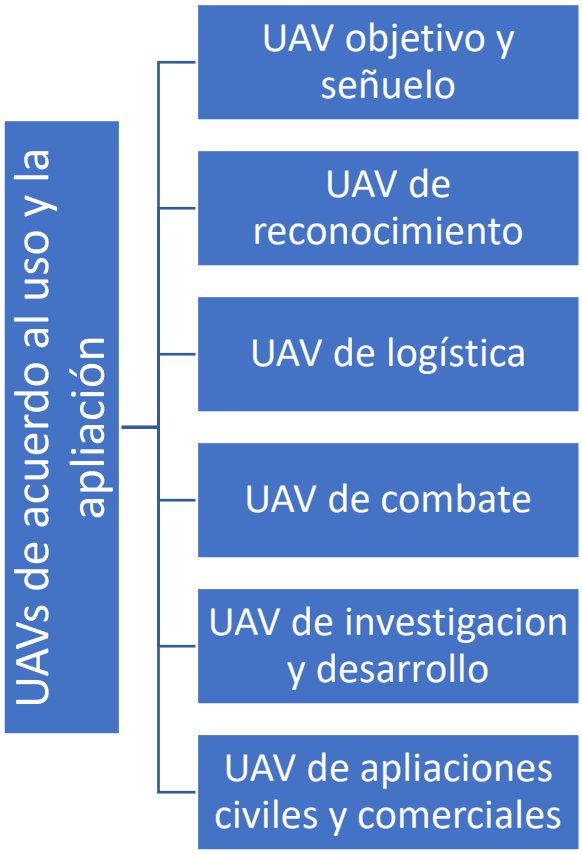



Figura 7. Clasificación de los UAVs de acuerdo con el uso y la aplicación [61]

### 1.3.12 Componentes principales de los UAVs

***Estructura o armazón:*** El marco, también conocido como armazón, constituye la estructura esencial de la plataforma que se pretende diseñar para el Vehículo Aéreo No Tripulado (UAV). Esta parte del UAV se adapta para albergar los sensores y otros componentes necesarios. La elección del material para la construcción del marco

puede variar según el modelo que se esté diseñando. En la Figura 8 se muestra una diversidad de materiales utilizados para la construcción del marco del UAV, siendo la fibra de carbono uno de los más comunes. [62]



Figura 8. Marco Hexacópteros[62]

La fibra de carbono destaca como material principal para el marco debido a sus propiedades fundamentales. El marco debe poseer una combinación única de robustez y flexibilidad para lograr una mayor resistencia a impactos y condiciones de viento adversas. Este diseño busca proporcionar al UAV la capacidad de enfrentar situaciones desafiantes con eficacia [62].

***Motores y hélices:*** Los elementos esenciales del Vehículo Aéreo No Tripulado (UAV) se centran en sus componentes clave, siendo el motor uno de los más fundamentales. Este componente desempeña un papel crucial al transformar algún tipo de energía eléctrica en energía mecánica, generando así una fuerza que impulsa el movimiento de las hélices. En el contexto de estas plataformas, se emplean motores conocidos como motores brushless. Una característica distintiva de estos motores radica en su tamaño reducido, lo que contribuye a disminuir el peso del UAV sin comprometer su potencia [62].

El motor brushless es esencial para el funcionamiento eficiente del UAV, ya que su capacidad para convertir energía y generar fuerza resulta vital para el desplazamiento y la operación general de la aeronave no tripulada. Esta tecnología permite que los UAV sean más ligeros y, al mismo tiempo, potentes, lo que favorece su capacidad de maniobra y rendimiento en diversas situaciones, en la Figura 9 se puede observar un modelo típico del motor [63].



Figura 9. Motor Brushless[63]

Las hélices constituyen un conjunto de aletas dispuestas en forma helicoidal que, al girar, generan una fuerza de reacción fundamental para propulsar la aeronave. Estas hélices pueden incorporar protecciones que no solo brindan mayor rigidez, sino que también extienden significativamente la vida útil de las hélices y, en última instancia, de todo el sistema. La inclusión de estas protecciones se traduce en la capacidad de amortiguar impactos diversos, contribuyendo así a preservar la integridad de la plataforma ante posibles golpes o incidentes. Un modelo convencional se puede observar en la Figura 10 [64].



Figura 10. Hélices de la aeronave [64]

La función primaria de las hélices va más allá de la simple generación de fuerza propulsora; también desempeñan un papel crucial en la estabilidad y eficiencia del UAV. La presencia de protecciones adicionales no solo aumenta la resistencia estructural, sino que también actúa como un mecanismo de absorción de impactos, protegiendo las hélices y, por ende, asegurando un rendimiento más duradero y fiable del sistema en su conjunto [65].

### 1.3.13 Controladora de Vuelo

La controladora de vuelo puede considerarse como el centro neural de un UAV, asumiendo la responsabilidad de gestionar la potencia asignada a cada rotor para lograr movimientos específicos o incluso mantener la estabilidad. Este proceso se lleva a cabo mediante la implementación de modelos matemáticos que abarcan diversos tipos de UAVs [66].

El propósito principal de este componente es proporcionar la capacidad de realizar vuelos estáticos y seguir rutas definidas por GPS, lo que excluye muchas controladoras que no pueden recibir la información ambiental necesaria para el vuelo estático. Un ejemplo de esto son las controladoras utilizadas en UAVs de carrera, ya que dependen únicamente del acelerómetro y giroscopio de la controladora para estabilizarse [67].

## 1.4 Objetivos

### 1.4.1 Objetivo general

Desarrollar un sistema de monitoreo de calidad de aire ambiente de la ciudad de Ambato utilizando Drones.

### 1.4.2 Objetivos específicos

- Determinar los parámetros y la tecnología usada para determinar la calidad del aire ambiente.
- Diseñar un sistema de sensores acoplados a un Dron, que permitan realizar el monitoreo de calidad del aire ambiente en diferentes zonas de la ciudad de Ambato.
- Implementar el sistema de monitoreo de calidad del aire ambiente usando Drones en la ciudad de Ambato.

# 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. Del análisis de las diferentes tecnologías y dispositivos comerciales existentes se ha determinado los más idóneos para la implementación del prototipo. Los elementos seleccionados son: ESP32 Lora, servomotor y AWS Cloud, así como una variedad de sensores de gas como MQ-4, MQ-7, MQ-8, MQ-9, MQ-4 MG-811 y SDS011. El análisis y la selección de cada uno de las tecnologías y equipos se presenta con mayor detalle en el Capítulo III. En la Tabla 5 se detallan las distintas propiedades, aplicaciones y usos de estos materiales.

Tabla 5. 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. |
| 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-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 ($H_2S$), 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. |
| SDS011 | Sensor de partículas con tecnología láser para medir PM2.5 y PM10. | Monitoreo de calidad del aire en interiores y exteriores, sistemas de control de aire en edificios, dispositivos portátiles de medición ambiental. | Evaluación de la contaminación en áreas urbanas, monitoreo de la calidad del aire en hogares y oficinas, detección de fuentes de contaminación, evaluación de la eficacia de filtración, proyectos de |

| Material | Características | Aplicaciones | Usos |
|---|---|---|---|
| | | | ciencia ciudadana y educación ambiental. |
| Servomotor Injora | Alta precisión, engranajes metálicos para mayor durabilidad, torque elevado, respuesta rápida, fácil integración con microcontroladores, resistencia a vibraciones | Robótica, modelismo RC (coches, aviones, barcos), automatización industrial, proyectos de DIY y Maker, sistemas de automatización de puertas y ventanas, drones | Control de dirección en robots, control de acelerador en coches RC, movimiento de actuadores, control de válvulas, posicionamiento de antenas, control de gimbal |
| Hexacóptero | Estructura ligera y resistente, capacidad para cargar equipos adicionales, buena estabilidad, compatible con varios tipos de controladores de vuelo, plegable para fácil transporte | Fotografía y videografía aérea, monitoreo ambiental, inspección industrial, investigación científica, aplicaciones recreativas | Montaje de cámaras, transporte de sensores, monitoreo de condiciones ambientales, inspección de áreas inaccesibles, sistema de elevación de estación de monitoreo aéreo con servomotor |

## 2.2 Métodos

### 2.2.1 Modalidad de la investigación

La investigación adoptó un enfoque experimental para el desarrollo y validación de un sistema inalámbrico de monitoreo de factores químicos, orientado a evaluar la contaminación del aire en zona céntrica de Ambato. Este enfoque implicó el control de variables específicas, el uso de tecnología avanzada y la realización de pruebas sistemáticas para recopilar datos cuantitativos y evaluables.

La metodología experimental se centró en identificar los principales factores químicos presentes en el entorno de la ciudad mediante la revisión de la literatura pertinente y la selección de tecnologías de monitoreo adecuadas. Se diseñó un prototipo del sistema de monitoreo y se llevaron a cabo pruebas piloto en entornos controlados, lo que permitió la recopilación de datos precisos y la validación inicial del sistema.

Se realizó un análisis detallado de los datos recopilados para evaluar la eficiencia y confiabilidad del sistema. Los resultados de estas pruebas permitieron las mejoras y

ajustes continuos en el diseño y funcionamiento del sistema de monitoreo. En última instancia, el enfoque experimental no solo abordó de manera efectiva la problemática de la contaminación del aire, sino que también sentó las bases para futuras aplicaciones sostenibles y mejoras en la zona céntrica de la ciudad de Ambato.

### 2.2.2 Recolección de información

La recopilación de información para el desarrollo de un sistema inalámbrico de monitoreo de factores químicos en la zona céntrica de Ambato se llevó a cabo de manera cuidadosa y estructurada, siguiendo estas etapas:

***Revisión de Literatura:*** Se realizó una investigación exhaustiva de estudios y tecnologías relacionadas con sistemas de monitoreo inalámbrico de factores químicos en entornos urbanos.

***Establecimiento de Objetivos:*** Se fijaron metas claras y cuantificables para el desarrollo del sistema, con un enfoque en la medición continua y precisa de los factores químicos.

***Diseño del Sistema:*** Con base en los objetivos establecidos, se diseñó el sistema de monitoreo inalámbrico, incluyendo la elección de sensores específicos, la configuración de la arquitectura de comunicación inalámbrica (por ejemplo, Lora),el acople óptimo del sistema al dron y la planificación general del sistema.

***Construcción del Prototipo:*** Se desarrolló un prototipo del sistema para su implementación en la zona céntrica de Ambato. Esto incluyó la integración del Dron y sensores, la aplicación de la tecnología inalámbrica seleccionada y el diseño de una interfaz de usuario fácil de usar.

***Pruebas Piloto e Implementación:*** Se sobrevoló el prototipo en lugares estratégicos de la zona céntrica de Ambato y se llevaron a cabo pruebas piloto para evaluar la efectividad del sistema y recopilar datos de prueba.

***Análisis de Datos:*** Se examinaron los datos recopilados para identificar patrones de contaminación, puntos críticos y tendencias temporales. Los resultados se compararon con estándares de calidad del aire.

***Optimización y Mejora:*** A partir de los análisis y comentarios obtenidos durante las pruebas piloto, se realizaron mejoras para optimizar el rendimiento y la precisión del sistema.

***Evaluación del Impacto***: Se analizó el impacto del sistema en la concienciación ambiental de la comunidad y en las medidas adoptadas para abordar la contaminación del aire.

***Documentación****:* Se documentaron todos los aspectos del desarrollo, implementación y resultados del sistema.

### 2.2.3 Procesamiento y análisis de datos

Los datos recopilados sobre la calidad del aire se compararon con los estándares establecidos por organismos ambientales para medir la calidad del aire. Esta comparación permitió evaluar cómo se situaban los datos respecto a los niveles aceptables de calidad del aire y detectar posibles desviaciones que podrían indicar problemas ambientales significativos.

Durante el análisis, se aplicaron métodos estadísticos descriptivos como la media, la mediana, la desviación estándar y los rangos, lo que proporcionó una visión general de la distribución de los datos. También se utilizaron técnicas de análisis de series temporales para identificar patrones estacionales y variaciones a lo largo del tiempo, lo que permitió determinar las contribuciones individuales de diferentes fuentes de contaminación atmosférica.

Este enfoque estadístico facilitó la presentación de los resultados de forma clara y accesible a través de informes detallados, gráficos y visualizaciones interactivas. Esto tiene como finalidad ayudar a la comunidad, autoridades locales y otros interesados a comprender mejor los datos, fomentar la concienciación ambiental y apoyar la toma de decisiones informada para abordar el problema de la contaminación atmosférica en la zona céntrica de la ciudad de Ambato. Gracias a este enfoque integral, se promueve una mayor colaboración en la búsqueda de soluciones efectivas y sostenibles para mejorar la calidad del aire.

# CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

## 3.1 Requerimientos del sistema

En la ciudad de Ambato, se ha identificado la necesidad de implementar un sistema de monitoreo ambiental adaptado a sus características específicas, centrándose en la calidad del aire. La contaminación atmosférica es un desafío significativo en Ambato, y su impacto en la salud pública y el medio ambiente es una preocupación creciente para los habitantes. La identidad de la ciudad está marcada por su historia y su comunidad, pero también por la calidad del aire que respiran sus residentes. Por lo tanto, es crucial diseñar un sistema de monitoreo ambiental que aborde las particularidades de la contaminación atmosférica en Ambato y proporcione información precisa y oportuna sobre los niveles de contaminantes. En este contexto urbano, se requiere una solución efectiva y accesible que se integre armoniosamente en la vida cotidiana de los habitantes de Ambato, con el objetivo de mitigar los efectos adversos de la contaminación atmosférica y promover un entorno más saludable y sostenible. La Tabla 6 detalla las características geográficas específicas de Ambato, las cuales son fundamentales para el diseño y la implementación exitosa del sistema de monitoreo ambiental centrado en la calidad del aire **.**

Tabla 6. Características de la zona céntrica de Ambato

| Característica | Detalle |
|---|---|
| Ubicación Geográfica | La zona céntrica de Ambato se encuentra en la región montañosa central de Ecuador, en la provincia de Tungurahua. |
| Superficie Territorial | 9.7 Km2 constituyéndose en la parroquia más grande del cantón. |
| Altitud | 3016 metros sobre el nivel del mar |
| Temperatura Promedio | 12º C, importante para la producción agrícola de la localidad. |
| Población (Censo 2011- INEC) | Total: 22.500 habitantes<br>Hombres: 11.025<br>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 salud y el bienestar de las personas, los animales y las plantas son gravemente afectados por la contaminación del aire, que es muy común en las zonas urbanas e industriales.

Impacto humano: La exposición a contaminantes como partículas finas y ozono puede causar problemas respiratorios y aumentar el riesgo de enfermedades como el asma y las afecciones cardiovasculares. Los niños son más susceptibles a estos contaminantes, lo que puede obstaculizar su desarrollo pulmonar y aumentar su probabilidad de contraer infecciones respiratorias. La contaminación del aire se asocia con problemas físicos y problemas de salud mental, como ansiedad y depresión

La variedad de compuestos químicos presentes en el aire juega un papel crucial en la vida diaria de los habitantes de la zona céntrica de Ambato, ya que estos afectan de forma directa o indirecta la calidad de vida de la población. Entre los factores químicos más destacados se encuentran los principales componentes de la atmósfera, como el CO2, NO2, NO, CO, SO2, O3, MP2.5 Y MP10. Estos elementos provienen de diferentes fuentes, desde la quema de combustibles fósiles hasta procesos biológicos y reacciones fotoquímicas atmosféricas, los cuales están detallados en la Tabla 7 y Tabla 8.

Más allá de sus orígenes, estos compuestos químicos tienen un impacto considerable en la salud de las personas y en el medio ambiente, contribuyendo a problemas graves como el cambio climático, la formación de smog y la lluvia ácida. Un análisis minucioso de estos factores ofrece una visión clara de la composición química del aire que respiramos, brindando información vital sobre cómo estos elementos afectan nuestra vida y la salud del planeta en su conjunto.

Tabla 7. Factores químicos seleccionados para el monitoreo

| **Factor Químico** | **Descripción** | **Fuentes Principales** | **Efectos en la salud y el medio ambiente** |
|---|---|---|---|
| MP10 (Partículas en suspensión de 10 micras) | Partículas sólidas o líquidas con un diámetro aerodinámico inferior a 10 micras. | Emisiones de vehículos, procesos industriales, quema de biomasa, polvo en suspensión, construcción y demolición. | Pueden penetrar en las vías respiratorias superiores y llegar a los pulmones, causando problemas respiratorios como asma y bronquitis. Contribuyen a la contaminación visual y afectan la calidad del aire, dañando la vegetación y la fauna. |

Tabla 8. Factores químicos

| Factor Químico | Descripción | Fuentes Principales | Efectos en la salud y el medio ambiente |
|---|---|---|---|
| MP2.5 (Partículas en suspensión de 2.5 micras) | Partículas finas con un diámetro aerodinámico inferior a 2.5 micras, que pueden permanecer suspendidas en el aire. | Emisiones de vehículos, procesos industriales, quema de combustibles fósiles y biomasa, incendios forestales, procesos de cocción. | Debido a su tamaño, pueden penetrar profundamente en los pulmones y entrar en el torrente sanguíneo, causando problemas respiratorios, cardiovasculares e incluso cáncer. También afectan la visibilidad y contribuyen al calentamiento global al absorber y dispersar la radiación solar. |
| $CO_2$ (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 NOx y compuestos orgánicos. | Irritación respiratoria, afecta la función pulmonar. Contribuye a la formación de smog troposférico. |

## 3.2 Esquema general del sistema

El funcionamiento del sistema de monitoreo de calidad de aire utilizando drones se describe en cuatro etapas, las cuales están representadas en la Figura 11. La primera etapa es la de adquisición, en la cual se recopilan los datos ambientales mediante los

drones, incluyendo mediciones de diferentes contaminantes y parámetros atmosféricos. En la segunda etapa, se lleva a cabo el procesamiento de los datos recopilados, donde se emplean algoritmos para analizar y determinar la calidad del aire en diversas áreas de la ciudad. En la tercera etapa de almacenamiento, se guardan los datos procesados y se generan registros históricos para su posterior análisis y seguimiento. Finalmente, en la etapa de visualización y monitoreo, se presenta la información recopilada y procesada de manera accesible para los usuarios, lo que incluye la visualización de mapas de calor de la contaminación atmosférica, la identificación de áreas críticas y la generación de alertas en tiempo real en caso de superarse ciertos umbrales de contaminación.

Características de las tecnologías de comunicación inalámbricas

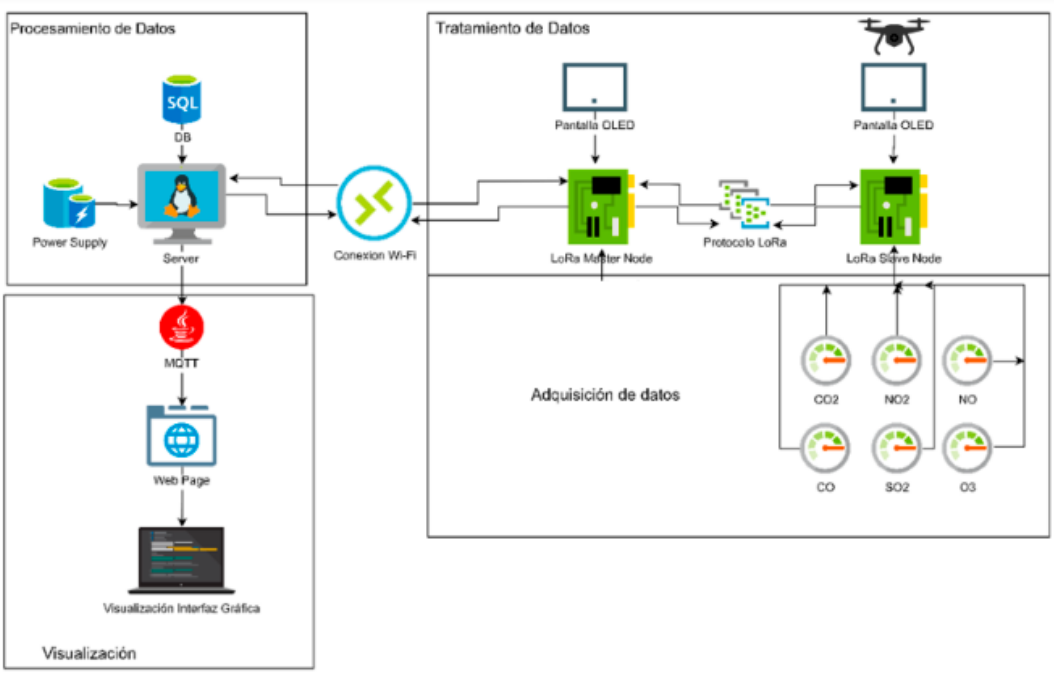



Figura 11. Esquema general del sistema a implementar

**Etapa 1:** El sistema de monitoreo para la calidad del aire en Ambato comienza con la adquisición en tiempo real de datos mediante drones equipados con sensores especializados para capturar información atmosférica. Estos drones están equipados con sensores específicos para medir diferentes contaminantes presentes en el aire. Además, se utilizan sistemas de posicionamiento global (GPS) para obtener la

ubicación precisa de donde se recopilan los datos. Todos estos datos adquiridos, son procesados en la siguiente etapa.

**Etapa 2:** En esta etapa, los datos recopilados por los drones son procesados mediante algoritmos especializados para analizar la calidad del aire. Una vez que se realizan las evaluaciones pertinentes, se determinan las acciones necesarias para abordar cualquier problema de contaminación identificado. Esta información es enviada a sistemas de control terrestres para realizar las acciones correctivas necesarias, como alertar a las autoridades ambientales o ajustar los parámetros de las fuentes de contaminación.

**Etapa 3:** Para garantizar la implementación efectiva del sistema y su aplicabilidad en el entorno urbano de Ambato, se establece una infraestructura de almacenamiento y procesamiento de datos en servidores locales. Esto permite almacenar y compartir los datos recopilados por los drones, así como los resultados de los análisis realizados en etapas anteriores.

**Etapa 4:** La interfaz de usuario de la aplicación presenta de manera clara y precisa los datos recopilados por los drones y los resultados de los análisis realizados. Esto incluye información sobre los niveles de contaminantes presentes en diferentes áreas de la ciudad. Además, la aplicación proporciona herramientas para el monitoreo en tiempo real de la calidad del aire y permite a los usuarios tomar medidas correctivas según sea necesario.

## 3.3 Diseño del prototipo

### 3.3.1 Selección de dispositivos

#### *a. Sensores*

La selección de los sensores cumple un papel fundamental. En la Tabla 9 se muestra una comparativa de los sensores comerciales utilizados para poder medir los factores que existen en la atmósfera: $CO_2$, $NO_2$, NO, CO, $SO_2$, MP10, PM2.5 y O3. Estos dispositivos son indispensables para supervisar el entorno, desde identificar emisiones de vehículos hasta controlar la calidad del aire en espacios interiores. La variedad de

tecnologías y rangos de medición resaltados en esta tabla ilustra lo complicado que es cuantificar y comprender la composición química del aire que inhalamos a diario.

Tabla 9. Características de sensores comerciales

| Factor Químico | Sensor | Precisión | Costo | Principales Aplicaciones |
|---|---|---|---|---|
| NO | MQ-135 | Media | Bajo | Monitoreo de emisiones industriales y calidad del aire. |
| | TGS2602 | Baja | Medio | Monitoreo de la calidad del aire en interiores como hogares, oficinas y comercios. |
| $NO_2$ | MQ-7 | Media | Bajo | Medición de emisiones vehiculares y calidad del aire urbano. |
| | TGS810 | Alta | Bajo | Se aplica en sistemas de alarma de gas en entornos residenciales y comerciales. |
| CO | MQ-4 | Media | Bajo | Detección de escapes vehiculares y monitoreo industrial. |
| | TGS820 | Media | Medio | Se aplica en sistemas de seguridad y monitoreo ambiental. |
| $CO_2$ | MQ-9 | Media | Bajo | Monitoreo de calidad del aire en interiores y ventilación. |
| | MH-Z14A | Alta | Medio | Se utiliza en sistemas de ventilación, control de calidad del aire y aplicaciones industriales. |
| $SO_2$ | MQ-8 | Media | Medio | Control de emisiones en procesos industriales. |
| $O_3$ | MQ-131 | Media | Medio | Encuentra aplicación en sistemas de control de emisiones, monitoreo ambiental y sistemas de seguridad. |
| | MG-811 | Media | Medio | Monitoreo de calidad del aire y detección de ozono troposférico. |
| PM2.5/PM10 | SDS011 | Alta | Alto | Monitoreo de calidad del aire en interiores y exteriores, investigaciones ambientales |
| | PMS5003 | Media | Medio | Monitoreo de calidad del aire en interiores, dispositivos portátiles, sistemas de ventilación |

En base al análisis presentado en la Tabla 9 se seleccionaron los sensores MQ-4, MQ-7, MQ-8, MQ-9, MQ-4, SDS011 y MG-811 debido a su capacidad para detectar gases específicos gracias a su tecnología de semiconductores. A pesar de tener una precisión y un alcance operativo limitados, son notablemente asequibles y requieren poco mantenimiento. Además, estos sensores son fácilmente accesibles en el mercado local y su adquisición es sencilla.

### *b. Microcontrolador*

La Tabla 10 ofrece una recopilación de las características de diversos microcontroladores que integran el protocolo de comunicación Lora. Estos dispositivos son fundamentales en la creación de sistemas de monitoreo que requieren alcance extendido y consumo de energía reducido. Los detalles incluidos en la tabla abarcan diversos aspectos, como la frecuencia de funcionamiento, la capacidad de procesamiento, la eficiencia energética y otras especificaciones relevantes. Esta información resulta invaluable para facilitar la selección y el diseño de soluciones robustas de comunicación inalámbrica Lora.

Tabla 10: Características de los microcontroladores con tecnología Lora

| **Característica** | **ESP32-S2** | **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 |

En base al análisis realizado se determinó que la ESP32 TTGO Lora es el microcontrolador más adecuado, debido a su habilidad para comunicarse de manera inalámbrica a largas distancias, lo cual es crucial para establecer una red de sensores eficaz en áreas extensas. Su diseño compacto y su eficiencia en el consumo de energía la convierten en una opción ideal para aplicaciones que requieren un bajo consumo, asegurando una operación constante en proyectos de redes de sensores IoT .

### *c. Servo motor*

El motor MG995 es ampliamente utilizado en una variedad de aplicaciones debido a su torque moderado de 11 KG / cm, su amplio rango de voltaje de operación de 4.8 a 6 V, su costo asequible de alrededor de $15, y su capacidad para girar 360 grados, lo que lo hace adecuado para proyectos que requieren un actuador confiable y rentable, como la manipulación de brazos robóticos, la dirección en vehículos RC o la apertura de puertas automáticas, la Tabla 11 muestra una comparativa de los sensores.

Tabla 11: Tabla comparativa de servomotores

| Características técnicas | TD-8120MG | MG995 | MG996R |
|---|---|---|---|
| **Tipo de engranajes** | Metal | Metal | Metal |
| **Fabricante** | Tiankongrc | Tower Pro | Tower Pro |
| **Dimensiones** | 40,7 × 19,7 × 42,9 mm | 40,7 × 19,7 × 42,9 mm | 40,6 × 19,8 × 42,9 mm |
| **Voltaje de operación** | 4,8 a 7,2 V | 4,8 a 6 V | 4,8 a 6 V |
| **Ángulo rotacional** | 180 | 360 | 180 |
| **Velocidad de operación** | 0.18sec / 60 degree (4.8v) | 0.20sec / 60 degree (4.8v) | 0.2sec / 60 degree (4.8v) |
| Torque | 20 KG / cm | 11 KG / cm | 13 KG / cm |
| Costo | $20 | $15 | $12 |

### 3.3.2 Selección de tecnologías

#### *a. Tecnología inalámbrica*

Basándonos en la comparativa presentada en la Tabla 12, se ha decidido que la comunicación inalámbrica del sistema se realizará mediante tecnología Wi-Fi, ya que ofrece una mayor velocidad de transmisión, permite la comunicación simultánea entre dispositivos y ofrece un alcance superior. Esto permite una comunicación rápida entre sus componentes y una actualización de información más eficiente.

Tabla 12: Tabla comparativa de tecnologías inalámbricas

| Características técnicas | Wi-Fi | Bluetooth |
|---|---|---|
| **Estándar** | IEEE802.11 a/b/g | IEEE802.15.1 |
| **Velocidad de transmisión** | hasta 1 Gbps | hasta 2,1 Mbps |
| **Frecuencia** | 2,4 GHz, 5 GHz | 2,4 GHz |
| **Comunicación** | Multipunto | Punto a punto |
| **Ancho de banda** | 22 MHz | 1 MHz |
| **Alcance** | 150 pies | 30 pies |
| **Costo** | Medio | Alto |

#### *b. Base de datos*

La Tabla 13 presenta una comparación entre los sistemas gestores de bases de datos. Se optó por utilizar MySQL en lugar de MariaDB y PostgreSQL debido a que la misma es una base de datos ligera adecuada para manejar grandes volúmenes de datos e ideal para proyectos de tamaño pequeño y mediano, y la existencia de una comunidad sólida de usuarios que proporciona documentación y asistencia a través de foros. Además,

MySQL ha demostrado de manera constante su eficiencia y confiabilidad en términos de rendimiento, aspectos fundamentales para cumplir con los requisitos del proyecto.

Tabla 13: Tabla comparativa de sistemas gestores de bases de datos

| **Características técnicas** | **MySQL** | **MariaDB** | **PostgreSQL** |
|---|---|---|---|
| **Tipo** | RDBMS | RDBMS | RDBMS |
| **Facilidad de uso** | Sencillo | Sencillo | Complejo |
| **Sistemas Operativos** | Canonical, Windows, FreeBSD, Solaris, Linux y MacOS | Windows, Linux y MacOS | OpenBSD, FreeBSD, MacOS, Linux y Windows |
| **Velocidad** | Rápido | Rápido | Media |
| **Proyectos** | Pequeños y medianos | Pequeños | Grandes |
| **Comunidad** | Grande | Pequeña | Pequeña |
| | | | |
| **Licencia** | Dual: GNU GPL v2 y propietaria | Abierta: GNU GPL v2 | Abierta: Licencia PostgreSQL |

### *c. Selección del protocolo de mensajería*

La interconexión entre dispositivos es esencial en el ámbito de la informática y las comunicaciones, donde los protocolos de comunicación establecen un conjunto de reglas que garantizan el intercambio seguro y confiable de datos. La Tabla 14 presenta una comparación entre tres protocolos de comunicación ampliamente utilizados: MQTT, COAP y XMPP. Estos protocolos son empleados en diversas aplicaciones, tales como IoT, automatización, control industrial, chat, mensajería, colaboración y transmisión de datos en tiempo real .

Tabla 14. Comparativa de 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 |

| Características | MQTT | COAP | XMPP |
|---|---|---|---|
| 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 |

### *d. Selección de tecnología de comunicación inalámbrica*

Hoy en día, el campo de las telecomunicaciones ofrece una amplia variedad de alternativas. Desde las redes celulares hasta tecnologías como Lora, Zigbee, Sigfox y otras. La selección de la tecnología inalámbrica adecuada para el desarrollo de un proyecto se vuelve fundamental para asegurar la eficiencia, la cobertura, la seguridad y la integración óptima en el sistema de monitoreo. En la Tabla 15 se detallan las características de las tecnologías de comunicación inalámbrica de largo alcance [XX].

Tabla 15: 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 |

## 3.3.3 Selección del dron para el sistema

En el mundo de los drones, la elección entre un Hexacóptero y un cuadricóptero depende de múltiples factores, como la aplicación específica, la capacidad de carga, la estabilidad en vuelo y el costo. Ambos tipos de drones tienen sus propias ventajas y desventajas, y entender estas diferencias es crucial para tomar una decisión informada.

En la Tabla 16 , se presenta una tabla comparativa que destaca las principales características y aplicaciones de Hexacópteros y cuadricópteros, proporcionando una visión clara de sus capacidades y limitaciones. Esta comparación resalta al Hexacóptero como el dron óptimo para el montaje del prototipo de monitorización.

Tabla 16. Características de los drones

| Característica | Hexacóptero | Cuadricóptero |
|---|---|---|
| **Número de rotores** | 6 | 4 |
| **Estabilidad en vuelo** | Alta estabilidad, especialmente en condiciones de viento | Buena estabilidad, pero menor en comparación con Hexacópteros |
| **Capacidad de carga** | Mayor capacidad de carga | Menor capacidad de carga en comparación |
| **Redundancia de motor** | Puede seguir volando si falla un motor | Generalmente no puede volar si falla un motor |
| **Tiempo de vuelo** | Menor tiempo de vuelo debido a mayor consumo de energía | Mayor tiempo de vuelo debido a menor consumo de energía |
| **Consumo de energía** | Mayor debido a la necesidad de alimentar 6 motores | Menor debido a la necesidad de alimentar solo 4 motores |
| **Costo** | Más caro debido a componentes adicionales | Generalmente más barato |
| **Tamaño y peso** | Más grande y pesado | Más compacto y ligero |
| **Complejidad de construcción** | Más complejo debido a la integración de más motores y controladores | Menos complejo |
| **Aplicaciones** | Fotografía y videografía profesional, monitoreo industrial, investigaciones científicas, aplicaciones que requieren alta estabilidad y capacidad de carga | Uso recreativo, fotografía y videografía no profesional, aplicaciones donde la portabilidad y el menor costo son prioritarios |
| **Resistencia al viento** | Mejor resistencia al viento debido a la distribución de los rotores | Menos resistencia al viento en comparación |

## 3.4 Consideraciones para el funcionamiento del Sistema

En la Figura 12, se presenta el diagrama general de las consideraciones a tener en cuenta para el desarrollo del sistema. Para que el sistema se puede desarrollar de forma adecuada se debe realizar ciertas comprobaciones del funcionamiento de los subsistemas. El primer paso consiste en la constatación adecuada de la calibración del dron, debido a que al integrar el sistema de monitoreo de aire ambiente se varía el centro de gravedad del dron por lo que se debe realizar una recalibración de los controladores del Dron. Una vez que se ha realizado la calibración del Dron se procede a realizar el testeo de los datos obtenidos desde los sensores. Esto supone que los sensores deben estar previamente calientes para que puedan obtener lecturas adecuadas. Una vez que se ha comprobado el funcionamiento y la calibración

adecuada del dron se procede a verificar el estado del servidor ha donde se van a alojar los datos obtenidos por el sistema de monitoreo de calidad de aire ambiente.

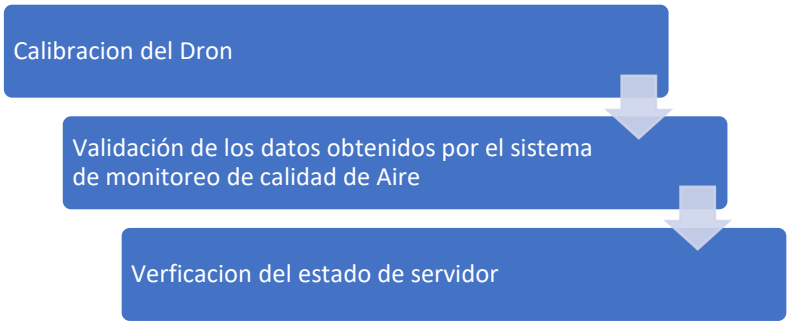



Figura 12. Esquema general de los sistemas del proceso

### *a. Envío de datos desde el Dron hacia la estación terrestre*

En la Figura 13 se muestra el flujograma que abarca las etapas de envío de datos hacia la estación terrestre, primero se realiza la configuración para poder adquirir todas las magnitudes en la tarjeta programadora. Luego se realizan los arreglos necesarios para formar cadenas de caracteres con los datos de cada sensor, los mismos que serán enviados por medio de comunicación Lora.

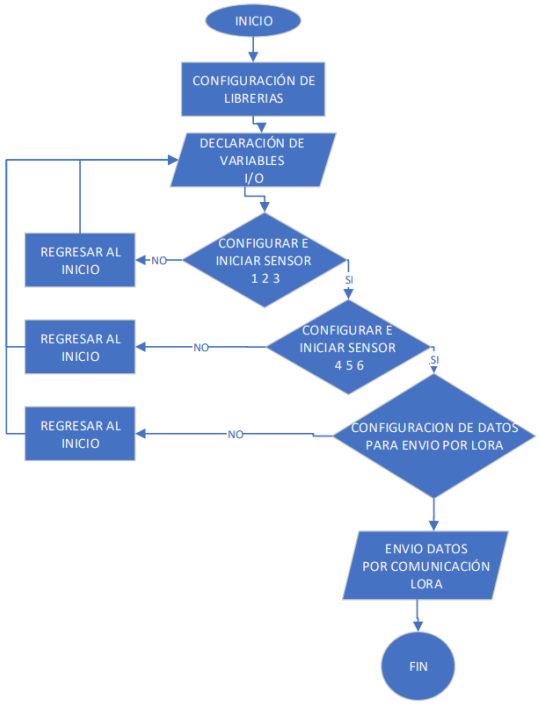



Figura 13. Diagrama para adquisición de datos en Arduino

### *b. Publicación de datos*

En la Figura 14 , se muestra el flujograma que contiene la etapa de registro e inicio de sesión. Cada una se desarrolla utilizando datos generales del usuario, como: el nombre del usuario, también el correo electrónico y finalmente la contraseña. Después que el usuario tenga acceso a la interfaz se realiza una solicitud de los parámetros climáticos de los diferentes sensores. Estos parámetros van a reflejarse en tiempo actual, todos estos parámetros están guardándose en la base de datos, de manera que en cualquier momento se puedan observar simplemente haciendo un filtrado.

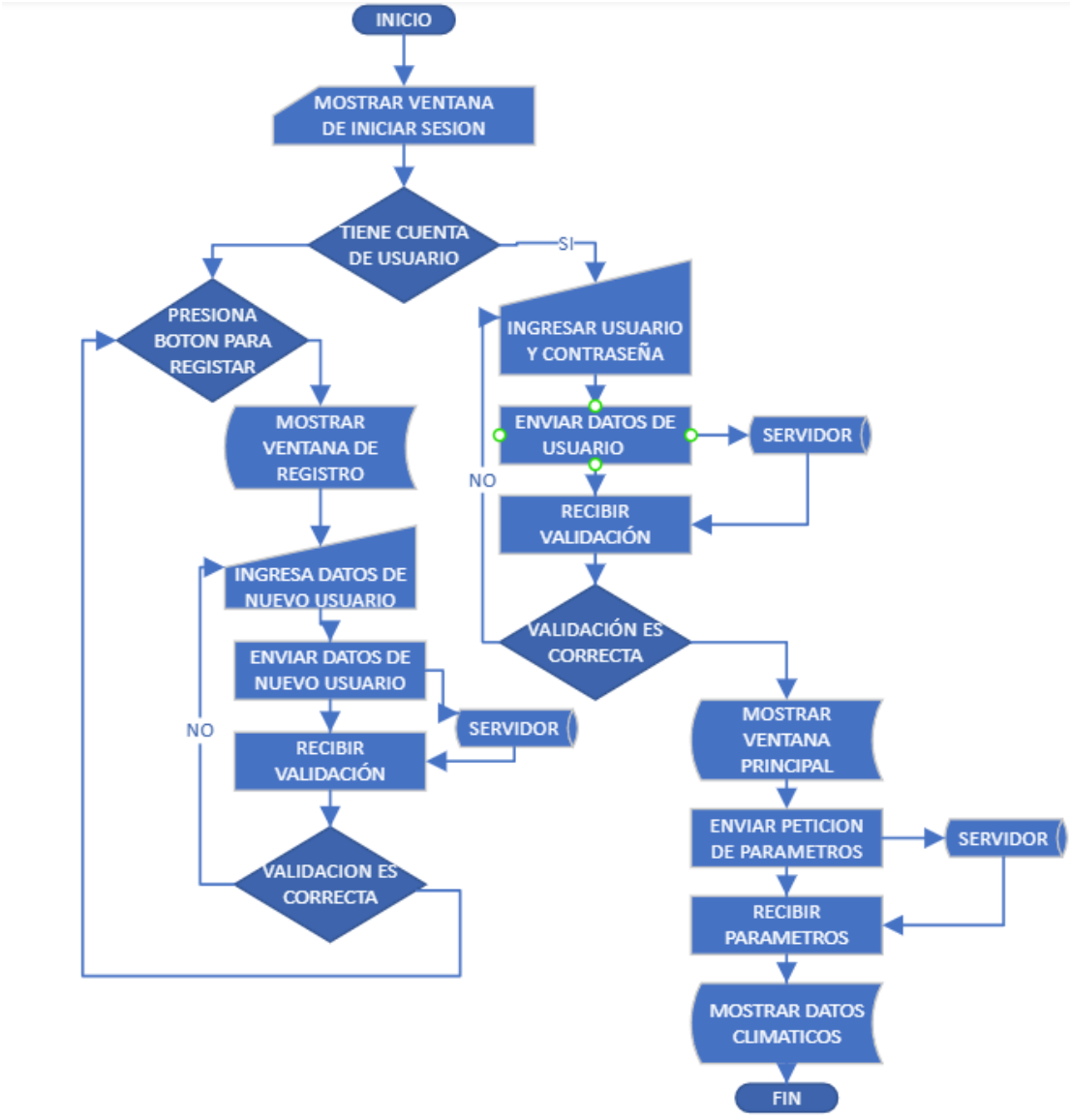



Figura 14.Diagrama de registro en ingreso para visualización

### 3.5 Arquitectura del sistema

La arquitectura del sistema mostrado en Figura 15, se organiza con diversas etapas en dependencia de su funcionamiento el mismo que sea eficiente. La primera etapa, implica la adquisición y recopilación de los datos provenientes de los sensores propuestos. Seguidamente, los datos son enviados mediante comunicación Lora hacia la estación terrestre, en la estación terrestre se procesan los datos para ser enviados mediante MQTT hacia la nube donde se guardarán en una base de datos, y por último gestionarlos para que sean visualizados mediante una página HTML.

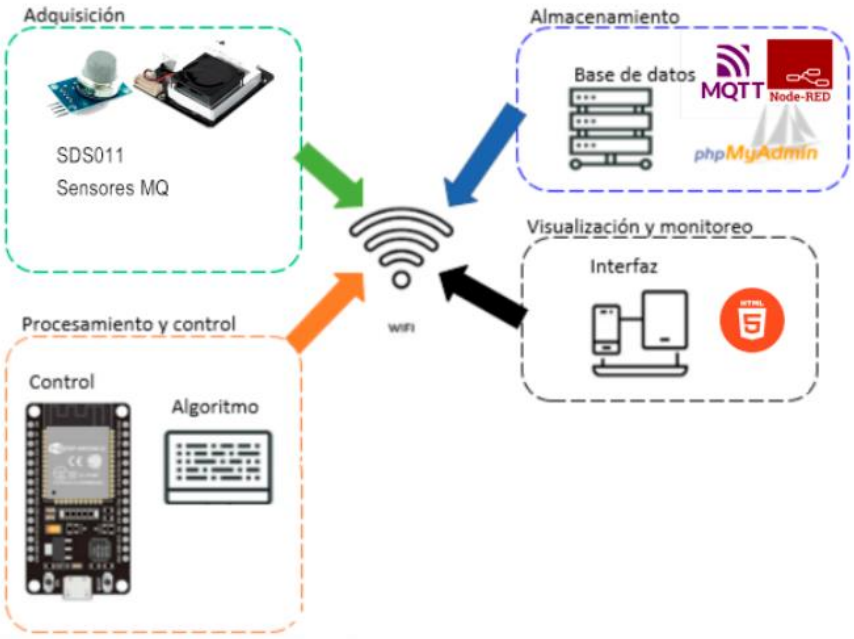



Figura 15. Arquitectura del sistema

### 3.6 Diseño del prototipo

En el diseño del prototipo se han tomado en cuenta varias consideraciones, las que permiten integrar de forma conjunta el sistema de monitoreo de calidad de ambiente, el mecanismo de descenso y el Dron.

#### 3.6.1 Diseño de la placa de control

Para el diseño de la placa de control que se encuentra montada tanto en el dron como en la estación de monitoreo de calidad de aire ambiente se realizaron los siguientes pasos

### *a. Esquemático*

En la Figura 16 y Figura 17 se muestra el esquema de diseño del sistema de monitoreo inalámbrico, que se centra en maximizar la eficiencia y garantizar la seguridad. El diseño utiliza nodos ESP32 equipados con módulos de comunicación Lora para recolectar datos de varios sensores de gases, incluyendo los modelos MQ-4, MQ-7, MQ-8, MQ-9, MQ-135 SDS011 y MG-811. Para optimizar la precisión de las lecturas de los sensores, se han incorporado filtros de paso bajo que ayudan a eliminar ruidos y fluctuaciones no deseadas.

El sistema está alimentado por circuitos acopladores que facilitan la conexión segura a una batería LiPo, la cual cuenta con protección contra sobrecargas, asegurando una fuente de energía estable y protegida para el circuito. Este diseño permite un monitoreo confiable y eficaz de la calidad del aire y los niveles de gases, mejorando la capacidad de detección y respuesta ante posibles riesgos ambientales.

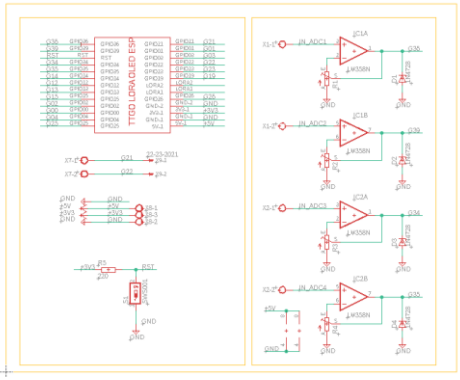


Figura 16. Diseño esquemático del nodo maestro

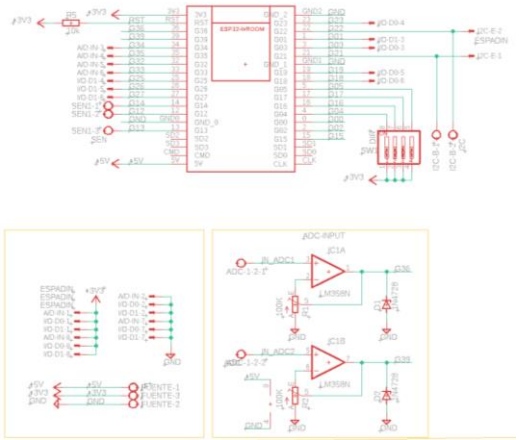


Figura 17. Diseño esquemático del nodo esclavo

### *b. PCB*

La fabricación de la placa de circuito impreso (PCB) de doble cara para el sistema de monitoreo inalámbrico de factores químicos comienza con el diseño del esquema, que define todos los componentes y sus conexiones. Posteriormente, se pasa al diseño de la PCB, priorizando el uso eficiente del espacio y la organización de los elementos, como se muestra en las Figura 18 y Figura 19.

El sistema de alimentación incorpora un circuito acoplador para una batería LiPo, con protección contra sobretensiones para garantizar la seguridad. La Figura 19 ilustra el diseño del circuito impreso.

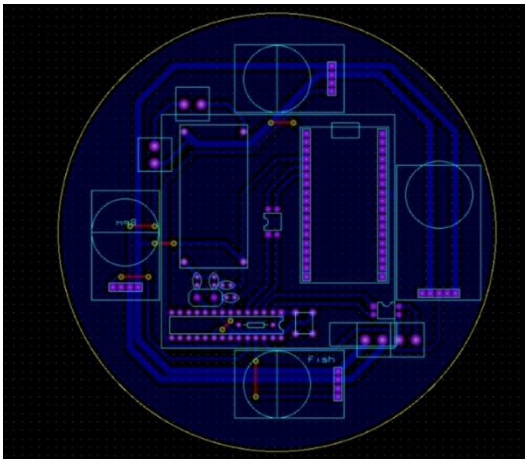


Figura 18. Diseño para baquelita

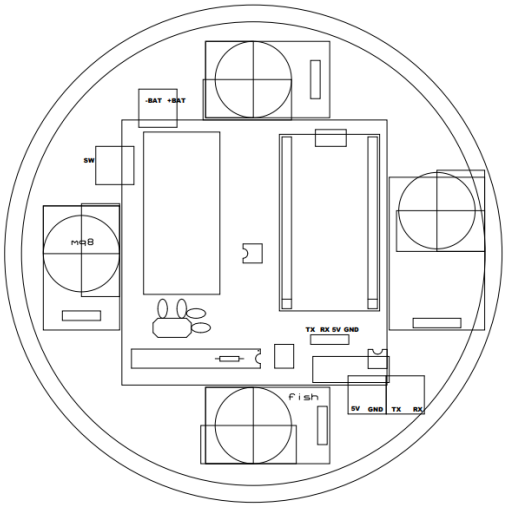



Figura 19. Muestra para el diseño de los sensores

### *c. Funcionamiento del sistema*

En el diagrama de flujo de la Figura 20 se puede observar de forma detallada el funcionamiento del sistema de monitoreo de calidad del aire ambiente.

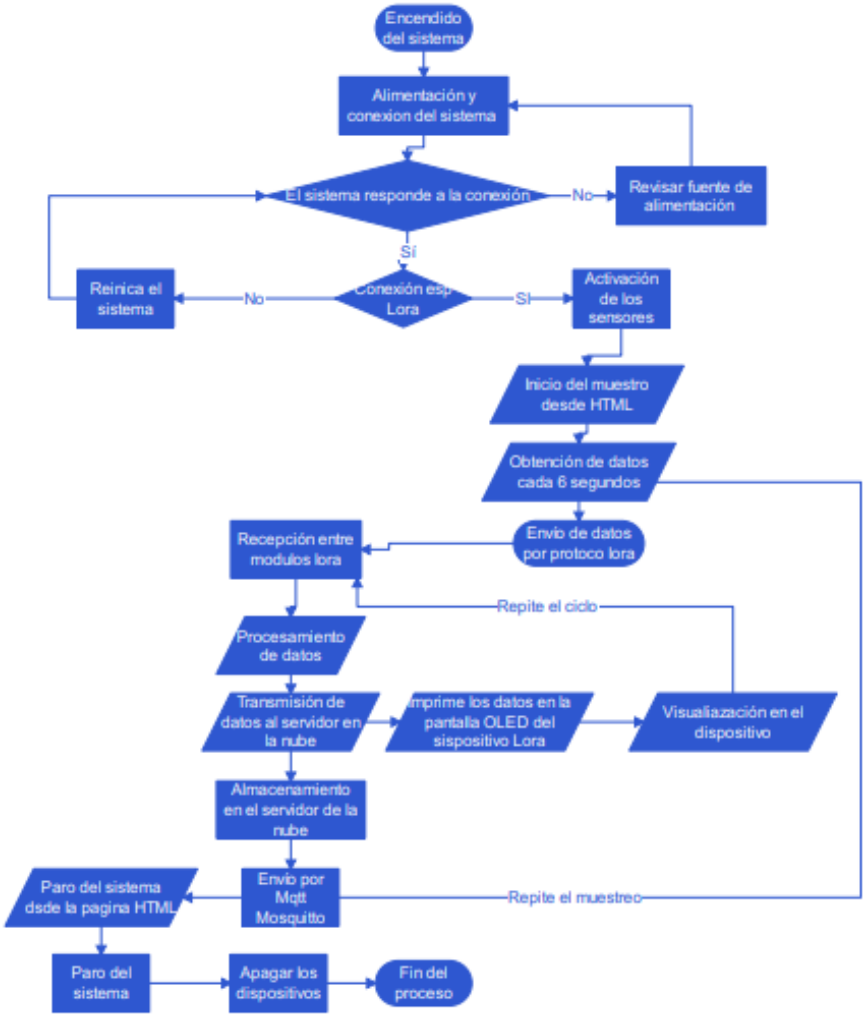



Figura 20. Flujo grama del funcionamiento del sistema de monitoreo

El funcionamiento del sistema inicia con la verificación de la energización de los diferentes módulos que componen el sistema de monitoreo. En caso de que no se compruebe la adecuada alimentación de los sensores se reinician las conexiones hasta que el sistema se encuentre energizado de forma adecuada. Una vez que se ha validado el funcionamiento del sistema se procede a la toma de los datos, los cuales son procesados por el microcontrolador Lora, para el envío de datos al servidor. Por último,

se procede al diseño de la carcasa donde se coloca toda la electrónica de los sensores y el sistema de transmisión de datos.

### 3.6.2 Construcción del prototipo

#### *a. Diseño 3D*

Para garantizar una protección eficaz del dispositivo en ambientes exteriores, el proceso comienza con el modelado 3D de la carcasa protectora. Empleando software especializado como FUSION 360, se desarrolla un diseño que se ajusta con precisión a las dimensiones de la placa PCB, asegurando un espacio adecuado para todos los componentes esenciales. En la Figura 21 se muestra el acople para que se pueda sujetar el servomotor hacia la placa donde también estará el circuito que controla el servomotor.

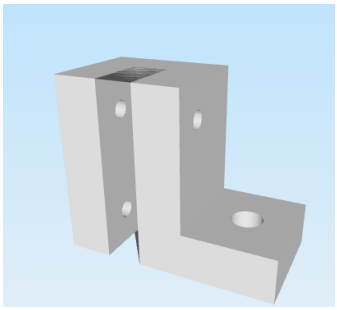


Figura 21. Base para sujetar el servomotor

Se desarrolla una caja donde va a estar acoplado el sistema del servomotor y también la placa electrónica en la Figura 22 se puede observar la caja.

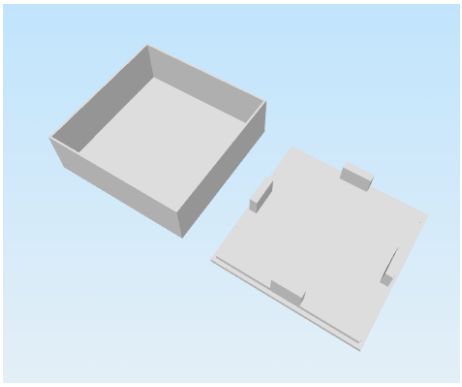


Figura 22. Caja y tapa para el servomotor

Para poder enrollar se necesita un carrete el mismo que estará acoplado al eje del servo en la Figura 23 se puede observar el diseño de la polea.

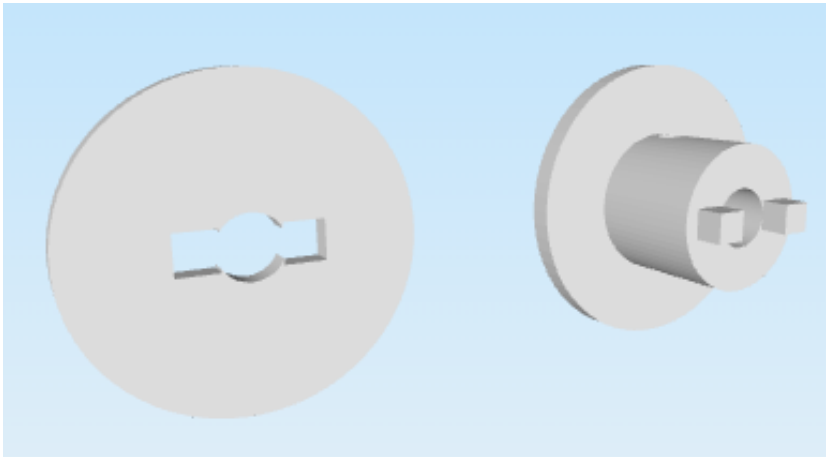


Figura 23. Carrete y tapa

Para poder tener los sensores se desarrolla una estructura cilíndrica hueca dónde se ubican estratégicamente cada uno de los sensores y en la parte posterior de la estructura se instala de forma correcta el sensor de partículas por millón. En la Figura 24, se puede observar el diseño de la estructura hueca con cuatro pilares, lo que tiene como objetivo dejar que pase el aire y pueda ser más estable a la hora del vuelo, en la Figura 25 se observa la tapa que cubrirá toda la estructura además de sus orificios que servirán para dar seguridad en el acople de las dos piezas y en la Figura 26 está la estructura completa y finalizada.

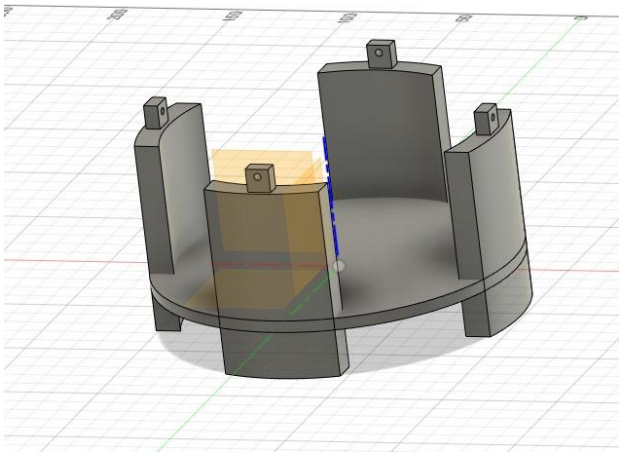


Figura 24. Estructura principal para el acople de la placa de sensores

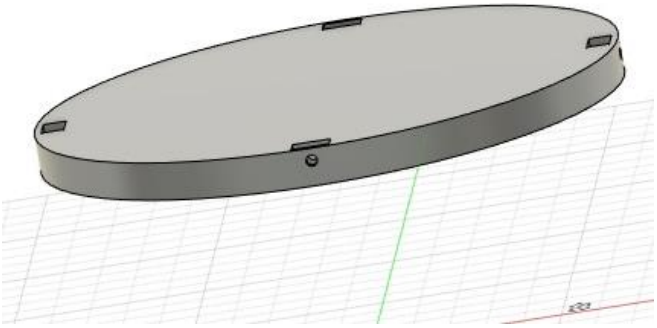


Figura 25. Tapa superior con orificios para el ajuste a la estructura principal

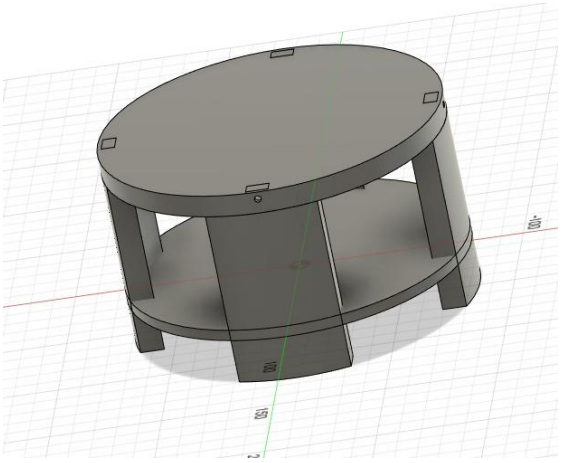


Figura 26. Estructura completa con su respectiva tapa

### *b. Consumo energético*

Se necesita conocer el consumo que tiene cada uno de los elementos que van a constituir la placa y por tal el prototipo, en la Tabla 17, se detalla el consumo de corriente y de voltaje que tiene cada uno de los elementos del sistema de acuerdo a la hoja de datos.

Tabla 17. Detalle de consumo eléctrico

| Elemento | Cantidad | Consumo de corriente (mA) | Voltaje de operación (V) | Potencia (W) |
|---|---|---|---|---|
| ESP32 TTGO Lora | 2 | 80-260 | 3.3 | 0.26-0.86 |
| MQ7 Sensor | 1 | 150 | 5 | 0.75 |
| MQ9 Sensor | 1 | 150 | 5 | 0.75 |
| MQ135 Sensor | 1 | 150 | 5 | 0.75 |
| MEG811 Sensor | 1 | 10 | 3.3 | 0.033 |

| Elemento | Cantidad | Consumo de corriente (mA) | Voltaje de operación (V) | Potencia (W) |
|---|---|---|---|---|
| SDS011 Sensor | 1 | 100 | 5 | 0.5 |
| Servomotor Injora 36kg | 1 | 2000 (en movimiento) | 6-7.4 | 12-14.8 |
| Sensor de final de carrera | 1 | 10 | 3.3 | 0.033 |
| Total, máximo | | | | 18.446 |
| Total, mínimo | | | | 15,016 |

Se determina una potencia máxima de 18,466 W y una mínima de 15,066 para cada nodo se utiliza baterías independientes. En el nodo que está sujeto al dron se toma una salida de 5 voltios hacia la placa de los componentes y en el nodo dos se conecta una batería independiente para el sistema. Se usa alimentaciones independientes tato para el mecanismo que tiene la estación de monitoreo como para los sensores de manera que esta no cause ninguna interferencia con la placa de desarrollo.

### *c. Configuración de los nodos del sistema.*

- ***Nodo 1***

En base al esquema general que tiene el sistema y tomando en cuenta los dispositivos seleccionados se diseñan los circuitos tomando en cuenta la arquitectura que debe tener el prototipo. En la Figura 27, se presenta el circuito, del servomotor que controla el mecanismo que permitirá subir y/o bajar la estación de monitoreo de aire donde se encuentran instalados los sensores además de un sensor de efecto hall el mismo que ayudará a verificar cuántas vueltas da el servomotor todo controlado por la esp 32 Lora.

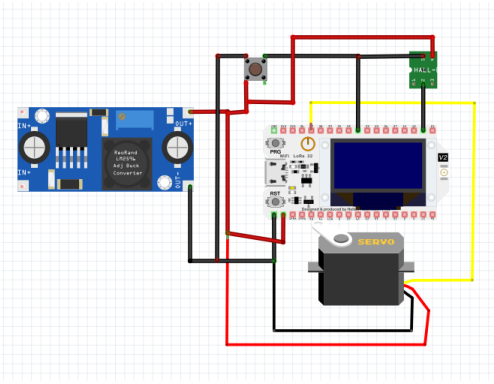



Figura 27. Circuito nodo 1

En la Figura 28, se observa el circuito montado con los elementos seleccionados previamente basados en el esquema de conexión de la Figura 27.

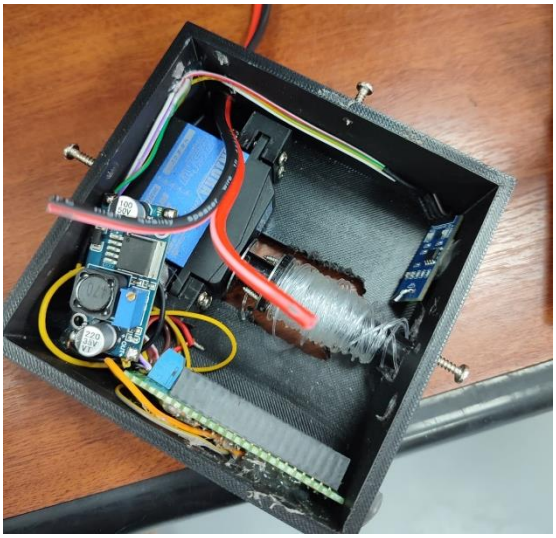


Figura 28. Circuito montado en el prototipo

A continuación, en la Tabla 18, se muestran los pines de conexión de los elementos y sus respectivos valores de voltaje medidos, este circuito funciona con una fuente independiente de 5v y 2 A la misma que es adecuado en función del consumo energético detallado en la Tabla 17.

Tabla 18. Pines de conexión y datos de alimentación nodo 1

| Pin de Conexión | Elementos | Datos de alimentación | |
|---|---|---|---|
| | | Voltaje [V] | Corriente [mA] |
| 36 | Servomotor | 5,5 v | 800 |
| 12 | Sensor Hall | 5 | 100 |
| | Esp 32 Lora | 5 | 150 |

- ***Nodo 2***

En la Figura 29, se muestra el circuito para la conexión de los diferentes sensores que componen la estación de monitoreo de la calidad de aire ambiente. En este circuito se encuentran incorporados los sensores mq8, mg811, mq135, mq7, sds011 los mismos que están conectados a la tarjeta esp32 Lora, todo el sistema está alimentado por una fuente externa para que pueda suplir la corriente necesaria para el funcionamiento del sistema.

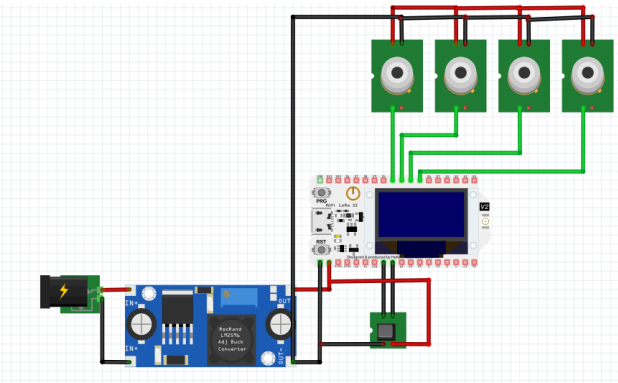


Figura 29. Circuito nodo dos

En la Figura 30 se puede observar el montaje del circuito en base al diagrama electrónico presentado en la Figura 29.Figura 29 .

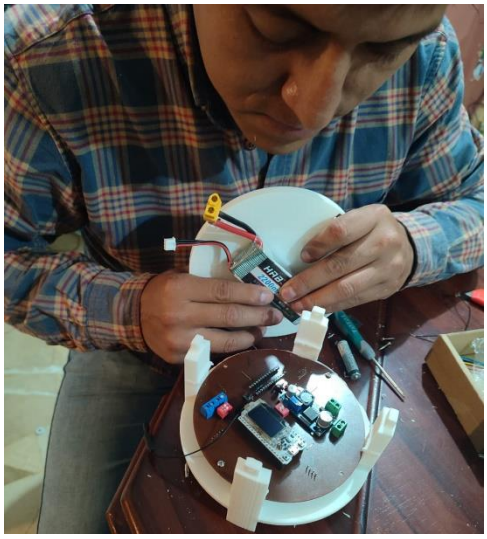


Figura 30. Segundo circuito montado del prototipo.

En la Tabla 19, se muestran los pines de conexión de los elementos y sus respectivos voltajes, al igual está alimentado con una batería externa independiente para que los sensores tengan un funcionamiento correcto.

Tabla 19. Pines de conexión y datos de alimentación nodo 2

| Pin de Conexión | Elementos | Datos de alimentación | |
|---|---|---|---|
| | | Voltaje [V] | Corriente [mA] |
| 10 | Sensor Mq7 | 5,5 v | 800 |
| 11 | Sensor Mg811 | 5 | 100 |
| 12 | Sensor Mq135 | 5 | 100 |
| 13 | Sensor Mq7 | 5 | 100 |

- ***Nodo 3***

El nodo 3 es el principal ya que él concentra toda la información del nodo 1 y nodo 2 además de tener el enlace directo y único hacia la nube.



Figura 31. Carcasa y conexión del nodo 3

### 3.6.3 Análisis de la estabilidad del Dron

#### *a. Análisis aerodinámico*

Un Hexacóptero es un tipo de aeronave que tiene más peso que el aire además de contar con alas rotativas, donde cada hélice es impulsada por un motor eléctrico, proporcionando la sustentación necesaria. Esta configuración permite realizar despegues y aterrizajes verticales [68]**.**

- ***Cálculo de la potencia requerida***

La potencia debe ser suficiente para cumplir con las condiciones operativas, previo al dimensionamiento del Hexacóptero, de ello depende su ascenso, descenso y vuelo en avance. Se emplean dos teorías para calcular esta potencia:

- ***Teoría de Cantidad de Movimiento (TCM)***

Describe cómo la fuerza generada por un fluido en movimiento resulta del cambio en su cantidad de movimiento, aplicándose en aerodinámica y propulsión [68].

- ***Teoría de Elemento de la Hélice (TEP)***

La TEP proporciona resultados más precisos y se utiliza una teoría adicional para calcular la velocidad inducida. Sin embargo, se opta por utilizar la TCM para el cálculo inicial de la potencia, junto con factores de corrección para ajustar los resultados. Esto garantiza que los motores suministren la potencia necesaria en todas las condiciones operativas mencionadas [68].

- ***Cálculo de la potencia según la TCM***

Se toma en cuenta que el vuelo a punto fijo su velocidad relativa tiende a ser cero con respecto al aire. Lo que es lo mismo que la potencia requerida para su vuelo en ascenso es nula.

La potencia de vuelo se debe tomar las establecer las consideraciones: Se asume que dicho movimiento que realiza es estacionario; El proceso es adiabático, como resultado no hay transferencia de calor. Su movimiento es unidimensional y constante; El fluente se considera incompresible, por lo que la consistencia es constante; Se desprecia cualquier efecto debido a la viscosidad [68].

Para calcular la potencia, es importante considerar la altitud, ya que la densidad del aire disminuye con la altura, lo que demanda más potencia. A continuación, se presentan los cálculos pertinentes, considerando que el vuelo se llevará a cabo en la ciudad de Ambato, a una altitud máxima de 100 metros [68]:

$$h = 2850 + 100m$$
$$h = 2950\ m.s.n.m$$

Siguiendo el estándar ISA, se destaca cómo calcular la densidad del aire, haciendo referencia a las propiedades del aire a diferentes altitudes. En particular, se resalta la Ecuación 1 [68].

$$\boldsymbol{\rho = \rho_o \left(1 - \frac{6,5x10^{-3}h}{288,15}\right)^{4,252}} \quad (1)$$

Donde

$\rho_o = Densidad\ del\ aire\ estándar\ a\ nivel\ del\ mar\ \left(1{,}225\,\frac{kg}{m^3}\right)$

$h = altura\ máxima\ de\ vuelo\ (100m)$

$6.5\text{x}\ 10^{-3}$ es el gradiente de temperatura en la

troposfera en grados kelvin por metro $\left(\frac{6.5\text{k}}{\text{km}}\right)$

$2.8815\ es\ la\ temperatura\ en\ Kelvin\ al\ nivel\ del\ mar$

$4.252\ es\ un\ exponente\ derivado\ de\ las\ constantes$

$adiabaticas\ del\ aire\ y\ la\ gravedad\ terreste$

$$\rho = 1.225\left(1 - \frac{6{,}5x10^{-3}(1000)}{288{,}15}\right)^{4{,}252}$$

$$\rho = 0{,}891\,\frac{kg}{m^3}$$

La fuerza de tracción requerida por el Hexacóptero es la suma de su peso propio y la carga útil, totalizando 13 kgf. Por lo tanto, cada motor debe generar una tracción de aproximadamente 2,16 kgf (21,17 N). Durante el vuelo estacionario, no existe una velocidad relativa entre las hélices y el aire, lo que implica que la velocidad de ascenso es nula. La potencia necesaria para mantener el vuelo estacionario, según los principios de la TCM, se calcula mediante la Ecuación 2 [68]:

$$\boldsymbol{P_{io} = T_{v_{io}}} \qquad (2)$$

Donde

$T = Tracción\ que\ genera\ cada\ motor\ (21.17N)$
$v_{io} = Velocidad\ inducida\ en\ vuelo\ a\ punto\ fijo$

Al inducir velocidad se da también la velocidad del aire de la hélice, con la Ecuación 3:

$$\boldsymbol{v_{io} = \sqrt{\frac{T}{2pA}}} \tag{3}$$

Donde

$A = Área\ de\ proyección\ del\ rotor$

Para tener el valor del área de proyección se calcula con la Ecuación 4:

$$\boldsymbol{A = \pi r^2} \tag{4}$$

Donde

$r = Radio\ de\ la\ hélice$

La selección del tamaño de la hélice debe priorizar la eficiencia en la transmisión de energía, enfocándose más en el análisis estructural que en el aerodinámico. Es crucial elegir una hélice y evaluar su capacidad requerida, basándose en modelos comerciales como referencia. Se recomienda el uso de hélices de 12 pulgadas para cargas de hasta 12 kg y de hélices de 18 pulgadas para cargas de hasta 16 kg. Por lo tanto, en este proyecto se emplearán hélices de 12 pulgadas con un paso de 5,5 pulgadas, disponibles en el mercado. La Figura 31 presenta el diseño de la hélice seleccionada, fabricada completamente en fibra de carbono para optimizar la relación resistencia/peso. Entonces:

$$d = 12plg = 0{,}3048$$

$$r = 6plg = 0{,}1524$$

Esta área es igual a:

$$A = \pi(0{,}1524)^2 = 0.0729m^2$$



Figura 32. Hélices de 12plg

Luego se calcula la velocidad inducida:

$$v_{io} = \sqrt{\frac{21{,}17}{2(0{,}891)(0{,}0729)}}$$

$$v_{io} = 8{,}51\frac{m}{s}$$

Al calcular la velocidad inducida, se determina la potencia necesaria para el vuelo estacionario:

$$P_{io} = 21{,}17(8{,}51)$$

$$P_{io} = 180{,}16W$$

En la Figura 33, se representa la variación de potencia a distintas altitudes. Según el gráfico, se nota que la potencia necesaria al nivel del mar es de 153,5 W. Por lo tanto, se deduce que para el funcionamiento adecuado del hexacóptero en Ambato, se necesita un aumento de 26,66 W.

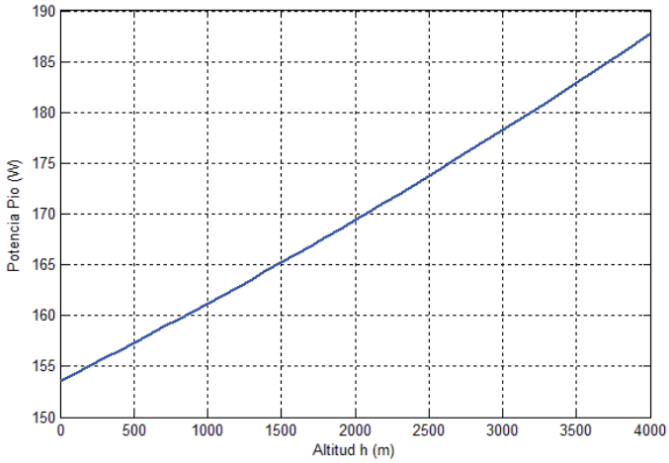



Figura 33. Potencia requerida en vuelo estacionario en función de la altitud.

La Figura 34 ilustra cómo cambia la potencia necesaria para mantener el vuelo estacionario a una altitud de 3200 metros sobre el nivel del mar. Se evalúa la tracción de cada motor en un intervalo que va desde 0 hasta 5 kgf.

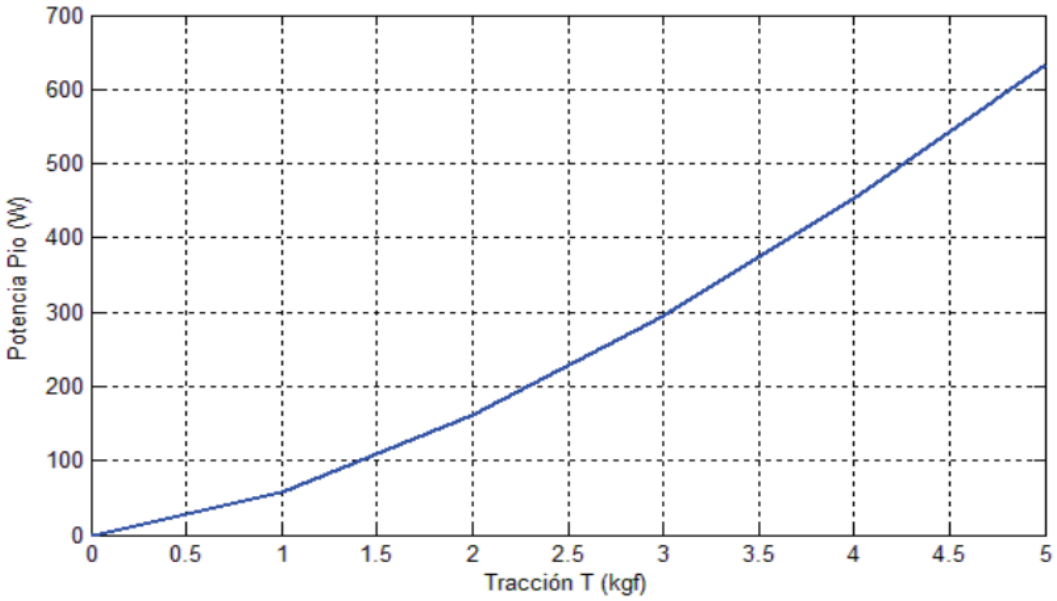



Figura 34. Potencia necesaria para vuelo estacionario en relación con la tracción.

- ***Potencia de vuelo axial ascendente***

Durante el ascenso axial, existe una velocidad relativa entre la hélice y el aire, donde $v_c \neq 0$. En estas circunstancias, la potencia requerida para ejecutar la maniobra se determina mediante la ecuación 5.

$$\boldsymbol{t_i = T\,(v_c + v_i)} \tag{5}$$

Donde

$v_C = Velocidad\ de\ ascenso$
$v_i = velocidad\ inducida\ en\ vuelo\ axial\ ascendente$

La velocidad de ascenso representa la velocidad vertical del hexacóptero. Se ha determinado una velocidad óptima de 6 m/s, basada en datos de drones comerciales y la carga específica. Según la TCM, se puede establecer una correspondencia entre la velocidad inducida durante el vuelo estacionario y el vuelo axial ascendente.

$$\frac{v_i}{v_{io}} = -\frac{1}{2}\left(\frac{6}{8{,}51}\right)^2 + \sqrt{\frac{1}{4}\left(\frac{6}{8{,}51}\right)^2 + 1}$$

$$\frac{v_i}{v_0} = 0{,}707$$

$$v_i = 0{,}707 v_{io}$$

$$vi = 0{,}707(8{,}51)$$

$$v_i = 6{,}02\,\frac{m}{s}$$

Al tener la velocidad inducida y la velocidad de ascenso se obtiene la potencia requerida:

$$P_i = 21{,}17\ (6 + 6{,}02)$$

$$P_i = 254{,}46W$$

La Figura 35 ilustra cómo cambia la potencia requerida durante el vuelo axial ascendente. Se evalúa un intervalo de velocidades de 0 a 10 m/s. Los datos se

obtuvieron para una altitud de 100 metros sobre el nivel del mar y una carga por motor de 2,16 kgf.

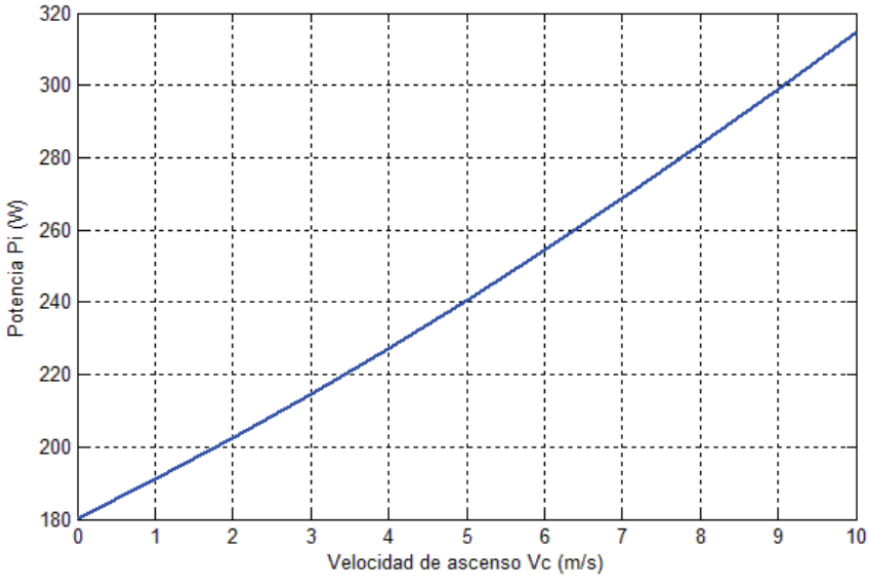



Figura 35. Potencia necesaria en vuelo ascendente en relación con la velocidad de ascenso.

- ***Potencia en vuelo axial descendente***

Durante el vuelo descendente, la velocidad se dirige hacia arriba, mientras que la velocidad inducida siempre apunta hacia abajo. Debido a esto, la velocidad resultante puede tener cualquiera de estas dos direcciones, lo que implica una desviación del modelo de flujo asumido. Se distinguen dos situaciones típicas:

Para velocidades de descenso moderadas, se recurre a modelos empíricos debido a las complejas recirculaciones y al flujo turbulento establecido.

En el caso de velocidades de descenso elevadas, la TCM ofrece resultados precisos, ya que el flujo sigue una configuración claramente definida hacia abajo. Con esto en mente, se pueden identificar cuatro regímenes de funcionamiento durante el vuelo descendente:

F. normal vc >= 0 (cuando el vuelo es ascendente).

Anillos de vórtices -1 <= vc/vi0 < 0.

Estela turbulenta -2 <= vc/vi0 < -1.

Molinete frenante vc/vi0 < -2.

La TCM se aplica únicamente a los regímenes de funcionamiento estándar y molinete de frenado. Para los otros dos casos, se requiere ajuste experimental, y este proyecto emplea un enfoque de ajuste lineal.

A continuación, se realizaron los cálculos considerando una velocidad de descenso de 3 m/s (vc = -3 m/s). Primero, se determinará el régimen de funcionamiento.

$$\frac{v_c}{v_{io}} = -\frac{3}{8{,}51}$$

$$\frac{v_c}{v_{io}} = -0{,}353$$

A una velocidad de 3 m/s, el hexacóptero opera en el régimen de anillos de vórtice. La Figura 36, muestra la velocidad inducida, calculada en 1,4 unidades. Dado que la TCM no es adecuada para este régimen, se empleará un método de ajuste lineal.

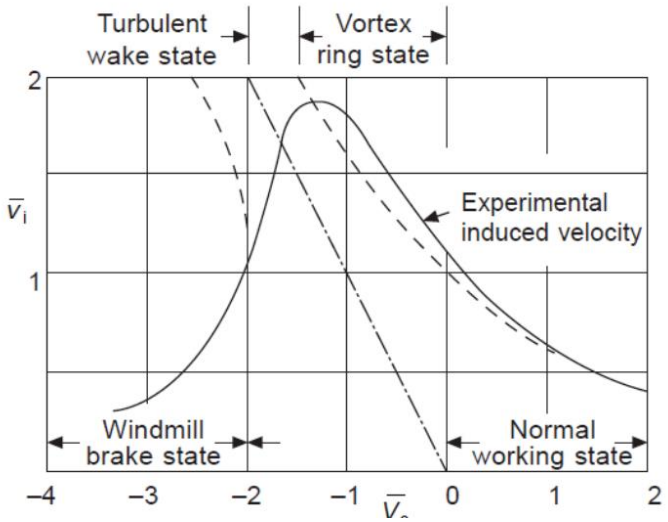



Figura 36. Cambios en la velocidad inducida durante el descenso vertical.

La potencia se determina utilizando la ecuación 5, teniendo en cuenta que la velocidad es negativa debido al vuelo descendente.

$$P_{id} = 21{,}17\ (-3 + 12{,}79)$$
$$P_{id} = 207{,}25W$$

La Figura 37, muestra la potencia requerida para el vuelo descendente axial, considerando velocidades de descenso desde -18 m/s hasta 0 m/s.

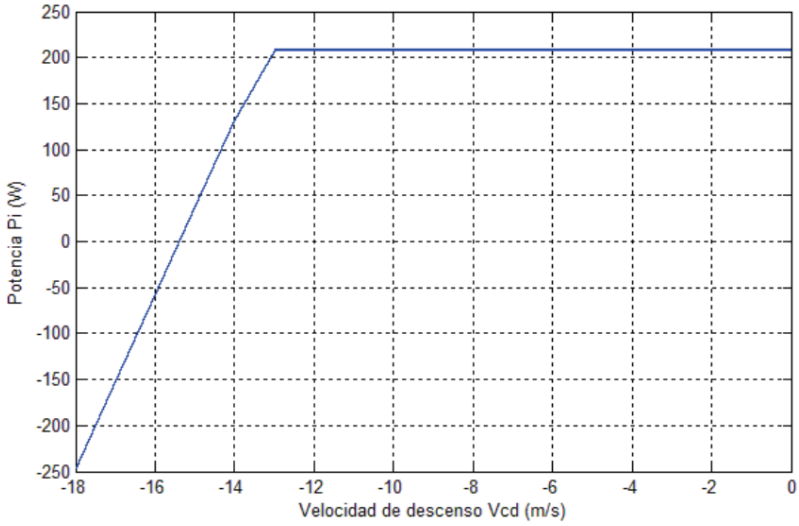



Figura 37. Potencia necesaria en vuelo descendente axial en relación con la velocidad de descenso.

Durante el vuelo descendente, se nota que la potencia necesaria es cero a una velocidad de 15,4 m/s, y que para velocidades de descenso de hasta 13 m/s la potencia requerida es constante. Por razones de seguridad, se establecerá una velocidad máxima de descenso de 6 m/s.

- ***Actuaciones del hexacóptero***

Una vez determinada la potencia instalada en el hexacóptero, es crucial evaluar sus capacidades operativas en vuelo. Esta sección detalla la distribución de la potencia requerida en varios aspectos:

***Potencia inducida***: Se refiere a la potencia necesaria para generar tracción, principalmente utilizada en vuelo estacionario. Esta potencia tiende a disminuir durante el ascenso axial.

***Potencia parásita de la hélice:*** Es la potencia requerida para vencer la resistencia aerodinámica de la hélice y mantener su rotación.

***Potencia ascensional:*** Es la potencia necesaria para elevar el hexacóptero, es decir, para cambiar su energía potencial en un intervalo de tiempo determinado.

***Potencia parásita:*** se refiere a la energía necesaria para que el hexacóptero se desplace y supere la resistencia aerodinámica durante su movimiento hacia adelante. Esta resistencia se genera debido a la interacción del hexacóptero con el aire mientras avanza, lo que requiere una cantidad adicional de energía para mantener su velocidad y dirección.

Cuando la hélice gira, genera un momento en dirección opuesta. En este caso específico, este momento se cancela debido a que tres hélices giran en sentido de las agujas del reloj y las otras tres en sentido contrario. Esta configuración permite que los momentos se compensen entre sí, evitando así la necesidad de utilizar un rotor anti par adicional, como se ilustra en la Figura 38 .

Según la sección anterior del análisis, se determinó que la potencia instalada necesaria es de 614,64 W. Para asegurar que los motores no operen al máximo de su capacidad, se optará por una potencia instalada equivalente al 70% del valor nominal recomendado.

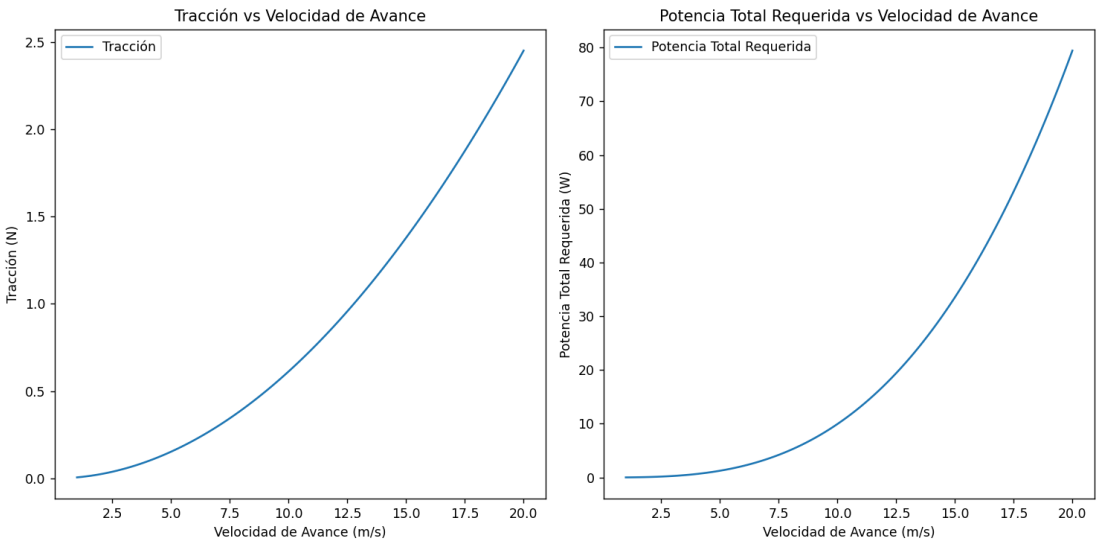



Figura 38. Relación entre la velocidad de avance y la tracción

- ***Autonomía del hexacóptero***

La duración de vuelo del hexacóptero se define como el tiempo que puede permanecer en el aire, principalmente determinado por las características de las baterías y el consumo de energía. Durante su operación, se identifican tres maniobras distintas con sus respectivas demandas de potencia:

Potencia necesaria para vuelo estacionario: $P = 214{,}84w$

Potencia necesaria para ascenso axial: $P = 411.482w$

Potencia necesaria para vuelo horizontal: $P = 409{,}99w$

Debido al patrón de operación para la vigilancia, se estima que el Hexacóptero pasará el 30% del tiempo en vuelo estacionario, otro 30% ascendiendo axialmente, y el restante 40% en vuelo horizontal. Por lo tanto, la potencia requerida determina que el voltaje de alimentación de los motores debe ser de 22,2 V, lo cual implica el uso de baterías de 6 celdas, como se observa en la Figura 39 .

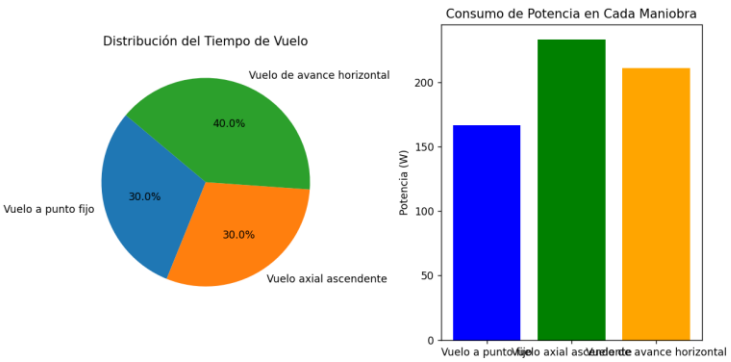



Figura 39.Determinación de los porcentajes

### 3.6.4 Acoplamiento de sistemas y pruebas

#### *a. Acoplamiento del sistema de monitoreo al dron*

Se acopla los dos sistemas al dron tomando en cuenta que deben tener sus pesos totalmente equilibrados. Analizando los pesos de cada uno de los sistemas como se muestra en la Figura 40 y Figura 41.




Figura 40. Peso del sistema 1 Nodo 1




Figura 41. Peso del sistema 2 Nodo 2

Acoplamiento del Nodo 1 al dron, en la Figura 42, se puede observar que se ha realizado agujeros simétricos para que se acople al dron teniendo un punto de estabilidad, se sujetan con tornillos y tuercas de manera que no tienda a soltarse el nodo 1 como se muestra en la. Finalmente, en la Figura 43, se muestra todo el sistema acoplado al hexacóptero.

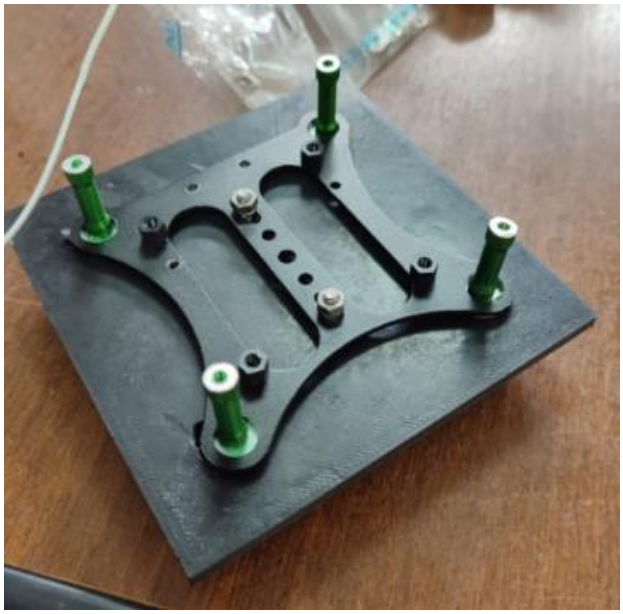


Figura 42. Sujeción de caja con agujeros simétricos




Figura 43. Acoplamiento del sistema al Dron

Por último, se acopla el nodo 2 al sistema principal, para sujetarse se acopla con un hilo nylon que soporta un peso de 36kg. Tomando el centro de la estructura para que tenga estabilidad al momento de estar tendiendo del dron, en la Figura 44 se puede observar un acople de forma compacta que permitirá el vuelo adecuado del dron.

Se debe tomar en cuenta que se hizo prueba con diferentes cuerdas, pero el hilo nylon es el más adecuado que soporta peso y tiene rigidez al ser templado.



Figura 44. Sistema total unificado

### *b. Pruebas de funcionamiento*

Se tiene que hacer varias pruebas de vuelo conjuntamente con el sistema de monitoreo de manera que podamos garantizar la fiabilidad y la precisión de los datos que se recogen mediante nuestro prototipo donde se implementan los siguientes procedimientos:

- ***Pruebas individuales de sensores***

Se realizaron pruebas individuales en cada sensor según los rangos especificados para los factores químicos correspondientes (NO2, NO, SO2, CO, CO2, O3) utilizando sensores como MQ-4, MQ-7, MQ-8, MQ-9, MQ-135 y MG-811. Estos sensores fueron evaluados para verificar su capacidad de detectar gases específicos, utilizando fuentes controladas de gases para validar su sensibilidad y respuesta.

La Tabla 13 detalla los valores registrados por cada sensor en el sistema de monitoreo de factores químicos. Estos datos son cruciales para evaluar la calidad del aire en la zona céntrica de la ciudad de Ambato, proporcionando resultados específicos sobre diferentes aspectos químicos presentes en el entorno. La precisión y confiabilidad de estos datos son fundamentales para la toma de decisiones informadas en la gestión de la contaminación atmosférica, contribuyendo al objetivo general de mejorar la calidad ambiental en la comunidad.

Tabla 20. Rangos considerados para los sensores

| Sensor | MQ-7 | MQ-135 | MQ-8 | MQ-4 | MQ-9 | MG-811 | SDS011 (PM2.5/PM10) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Factor químico** | NO2 | NO | SO2 | CO | CO2 | O3 | Partículas PM2.5/PM10 |
| **Valor mínimo** | 0 ppb | 0 ppb | 0 ppb | 0 ppm | 0 ppm | 0 ppb | 0 µg/m³ |
| **Valor máximo** | 30 ppb | 10 ppb | 10 ppb | 9 ppm | 400 ppm | 25 ppb | 500 µg/m³ / 1000 µg/m³ |
| **Valor perjudicial** | 100 ppb | 35 ppb | 35 ppb | 35 ppm | 1000 ppm | 100 ppb | 250 µg/m³ / 500 µg/m³ |

Es importante tomar en cuenta que el proceso de muestreo para los sensores debía tener un previo calentamiento de mínimo 30 minutos para que sus lecturas sean óptimas. Esto se puede llevar a cabo ya que el sistema de monitoreo tiene una fuente independiente de energía por lo que se puede realizar el calentamiento previo de los sensores y después acoplarlo al dron para la toma de datos en los lugares seleccionados. El monitoreo de la calidad del aire con ayuda del dron se realiza por aproximadamente 5 minutos en puntos determinados con la finalidad de obtener una media de valores del área de análisis y determinar la calidad del aire en el sector de estudio. Estos datos se procesaron utilizando las curvas respectivas que proporciona el fabricante de estos, permitiendo tener un análisis detallado de cada uno de los dispositivos y su funcionamiento.

Tabla 21. Valores capturados por los sensores

| Id | NO2 | NO | SO2 | CO | CO2 | O3 | PM2.5 | PM10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 31.40 | 16.14 | 13.43 | 12.38 | 437 | 24.00 | 25 | 50 |
| 2 | 31.00 | 13.71 | 15.29 | 11.88 | 411 | 34.75 | 30 | 55 |
| 3 | 36.80 | 15.14 | 14.29 | 12.13 | 410 | 32.75 | 28 | 52 |
| 4 | 31.40 | 15.57 | 16.43 | 12.25 | 393 | 33.75 | 32 | 60 |
| 5 | 34.80 | 13.29 | 12.43 | 12.00 | 412 | 28.00 | 27 | 58 |
| 6 | 31.60 | 14.71 | 14.14 | 12.38 | 431 | 31.50 | 29 | 54 |
| 7 | 38.00 | 14.29 | 14.00 | 12.50 | 418 | 28.25 | 31 | 56 |
| 8 | 33.60 | 12.29 | 13.86 | 11.50 | 439 | 26.25 | 26 | 57 |
| 9 | 30.80 | 15.43 | 13.71 | 12.25 | 415 | 24.50 | 33 | 62 |
| 10 | 30.20 | 16.29 | 13.43 | 11.38 | 414 | 25.75 | 35 | 65 |
| 11 | 37.40 | 15.57 | 14.57 | 12.00 | 435 | 24.00 | 30 | 59 |
| 12 | 30.00 | 15.43 | 13.29 | 12.13 | 435 | 25.75 | 28 | 53 |
| 13 | 30.60 | 12.29 | 15.29 | 12.13 | 423 | 28.00 | 32 | 61 |
| 14 | 38.00 | 16.86 | 13.57 | 11.75 | 438 | 34.50 | 29 | 55 |
| 15 | 30.00 | 13.71 | 14.43 | 12.13 | 407 | 28.00 | 34 | 63 |
| 16 | 35.40 | 16.43 | 15.43 | 12.38 | 415 | 29.75 | 31 | 57 |
| 17 | 30.20 | 13.57 | 14.43 | 11.38 | 403 | 24.25 | 27 | 52 |
| 18 | 31.60 | 13.57 | 13.43 | 12.13 | 427 | 27.25 | 29 | 56 |
| 19 | 37.80 | 12.14 | 15.71 | 12.25 | 430 | 30.50 | 30 | 58 |
| 20 | 33.00 | 12.86 | 15.00 | 11.63 | 399 | 23.25 | 28 | 54 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 21 | 33.60 | 13.43 | 12.29 | 11.63 | 414 | 35.00 | 32 | 60 |
| 22 | 34.80 | 16.86 | 12.14 | 11.75 | 392 | 28.00 | 30 | 57 |
| 23 | 36.40 | 15.43 | 14.57 | 11.88 | 429 | 28.00 | 29 | 55 |
| 24 | 30.80 | 15.57 | 15.71 | 11.50 | 430 | 24.00 | 28 | 53 |
| 25 | 37.00 | 15.86 | 14.00 | 12.13 | 406 | 23.50 | 26 | 51 |
| 26 | 37.40 | 15.57 | 14.57 | 12.00 | 435 | 24.00 | 30 | 59 |
| 27 | 30.00 | 15.43 | 13.29 | 12.13 | 435 | 25.75 | 28 | 53 |
| 28 | 30.60 | 12.29 | 15.29 | 12.13 | 423 | 28.00 | 32 | 61 |
| 29 | 38.00 | 16.86 | 13.57 | 11.75 | 438 | 34.50 | 29 | 55 |
| 30 | 30.00 | 13.71 | 14.43 | 12.13 | 407 | 28.00 | 34 | 63 |
| 31 | 35.40 | 16.43 | 15.43 | 12.38 | 415 | 29.75 | 31 | 57 |

Para validar que los datos que entrega cada uno de los sensores se usó el equipo de Medición de CO2 DELTAOHM HD37AB1347 y el medidor de partículas en el aire PCE-PQC 13EU que se encuentra a disposición en los Talleres Tecnológicos de la Facultad de Ingeniería en Sistemas Electrónica e Industrial.

En la Figura, se puede observar los equipos que permitieron la validación de los datos entregados por los sensores.




Figura 45 Equipos PCE-PQC 13EU y DELTAOHM HD37AB134

Para validación de las muestras obtenidas por el sensor SDS011 se usó el equipo PCE-PQC 13EU, en la Figura 46, se realiza la configuración inicial donde se configura los parámetros para PM10 y PM2.5 una vez ajustados los parámetros seleccionados en el canal uno el mismo que se usará para las mediciones Figura 47, se comienzan a realizar las respectivas mediciones como se muestra en la Figura 47 .

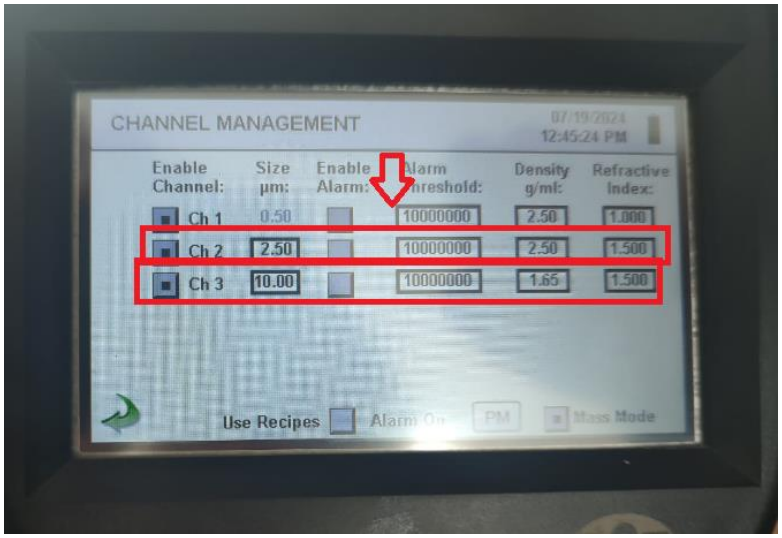



Figura 46. Configuración inicial para medir PM10 y PM2.5




Figura 47. Selección de canal a usar y medición

Como referente este dispositivo puede pasar los datos recolectados hacia la computadora, dando la facilidad de poder almacenarlos e ir haciendo comparaciones con los valores de la estación base desarrollada como se observa en la Figura 48 .

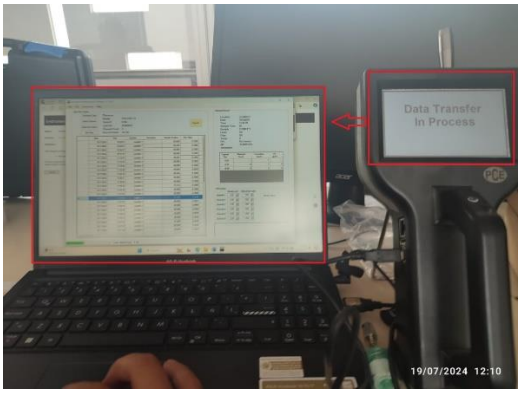



Figura 48.Transferencia de datos hacia el computador

La Figura 49, presenta un diagrama de flujo del programa escrito en Arduino. Comienza con la inicialización del puerto serie (**Configurar Serial**) y la inicialización del sensor de polvo SDS011 (**Inicializar SDS**). Luego, imprime la versión del firmware del sensor (**Imprimir versión firmware**), configura el sensor en modo de informe activo (**Configurar modo informe activo**) y establece un período de trabajo continuo **(Configurar periodo trabajo continuo**). Estos pasos configuran el hardware y el software necesarios para la operación del sensor.

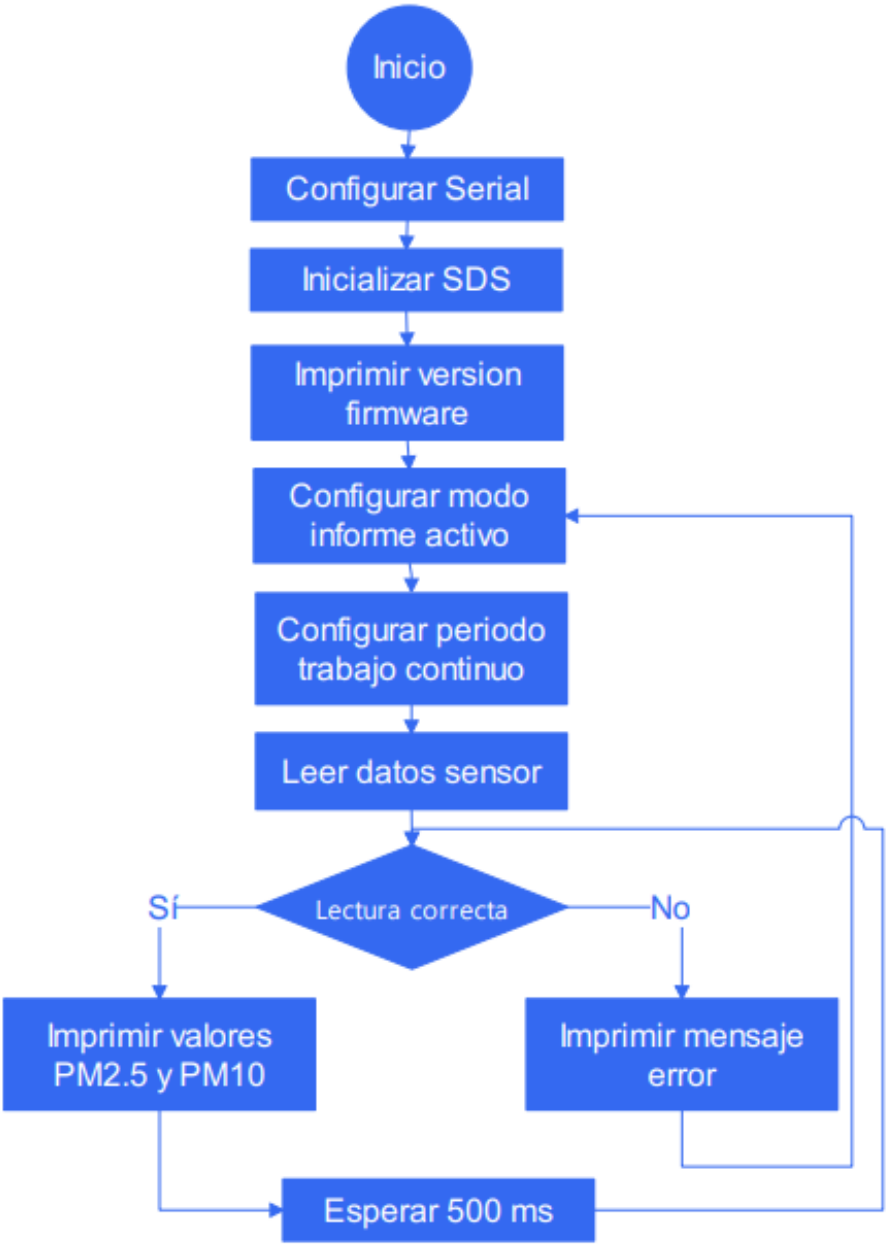



Figura 49. Diagrama de flujo de programación del sensor SDS011

A continuación, el programa entra en un bucle principal (**Bucle principal**) donde realiza lecturas continuas del sensor (**Leer datos sensor**). Si la lectura es correcta (**¿Lectura correcta?**), imprime los valores de PM2.5 y PM10 (**Imprimir valores PM2.5 y PM10**). Si la lectura falla, imprime un mensaje de error (**Imprimir mensaje error**). Después de cada lectura, el programa espera 500 milisegundos (**Esperar 500 ms**) antes de repetir el proceso, asegurando que el sensor tenga tiempo suficiente para realizar la próxima medición.

- ***Comparación de medición***

Después de haber programado y calibrado cada uno de los sensores se toman muestras de cada uno de los sensores , se puede observar que la medición del sensor PCE-PQC 13EU y el sensor SDS 011 tienen una variación mínima de un 0.5% como se observa en la  Figura 50.

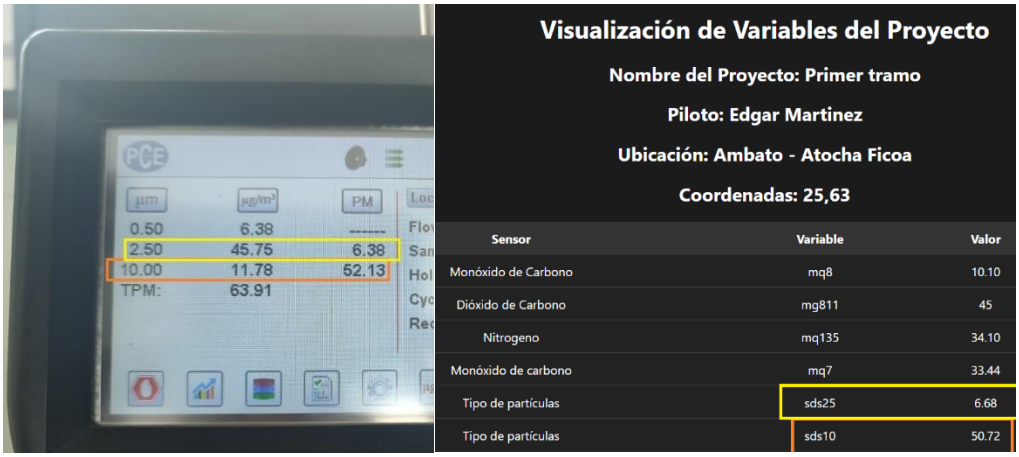



Figura 50. Comparación de datos medidos de PPM

Para la validación de las muestras obtenidas por el sensor MQ135, se utilizó como referencia el equipo DELTAOHM HD37AB134. El proceso de comparación de los valores de los sensores comenzó con el encendido del equipo, como se muestra en la Figura 51, Para asegurar el correcto funcionamiento, se instaló la sonda que permite realizar cada una de las mediciones necesarias. Es fundamental que la sonda esté en condiciones óptimas de funcionamiento Figura 52. Una vez realizada esta verificación, es importante destacar que no se requiere ninguna configuración adicional, ya que el sistema cuenta con una calibración de fábrica, garantizando así la precisión y fiabilidad de los resultados obtenidos, tal como se muestra en la Figura 52.




Figura 51. Pantalla inicial del equipo




Figura 52. Acoplamiento de la sonda y puesta en marcha del equipo

La Figura 53, muestra el diagrama de flujo del proceso de configuración y lectura del sensor de CO2. El diagrama comienza con el inicio del programa, donde se importa la librería necesaria para el sensor de CO2 y se crea un objeto de sensor con parámetros específicos, como el pin de entrada analógico y factores de calibración. En la fase de configuración (setup), el diagrama muestra la inicialización de la comunicación serie

a 9600 baudios, la impresión de un mensaje de inicialización, y la calibración del sensor. Estos pasos preparan el sistema para el funcionamiento adecuado del sensor.

Luego, el diagrama de flujo entra en el bucle principal (loop), donde se realiza la lectura continua del valor del sensor de CO2. En cada iteración del bucle, el valor leído del sensor se imprime en el monitor serie para su visualización. Después de cada lectura, el programa espera 1 segundo antes de repetir el proceso. Este ciclo garantiza que los datos del sensor se actualicen de forma regular y controlada, permitiendo un monitoreo constante y eficiente de la concentración de CO2 en el entorno.

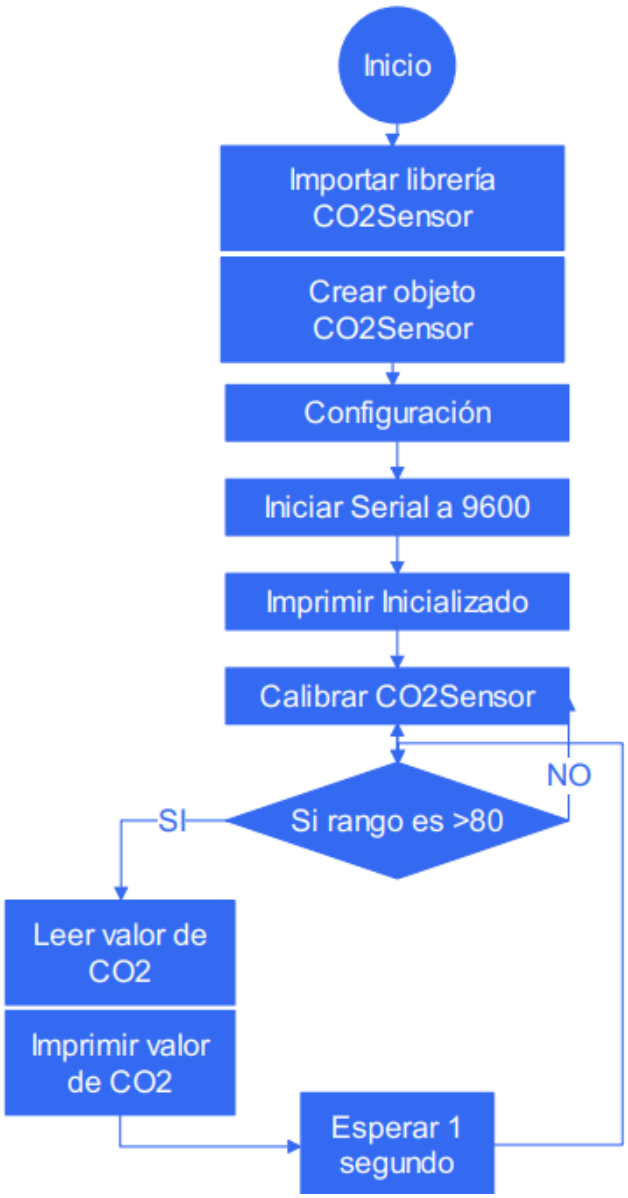



Figura 53. Diagrama de flujo de programación del sensor MQ135

- ***Comparación de medición***

Después de haber programado y calibrado cada uno de los sensores se toman muestras de cada uno de los sensores , se puede observar que la medición del sensor PCE-PQC 13EU y el sensor Mq135 tienen una variación mínima de un 0.6% como se observa en la Figura 54 .

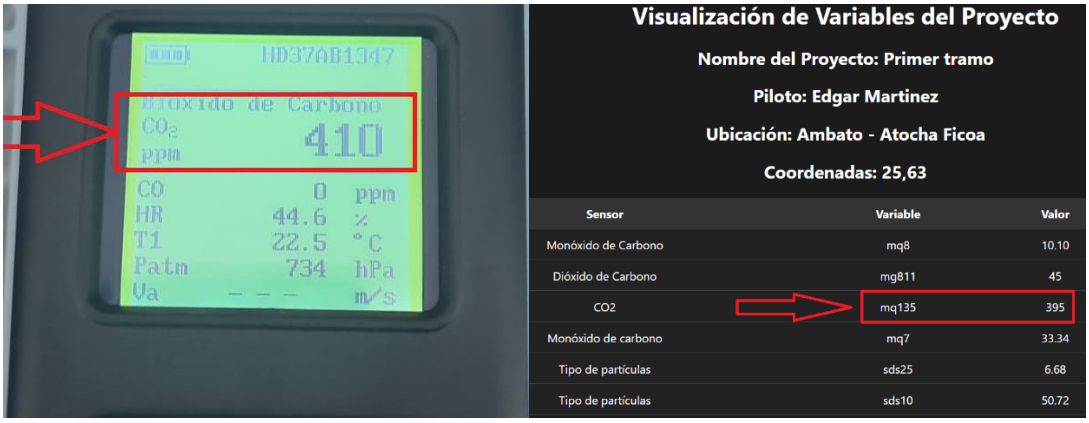



Figura 54. Comparación de los datos medidos CO2

Una vez que se ha validado la fiabilidad de los datos obtenidos por los sensores se procede a realizar las pruebas de comunicación.

Para las pruebas de comunicación inalámbrica: se evaluó la transmisión del esp 32 Lora a otra esp 32 Lora mediante el mismo protocolo punto en donde se verificó la estabilidad que tiene este sistema mediante la comunicación inalámbrica tomando en cuenta las condiciones ambientales en cada nodo.

El alcance que tiene cada uno de los módulos puede variar según diversas condiciones, esto puede ser el clima u obstáculos, sin embargo, se considera que una conexión estable se puede dar entre 1 o 2 km siempre y cuando se tengan línea de vista. Para la comunicación del prototipo se necesita una distancia entre 100 y 300 m con línea de vista de manera que al momento de hacer las pruebas tiene una fiabilidad del 100%.

Al tener una comunicación multipunto se requiere de una sincronización de milisegundos para que no exista colapso en él envió de paquetes y la recepción de paquetes. Para ello se usa una dirección en el nodo principal y 2 direcciones diferentes en el nodo secundario, al momento de que recibe uno secundario el nodo principal el

otro nodo no puede enviar ningún mensaje después de ello se sincroniza con el nuevo tiempo recibido y puede recibir el mensaje del segundo nodo.

***Pruebas de alimentación y batería:*** Se llevó a cabo una evaluación exhaustiva de la operatividad del sistema utilizando una batería de tipo LiPo. Se realizaron pruebas rigurosas para asegurar que el sistema pueda manejar eficazmente las variaciones de voltaje y proteger adecuadamente los componentes electrónicos.

Para estimar la duración operativa de la batería, se empleó 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 una batería de 5.2 Ah y un consumo de corriente de 0.5 A, se estima que el sistema puede operar continuamente durante aproximadamente 76.96 horas.

***Fiabilidad del dispositivo:*** es necesario realizar el cálculo de fiabilidad de un dispositivo ya que este evalúa el desempeño y la precisión que tiene en su recopilación de datos a lo largo del tiempo. Además, no solamente se basa en la estabilidad del prototipo o de los sensores y en la precisión de las mediciones, sino que se basa también en una consistencia y confiabilidad de la comunicación entre los nodos. Para ello se realiza un análisis detallado de cada uno de los registros de los datos, dónde se encuentran patrones y tendencias únicamente con el objetivo de identificar posibles desviaciones y tener segura una medida precisa que tiene de fiabilidad dicho dispositivo en diferentes condiciones operativas.

La fórmula que se detalla para el cálculo de la fiabilidad qué tiene un dispositivo tiene una relación al tiempo total en que el sistema está operando sin fallos y también el tiempo total de observación o prueba, como se presenta en la Ecuación 6.

$$\boldsymbol{R = \frac{t}{MTTF}} \tag{6}$$

Donde:

R representa la confiabilidad del sistema,

e es la base del logaritmo natural,

t corresponde al tiempo total de observación,

MTTF indica el tiempo medio hasta la falla.

Esta fórmula proporciona una estimación de la probabilidad de que el sistema funcione correctamente durante un período específico, considerando el historial de fallas y el tiempo total de observación. Un valor de R más cercano a 1 sugiere una mayor confiabilidad del sistema.

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

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

$$R = 0.9534$$

De este modo, la confiabilidad del sistema sería aproximadamente 0.9534 o 95.34%. Esto sugiere la probabilidad de que el sistema opere correctamente durante un lapso de 24 horas, considerando un tiempo medio hasta la falla (MTTF) de 79.5 horas.

- ***Desarrollo del sistema de monitoreo***

La Figura 55 se muestra el esquema para el desarrollo de la plataforma de monitoreo, se utiliza un servidor en la nube donde se instala y configura la pila LAMP (Linux, Apache, MySQL, PHP). Esta plataforma sirve como base para el procesamiento y

almacenamiento de datos de calidad del aire ambiente recolectados por el sistema, de monitoreo permitiendo que la información sea accesible a través de páginas web. A continuación, se describen los pasos para el desarrollo del sistema:

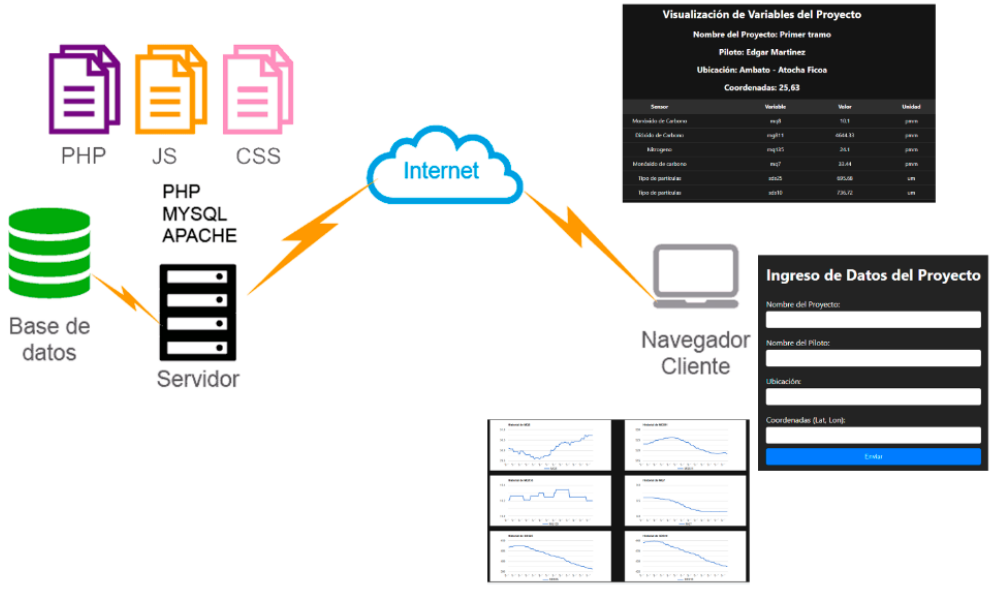



Figura 55. Esquema general del servidor web

***Creación de un servidor en la nube:*** Después de analizar los diferentes servicios de la nube como se muestra en la Tabla 22, se optó por Aws Cloud debido a que se puede incluir cualquier servicio dentro de su plataforma además de las facilidades pago que presta son relevantes en comparación a las demás.

Tabla 22. Comparación de los servidores en la nube

| **Característica** | **Google Cloud Platform (GCP)** | **Amazon Web Services (AWS)** | **Microsoft Azure** |
|---|---|---|---|
| **Servicios** | IA y ML, Big Data, Compute, Storage, Networking | Amplia gama de servicios (200+), Compute, Storage, AI, Big Data, IoT, Networking | Compute, Storage, AI, Big Data, IoT, Networking |
| **Escalabilidad** | Alta, con herramientas de gestión y autoscaling | Alta, autoscaling avanzado | Alta, integración con herramientas de Microsoft |
| **Seguridad** | Certificaciones de seguridad | Amplias certificaciones | Certificaciones globales |
| **Big Data y Análisis** | BigQuery, Dataflow, Dataproc, Pub/Sub | Redshift, Athena, EMR, Kinesis | Azure Synapse, HDInsight, Databricks |
| **Costos** | Competitivos, modelo de pago por uso | Amplia gama de opciones de precios, pago por uso | Flexible, descuentos por uso a largo plazo |

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Disponibilidad** | Alta | Alta, con SLA robustos | Alta, con SLA confiables |
| **Uso** | Interfaces intuitivas, fácil integración con servicios Google | Complejo | Herramientas de Microsoft |

Para el desarrollo de la plataforma de monitoreo en AWS se debe crear una máquina virtual, con Ubuntu 20.04 donde se configuran la memoria RAM, los puertos habilitados y la Ip estática, después de haber configurado todos los parámetros se configura un Ip externa para poder ocupar en todos los servicios tal como se muestra en la Figura 56.

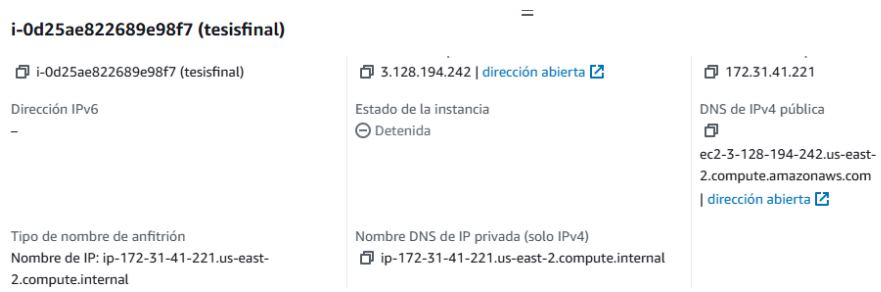



Figura 56: Máquina virtual creada en Aws Cloud

***Instalación servidor LAMP:*** se instala los servicios de Apache, PHP, MySQL en Ubuntu server, de esta manera se podrán alojar los archivos para la página HTML.

***Verificación de la instalación de PHP:*** Para verificar la instalación de PHP se debe crear un documento bajo HTML, el mismo que me muestra las características de PHP instaladas como se muestra en la Figura 57 .

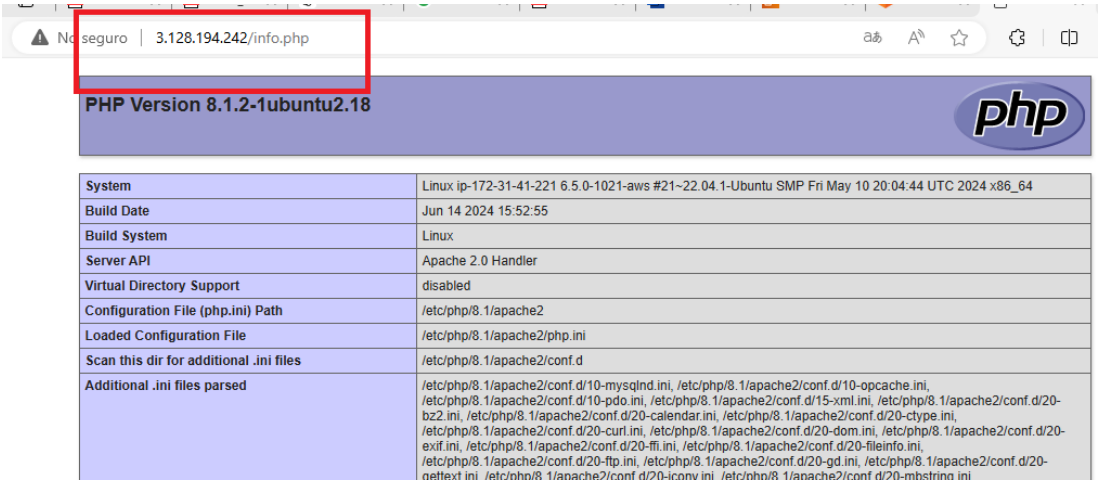



Figura 57. Instalación de PHP

***Verificación de la instalación de MySQL***: para verificar la correcta instalación de MySQL y el estado operativo del sistema, donde se podrá almacenar y manipular toda la información se envía el comando systemctl status mysql como se muestra en la Figura 58.

```
Last login: Mon Jul  1 13:35:49 2024 from 3.16.146.5
ubuntu@ip-172-31-41-221:~$ sudo nano /var/www/html/info.php
ubuntu@ip-172-31-41-221:~$ systemctl status  mysql
● mysql.service - MySQL Community Server
     Loaded: loaded (/lib/systemd/system/mysql.service; enabled; vendor preset: enabled)
     Active: active (running) since Thu 2024-07-04 16:59:09 UTC; 15min ago
   Main PID: 547 (mysqld)
     Status: "Server is operational"
      Tasks: 39 (limit: 1120)
     Memory: 365.7M
        CPU: 4.815s
     CGroup: /system.slice/mysql.service
             └─547 /usr/sbin/mysqld

Jul 04 16:59:04 ip-172-31-41-221 systemd[1]: Starting MySQL Community Server...
Jul 04 16:59:09 ip-172-31-41-221 systemd[1]: Started MySQL Community Server.
```

Figura 58. Estado funcional del servicio MySQL

***Verificación de la instalación de phpmyadmin:*** PhpMyadmin tiene una interfaz gráfica como muestra la Figura 59, de manera que se puede manipular los datos de mejor manera, mediante un navegador WEB.

En el servidor PhpMyAdmin se crea un usuario root con el nombre phpmyadmin el mismo que va a tener el control para poder acceder a cualquiera de los datos al igual que poder borrar o sustituir los valores que se tengan en las bases.




Figura 59. Instalación de Php MyAdmin

Por último, se debe verificar la instalación del bróker Mqtt Mosquitto: Por consola se envía el comando systemctl status mosquitto Figura 60, este bróker ayudar a subir los datos desde los dispositivos Lora hacia la nube

```
Last login: Thu Jul  4 17:02:03 2024 from 3.16.146.3
ubuntu@ip-172-31-41-221:~$ systemctl status mosquitto.service
● mosquitto.service - Mosquitto MQTT Broker
     Loaded: loaded (/lib/systemd/system/mosquitto.service; enabled; vendor preset: enabled)
     Active: active (running) since Thu 2024-07-04 17:26:50 UTC; 3min 33s ago
       Docs: man:mosquitto.conf(5)
             man:mosquitto(8)
    Process: 371 ExecStartPre=/bin/mkdir -m 740 -p /var/log/mosquitto (code=exited, status=0/SUCCESS)
    Process: 391 ExecStartPre=/bin/chown mosquitto:mosquitto /var/log/mosquitto (code=exited, status=0/SUCCESS)
    Process: 393 ExecStartPre=/bin/mkdir -m 740 -p /run/mosquitto (code=exited, status=0/SUCCESS)
    Process: 412 ExecStartPre=/bin/chown mosquitto:mosquitto /run/mosquitto (code=exited, status=0/SUCCESS)
   Main PID: 414 (mosquitto)
      Tasks: 1 (limit: 1120)
     Memory: 2.7M
        CPU: 87ms
     CGroup: /system.slice/mosquitto.service
             └─414 /usr/sbin/mosquitto -c /etc/mosquitto/mosquitto.conf

Jul 04 17:26:49 ip-172-31-41-221 systemd[1]: Starting Mosquitto MQTT Broker...
Jul 04 17:26:50 ip-172-31-41-221 systemd[1]: Started Mosquitto MQTT Broker.
```

Figura 60. Estado del bróker mosquitto

***Verificación de instalación de Node-Red:*** Este software permite la integración de tecnología IoT para el manejo visualización de datos. El sistema consta con una interfaz gráfica como se muestra en la Figura 61, este servidor recibirá los datos por Mqtt para enviarlos hacia la base de datos que posteriormente serán procesados para ser mostrados la interfaz gráfica.

Se debe tomar en cuenta la configuración de cada bloque ya que de ella depende su correcto funcionamiento además de tomar en cuenta las direcciones ips con las que se maneja cada uno de los servicios y por los puertos que se conectan.

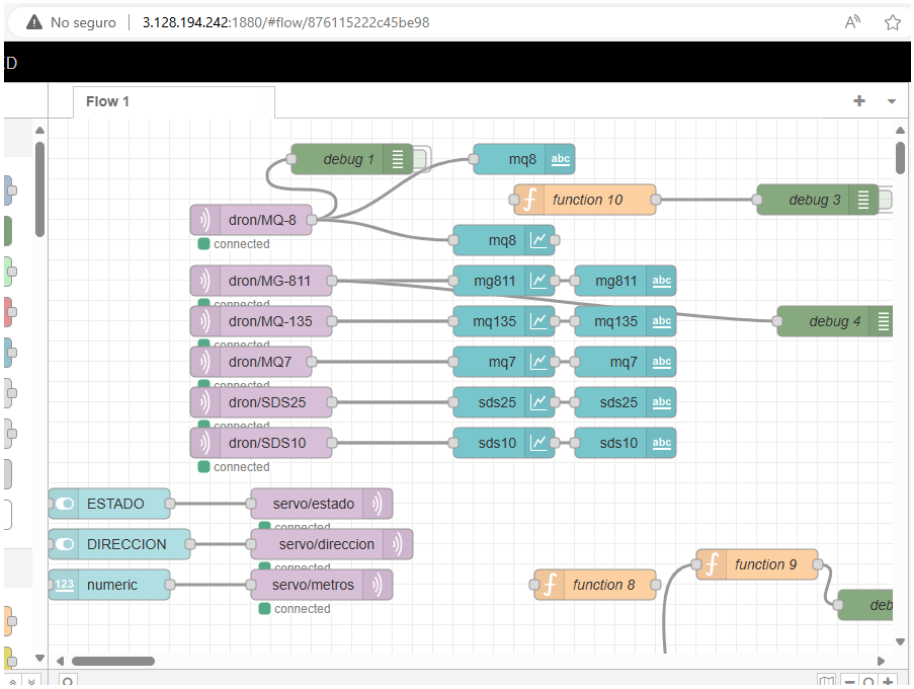



Figura 61. Prueba de funcionamiento de Node-Red

***Creación de la base de datos:*** Se crea las tablas en las bases de datos donde se van a alojar la información adquiera por los sensores en base a un proyecto determinado llamadas sensores y vuelos como se muestra en la Figura 62 y Figura 63.

La Figura 65, muestra la tabla donde guarda los valores de los sensores además de guardar el id del padre para poder concatenar cada uno de los valores ingresados desde Node-Red. La Figura 64, muestra la tabla donde se guarda las características principales para los ingresos de los proyectos.

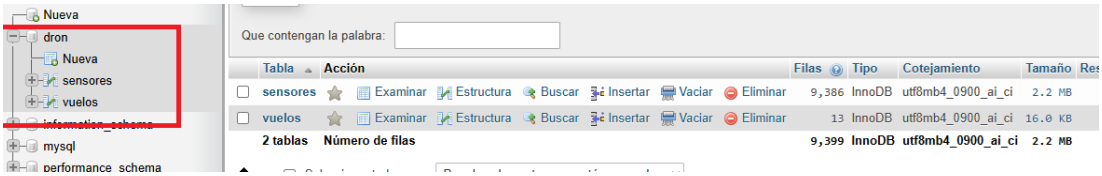



Figura 62. Creación de la base y de las tablas

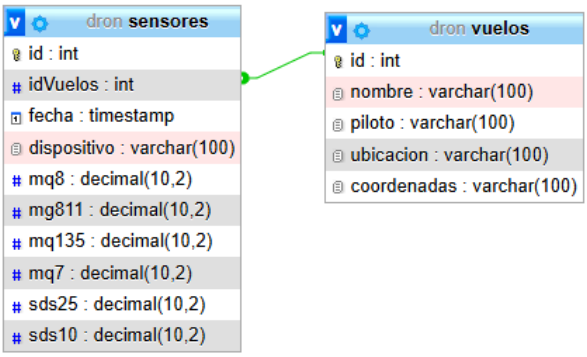



Figura 63. Grafica de la estructura

| | | id | nombre | piloto | ubicacion | coordenadas |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Editar Copiar Borrar | | 1 | prueba | Edgar | Atocha | 20-20 |
| Editar Copiar Borrar | | 67 | Cancha - UTA | Juan Carlos | Huacho | 5 |
| Editar Copiar Borrar | | 68 | Cancha - UTA 2 | Juan Carlos | Huachi | 5 |
| Editar Copiar Borrar | | 75 | TESIS - VUELO 6 | Edgar Martinez | Huachi Loreto | -1.245582, -78.625400 |
| Editar Copiar Borrar | | 76 | TESIS - VUELO 1 | Edgar Martinez | Atocha - Ficoa | -1.245582, -78.625400 |
| Editar Copiar Borrar | | 77 | TESIS - VUELO 1 | Edgar Martinez | Atocha - Ficoa | -1.245582, -78.625400 |
| Editar Copiar Borrar | | 78 | TESIS - VUELO 2 | Edgar Martinez | La Peninsula | -1.245582, -78.625400 |
| Editar Copiar Borrar | | 79 | TESIS - VUELO 3 | Edgar Martinez | La Merced | -1.245582, -78.625400 |
| Editar Copiar Borrar | | 80 | TESIS - VUELO 4 | Edgar Martinez | San Francisco | -1.245582, -78.625400 |
| Editar Copiar Borrar | | 81 | TESIS - VUELO 5 | Edgar Martinez | La Matriz | -1.245582, -78.625400 |
| Editar Copiar Borrar | | 82 | TESIS - VUELO 6 | Edgar Martinez | Huachi Loreto | -1.245582, -78.625400 |
| Editar Copiar Borrar | | 83 | TESIS - VUELO 6 | Edgar Martinez | Huachi Loreto | -1.245582, -78.625400 |
| Editar Copiar Borrar | | 84 | TESIS - VUELO 6 | Edgar Martinez | Huachi Loreto | -1.245582, -78.625400 |

Figura 64.Tabla de vuelos

+ Opciones

| | id | idVuelos | fecha | dispositivo | mq8 | mg811 | mq135 | mq7 | sds25 | sds10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Editar Copiar Borrar | 30834 | 67 | 2024-06-27 19:43:23 | nodo1 | 0.00 | 15653.71 | 37.70 | 10.48 | 4.78 | 5.12 |
| Editar Copiar Borrar | 30835 | 67 | 2024-06-27 19:43:24 | nodo1 | 0.00 | 15653.71 | 37.70 | 10.48 | 4.78 | 5.12 |
| Editar Copiar Borrar | 30836 | 67 | 2024-06-27 19:43:25 | nodo1 | 0.00 | 15653.71 | 37.70 | 10.48 | 4.78 | 5.12 |
| Editar Copiar Borrar | 30837 | 67 | 2024-06-27 19:43:26 | nodo1 | 0.00 | 15653.71 | 37.70 | 10.48 | 4.78 | 5.12 |
| Editar Copiar Borrar | 30838 | 67 | 2024-06-27 19:43:27 | nodo1 | 0.00 | 15920.20 | 37.96 | 10.67 | 4.77 | 5.11 |
| Editar Copiar Borrar | 30839 | 67 | 2024-06-27 19:43:29 | nodo1 | 0.00 | 15920.20 | 37.96 | 10.67 | 4.77 | 5.11 |
| Editar Copiar Borrar | 30840 | 67 | 2024-06-27 19:43:29 | nodo1 | 0.00 | 16178.19 | 35.62 | 10.71 | 4.77 | 5.10 |
| Editar Copiar Borrar | 30841 | 67 | 2024-06-27 19:43:30 | nodo1 | 0.00 | 16178.19 | 35.62 | 10.71 | 4.77 | 5.10 |

Figura 65.Tabla sensores

***Programación de los bloques en Node-Red***: La Figura 66, muestra el bloque correspondiente a la entrada de mqtt “test”, luego se pasa los datos por JSON para que sean procesados por function 6, la cual contiene una función para el envío de los datos a la base como se muestra en la Figura 67.

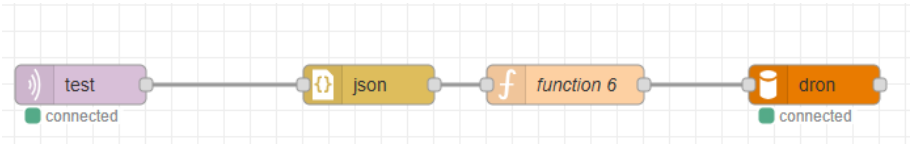



Figura 66. Estructura general del bloque 1

```
1  // JSON recibido en el mensaje
2  var payload = msg.payload;
3
4  // Construcción de la consulta SQL
5  var query = "INSERT INTO sensores (idVuelos, fecha, dispositi
6  query += payload.idvuel + "','";
7  query += new Date().toISOString().slice(0, 19).replace('T', '
8  query += payload.DEVICE + "','";
9  query += payload.mq8 + "','";
10 query += payload.mg811 + "','";
11 query += payload.mq135 + "','";
12 query += payload.mq7 + "','";
13 query += payload.sds25 + "','";
14 // Eliminar caracteres especiales como \r\n de sds10
15 query += payload.sds10.replace(/[\r\n]+/g, '') + "')";
16
```

Figura 67. Programación de Fuction para el envío de datos hacia MySQL

En la Figura 68, muestra la conexión de Node-Red hacia la base de datos.

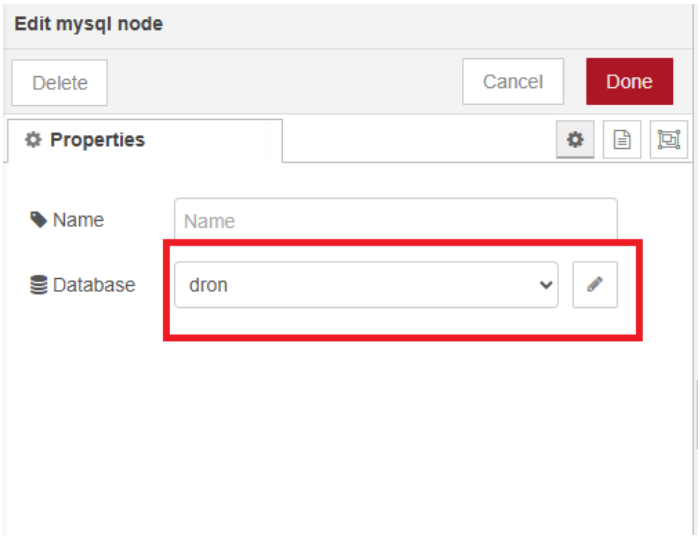



Figura 68.Conexión a la base de datos dron

La Figura 69, muestra a la estructura del bloque dos. Cada uno de los bloques se suscriben a los tópicos servo/estado este envía la información de encendido y/o apagado hacia el dron, servo/dirección este envía el control de subida y bajada y por último el tópico servo metros envía la cantidad de metros que puede bajar el sistema en su totalidad.

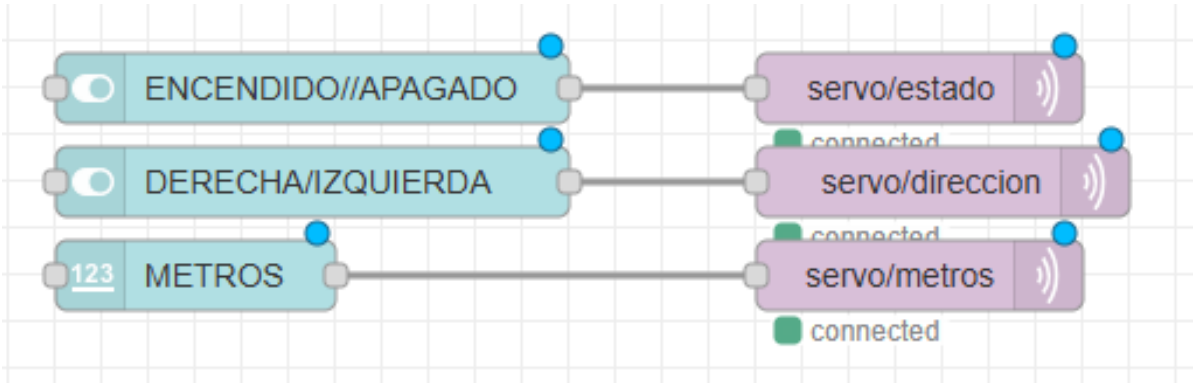



Figura 69.Esquema general del bloque 2

En la Figura 70, muestra la cadena de datos recibido desde el nodo esclavo con la dirección 0x3, los mismos que son publicados mediante Mqtt y visualizados en la página de html.

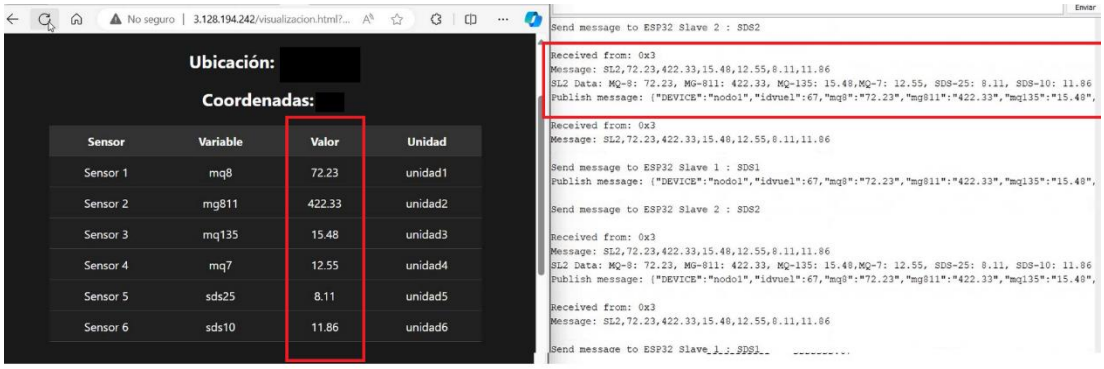



Figura 70. Recepción desde nodo esclavo y publicación de datos mediante mqtt, visualización en la página Html

Después de haber recolectado datos con los sensores y almacenarlos en la base de datos se presenta una página de visualización como se muestra en la Figura 71, donde se puede observar los campos relevantes de etiqueta como son nombre del proyecto, nombre del piloto, ubicación y coordenadas. Para la presentación de los datos se puede observar gráficamente cómo varía a lo largo del tiempo los sensores.




Figura 71.Historial y graficas de los sensores

Con los datos obtenidos de las mediciones realizadas por el sistema de monitoreo se pretende a caracterizar cada una de las mediciones en función de los parámetros indicados en la hoja de datos de cada uno de los sensores para validar la comparación de los datos obtenidos se analizó la norma de calidad del aire ambiente y el acuerdo

No 050 del ministerio del ambiente donde se valida la Tabla 23 , que servirá para realizar el análisis de los datos recolectados por la estación desarrollada .

Tabla 23. Rangos mínimos medios y máximos de los sensores usados en la estación desarrollada

| **MQ8** | |
|---|---|
| Concentración de H2 (ppm) | Clasificación de Seguridad |
| 0 - 100 | Seguro |
| 101 - 500 | Bajo riesgo |
| 501 - 2000 | Moderado riesgo |
| 2001 - 5000 | Riesgo considerable |
| > 5000 | Peligroso |
| **MQ135** | |
| Concentración de Gas (ppm) | Clasificación de Calidad del Aire |
| 0 - 50 | Excelente |
| 51 - 100 | Bueno |
| 101 - 200 | Regular |
| 201 - 500 | Pobre |
| **Mq7** | |
| Rango de Detección y Clasificación Concentración de CO (ppm) | Clasificación de Seguridad |
| 0 - 9 | Seguro |
| 1O - 9 | Bajo riesgo |
| 51 - 50 | Moderado riesgo |
| 101 - 200 | Riesgo considerable |
| 201 - 400 | Peligroso |
| 401 - 800 | Muy peligroso |
| > 800 | Mortal |
| **SDS25** | |
| Concentración de PM2.5 (µg/m³) | Clasificación de Calidad del Aire |
| 0 - 12 | Bueno |
| 13 - 35 | Moderado |
| 36 - 55 | No saludable para grupos sensibles |
| 56 - 150 | No saludable |
| 151 - 250 | Muy no saludable |
| > 250 | Peligroso |
| **SDS10** | |
| Concentración de PM10 (µg/m³) | Clasificación de Calidad del Aire |
| 0 - 54 | Bueno |
| 55 - 154 | Moderado |
| 155 - 254 | No saludable para grupos sensibles |
| 255 - 354 | No saludable |
| 355 - 424 | Muy no saludable |
| > 425 | Peligroso |

***Pruebas de funcionamiento***

Una vez que se comprobó el estado de todo el sistema, así como su correcto funcionamiento se han desarrollado las pruebas en diferentes puntos de la ciudad de Ambato. Para la realización de las pruebas se debe tomar en cuenta los siguientes aspectos.

***Planificación de vuelos***

Se ha tomado en cuenta a parroquias de Huachi Chico denotada por el color rosa, Atocha ficoa denotado por el color verde, San Francisco denotado por el color gris claro, La merced denotada por el color celeste, como se presenta en la Figura 72.

Por otro lado, es importante mencionar que cada una de estas parroquias fue seleccionada no solo por su diversidad geográfica y funcional, sino también por su representatividad de los distintos niveles de actividad humana y natural que influyen en la calidad del aire.

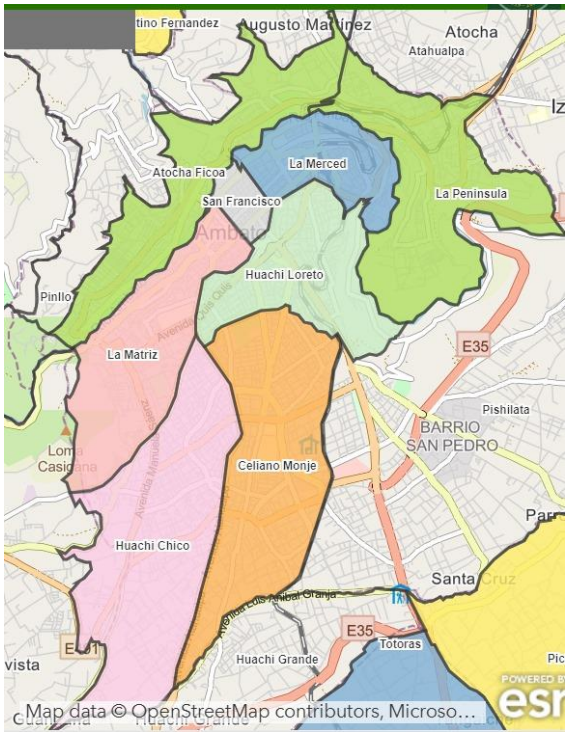



Figura 72. Zonas céntricas de la ciudad de Ambato

- ***Vuelo: Huachi***

Las pruebas principales del prototipo se realizaron en los predios de la Universidad Técnica de Ambato las cual está ubicada en la parroquia Huachi Chico, Figura 73 .

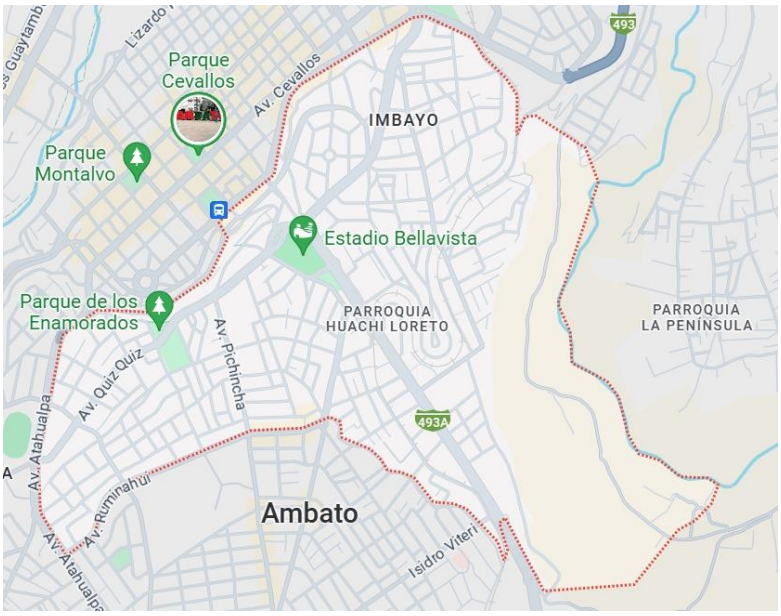



Figura 73. Delimitación de la parroquia Huachi

Una vez que se ha identificado la zona de análisis se procede a crear el proyecto para los cual se debe agregar información como: Nombre del Proyecto, Nombre del Piloto, Ubicación y coordenadas como se muestra en la Figura 74.




Figura 74. Ingreso de datos para vuelo

Una vez que se ha ingresado los datos se procede a visualizar los datos en tiempo real de los sensores listos para la toma de datos. Cabe mencionar que los sensores se deben calentar previamente un máximo de 30 minutos antes de las pruebas, con la finalidad de que los datos sean más precisos. De esta manera el sistema está listo para realizar las pruebas requeridas de muestreo de calidad del aire en diferentes puntos de la zona de estudio. El valor final de la calidad del aire se consigue a través de una media de los valores obtenidos en los puntos de medición en un lapso de 5 minutos dando un tiempo total de vuelo de aproximadamente 25 con cinco muestras de la zona de estudio.

El levantamiento de la información empieza con el acople de la estación de monitoreo de aire ambiente al dron. Posteriormente como se ha descrito en el Capítulo anterior se realiza la calibración del dron en base al nuevo peso añadido por el sistema de monitoreo de calidad de aire ambiente, Figura 75.

Estos vuelos de prueba también permiten ajustar cualquier desbalance y optimizar la configuración del dron para obtener datos de alta calidad durante las misiones de monitoreo reales.



Figura 75: Inicio del vuelo

Como se observa en la Figura 76, el hexacóptero se eleva a una distancia no mayor de 15 metros, debido a que las muestras de calidad de aire ambiente se deben realizar a

una altura de 2 metros sobre el nivel del suelo ya que este es el aire que es inhalado por las personas.




Figura 76: Dron acoplado y ascendiendo

Una vez que el dron se encuentra estabilizado y en su modo de vuelo es manual se procede a enviar la señal hacia el servo motor con la finalidad de que se empiece a bajar el sistema de monitoreo a una altura inferior a los 2 metros y puede realizar el muestreo del aire en la zona indicada, como se puede observar en la Pasado los cinco minutos de muestreo del aire en la zona determinada se envía en comando para que el sistema de monitoreo vuelva a su posición inicial para iniciar el aterrizaje del hexacótero. En la Figura 77, se puede observar como el mecanismo de ascenso permite que la estación de monitores regrese a su posición inicial.



Figura 77: Descenso del sistema de monitoreo para recolección de datos

Pasado los cinco minutos de muestreo del aire en la zona determinada se envía en comando para que el sistema de monitoreo vuelva a su posición inicial para iniciar el aterrizaje del hexacótero. En la Figura 78, se puede observar como el mecanismo de ascenso permite que la estación de monitores regrese a su posición inicial.



Figura 78. Ascenso del sistema y acoplamiento al Dron

Por último, una vez que el sistema ha regresado a su posición inicial se puede realizar el aterrizaje del Dron. Cabe mencionar que el monitoreo de las variables de la calidad el aire se realiza en tiempo real y se pueden visualizar en la plataforma de monitoreo alojada en la nube lo que permite tener un monitoreo constante de cómo se comporta cada una de la variables medidas.

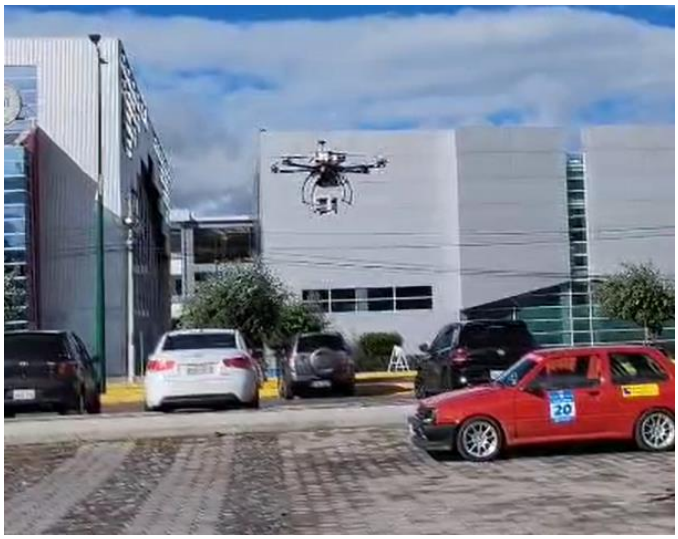


Figura 79. Estabilización del dron con el sistema de monitoreo para el aterrizaje

En las Figura 80,Figura 81,Figura 82,Figura 83 , se puede observar la gráfica de las variables en tiempo real durante el vuelo del dron y el monitoreo del sistema de calidad de aire ambiente.




Figura 80.Variación del sensor Mq-8

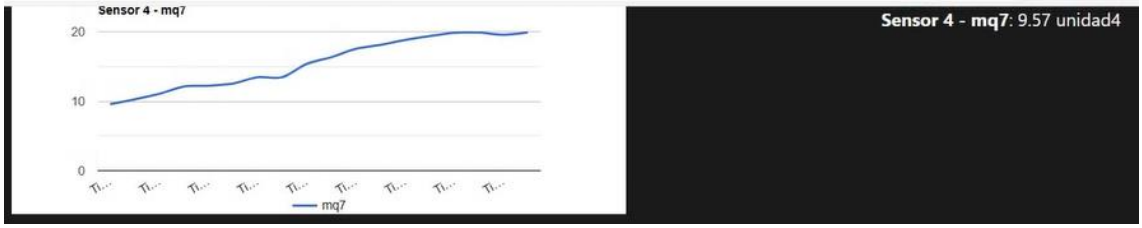



Figura 81. Variación del sensor Mq-7

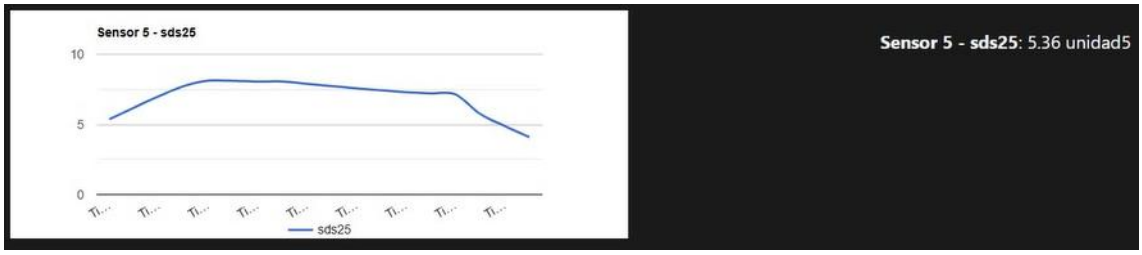



Figura 82. Variación del sensor Sds2,5

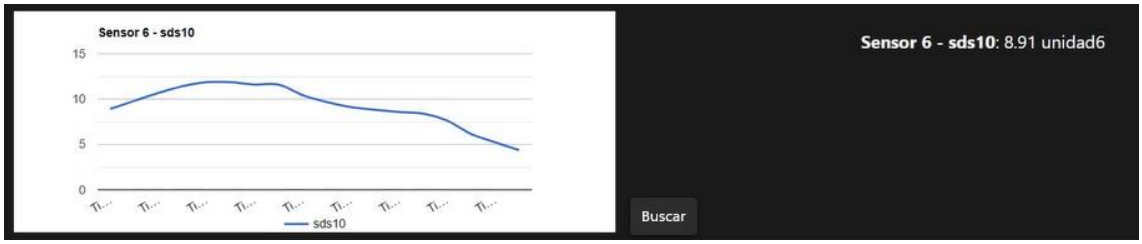



Figura 83.Variación del sensor Sds10

Para el análisis final del sistema se procede a consultar el historial de medición para lo cual se selecciona el proyecto lo que permite visualizar las tomas de datos de la zona de estudio. Proporcionando la información adecuada para la toma de decisiones en

base a las muestras realizadas con el sistema, Cabe mencionar que a pesar de que los sensores han sido linealizados en base a dispositivos comerciales estos dispositivos permiten el análisis de datos en interiores lo que puede variar la captura de datos para los sistemas de medición de calidad de aire ambiente Figura 71.

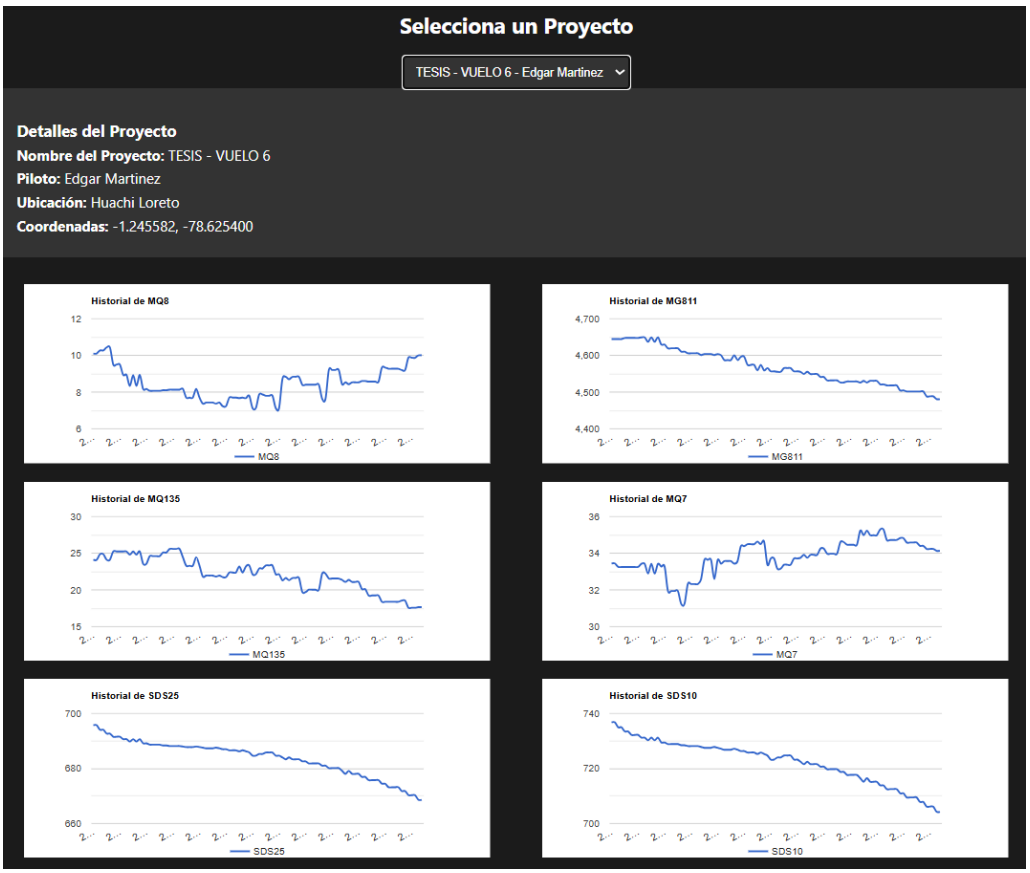



Figura 84.Historial de los datos

Para disponer de un adecuado monitoreo de la calidad del aire en diferentes zonas urbanas de la ciudad de Ambato, es fundamental analizar y comparar los datos obtenidos de diversos sensores, con la finalidad de comprender el comportamiento de las variaciones de contaminación atmosférica. En los siguientes párrafos se presenta un historial de las pruebas realizadas en 4 sectores urbanos de la ciudad, la información obtenida por el sistema de monitoreo de la calidad del aire ambiente proporciona una visión integral de su calidad, permitiendo una evaluación precisa del estado ambiental en cada sector de la ciudad de Ambato. Al comparar los datos entre sectores, se pueden identificar áreas con mayores niveles de contaminación y evaluar la necesidad de implementar medidas correctivas para mejorar la calidad del aire.

Una de las primeras pruebas se realizó en la parroquia Atocha-Ficoa en las coordenadas -1.245582, -78.625400. El lugar de estudio se caracterizó por tener un tránsito vehicular medio alto junto a un jardín botánico y delimitado por el rio Ambato. En las gráficas obtenidas por el sistema de monitoreo de calidad aire ambiente en base al historial, se puede observar que los parámetros medidos presentan datos estables, los cuales varían de mayor a menor forma según el muestreo de los datos como se muestra en la Figura 85 .

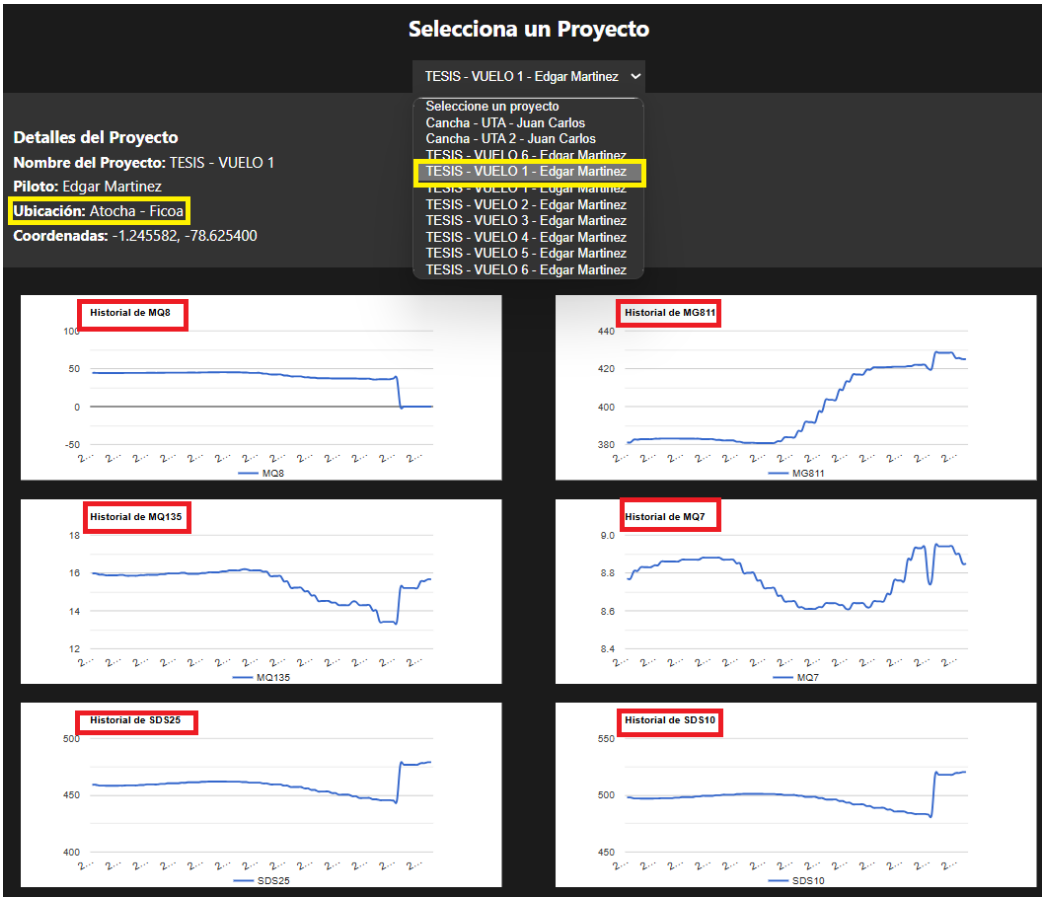



Figura 85. Historial Atocha – Ficoa

En el análisis de los datos se puede observar que la toma de datos refleja una calidad de aire ambiente buena, ya que el sensor de hidrógeno muestra un rango de valores buenos, el sensor de dióxido de carbono presenta un promedio de valores excelentes, el sensor de monóxido de carbono presenta un promedio de valores buenos y el sensor de partículas en PM2.5 presenta un promedio de valores buenos y PM10 presenta un promedio de valores moderados como se muestra en la,  todos estos rangos de valores

se corroboran con los índices mínimos promedios y máximos de cada sensor según su la tabla Tabla 24. Comparación de datos en diferentes tiempos.

Tabla 24. Comparación de datos en diferentes tiempos

| Gas Detectado | Valor Máx. | Clasificación Máximo | Valor Mín. | Clasificación Mínimo | Valor Prom | Clasificación Promedio |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Hidrógeno (H2) | 75.35 ppm | **Bueno** | 32.03 ppm | **Bueno** | 39.12 ppm | **Bueno** |
| | 58.17 ppm | **Bueno** | 23.15 | **Bueno** | 32.25 ppm | **Bueno** |
| CO2 | 16.12 ppm | **Excelente** | 4.72 ppm | **Excelente** | 11.08 ppm | **Excelente** |
| | 14.25 ppm | **Excelente** | 4.22 ppm | **Excelente** | 10.05 | **Excelente** |
| Monóxido de Ca (CO) | 9.58 ppm | **Bueno** | 8.57 ppm | **Bueno** | 8.99 ppm | **Bueno** |
| | 8.35 ppm | **Bueno** | 5.12 ppm | **Bueno** | 6.49 ppm | **Bueno** |
| PM2.5 | 33 µg/m³ | **Moderado** | 14 µg/m³ | **Moderado** | 19 µg/m³ | **Moderado** |
| | 25 µg/m³ | **Moderado** | 11 µg/m³ | **Bueno** | 12µg/m³ | **Bueno** |
| PM10 | 150 µg/m³ | **Moderado** | 58 µg/m³ | **Moderado** | 89 µg/m³ | **Moderado** |
| | 99 µg/m³ | **Moderado** | 25 µg/m³ | **Bueno** | 38 µg/m³ | **Bueno** |

La segunda prueba se realizó en la parroquia La Merced en las coordenadas 1.2335759969421816, -78.62005772130375. El lugar de estudio se caracterizó por tener un tránsito vehicular alto además de alta afluencia de personas debido a que se encuentra un mercado popular dentro de la zona analizada. En las gráficas obtenidas por el sistema de monitoreo de calidad aire ambiente en base al historial, se puede observar que los parámetros medidos presentan datos con varias fluctuaciones, los cuales varían de mayor a menor forma según el muestreo de los datos como se muestra en la Figura 86 .

En el análisis de los datos se puede observar que la toma de datos refleja una calidad de aire ambiente moderada, ya que el sensor de hidrógeno muestra un rango de valores buenos, el sensor de dióxido de carbono presenta un promedio de valores buenos, el sensor de monóxido de carbono presenta un promedio de valores buenos, el sensor de partículas en PM2.5 presenta un promedio de valores moderados y PM10 presenta un promedio de valores moderados como se muestra en la, todos estos rangos de valores

se corroboran con los índices mínimos promedios y máximos de cada sensor según su la tabla Tabla 25.

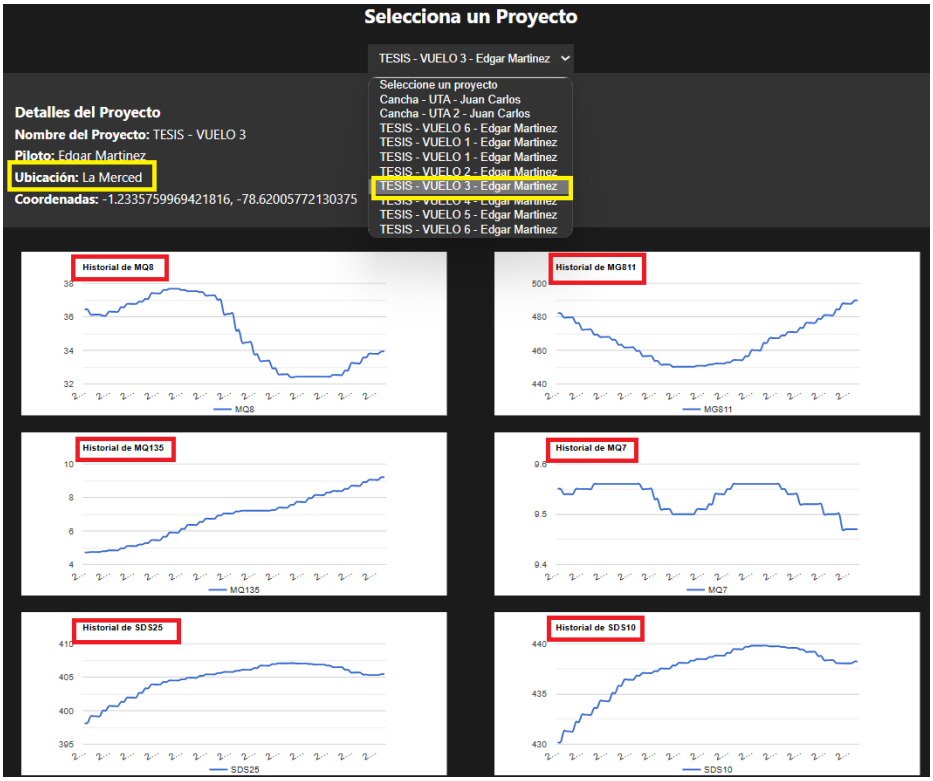



Figura 86.Historial la Merced

Tabla 25. Comparación de datos en diferentes tiempos

| Gas Detectado | Valor Máx. | Clasificación Máximo | Valor Mín. | Clasificación Mínimo | Valor Prom | Clasificación Promedio |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Hidrógeno (H2) | 52.10 ppm | **Bueno** | 32.57 ppm | **Bueno** | 38 ppm | **Bueno** |
| | 45.15 ppm | **Bueno** | 25.25 ppm | **Bueno** | 30.25 ppm | **Bueno** |
| CO2 | 88.12 ppm | **Bueno** | 59.9 ppm | **Bueno** | 69.28 ppm | **Bueno** |
| | 99.25 ppm | **Bueno** | 51.6 ppm | **Bueno** | 78.45 ppm | **Bueno** |
| Monóxido de Ca (CO) | 11.4 ppm | **Bueno** | 8.96 ppm | **Bueno** | 10.31 ppm | **Bueno** |
| | 10.02p pm | **Bueno** | 7.50 ppm | **Bueno** | 9 ppm | **Bueno** |
| PM2.5 | 56 µg/m³ | **Moderado** | 50 µg/m³ | **Moderado** | 52 µg/m³ | **Moderado** |
| | 50 µg/m³ | **Moderado** | 40 µg/m³ | **Bueno** | 45 µg/m³ | **Bueno** |
| PM10 | 49 µg/m³ | **Moderado** | 45 µg/m³ | **Moderado** | 47 µg/m³ | **Moderado** |
| | 45 µg/m³ | **Moderado** | 40 µg/m³ | **Bueno** | 43 µg/m³ | **Bueno** |

La tercera prueba se realizó en la parroquia La Matriz en las coordenadas -1.25454313657411, -78.64025564232688. El lugar de estudio se caracterizó por tener un tránsito vehicular medio junto a poca afluencia de personas en las calles. En las gráficas obtenidas por el sistema de monitoreo de calidad aire ambiente en base al historial, se puede observar que los parámetros medidos presentan datos muy cambiantes, los cuales varían de mayor a menor forma según el muestreo de los datos como se muestra en la Figura 87 .

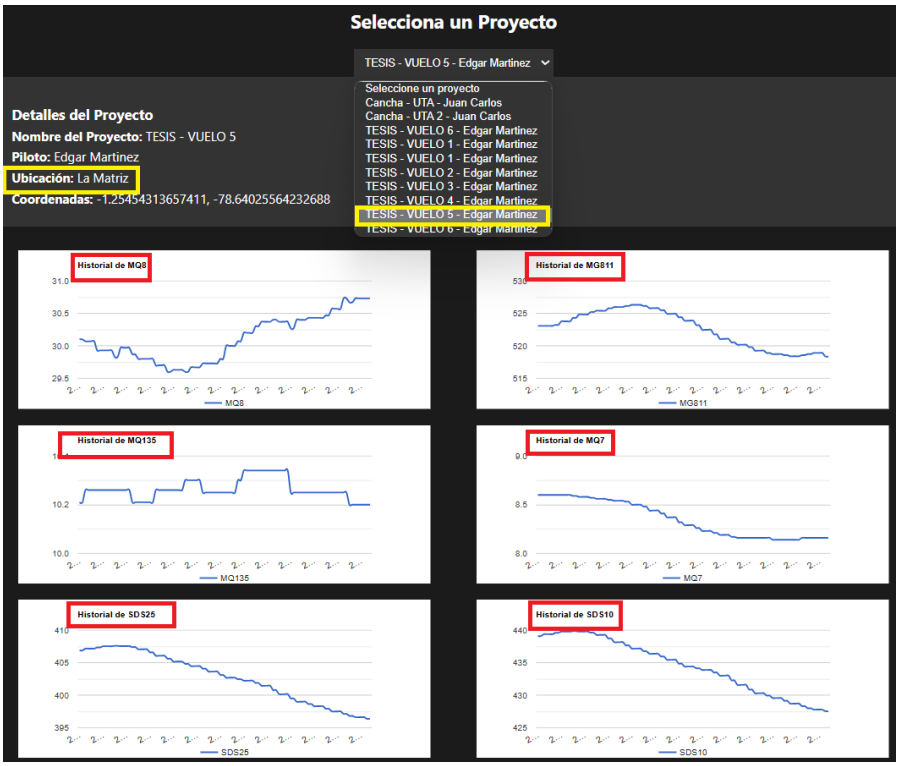



Figura 87.Historial de La Matriz

En el análisis de los datos se puede observar que la toma de datos refleja una calidad de aire ambiente buena, ya que el sensor de hidrógeno muestra un rango de valores buenos, el sensor de dióxido de carbono presenta un promedio de valores excelentes, el sensor de monóxido de carbono presenta un promedio de valores buenos y el sensor de partículas en PM2.5 presenta un promedio de valores buenos y PM10 presenta un promedio de valores moderados como se muestra en la,  todos estos rangos de valores se corroboran con los índices mínimos promedios y máximos de cada sensor según su la Tabla 26.

Tabla 26. Comparación de datos en diferentes tiempos

| Gas Detectado | Valor Máx. | Clasificación Máximo | Valor Mín. | Clasificación Mínimo | Valor Prom | Clasificación Promedio |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Hidrógeno (H2) | 49.50 ppm | **Bueno** | 7.13 ppm | **Bueno** | 26.42 ppm | **Bueno** |
| | 40.12 ppm | **Bueno** | 8.55 ppm | **Bueno** | 35.25 ppm | **Bueno** |
| CO2 | 31.81 ppm | **Excelente** | 10.1 ppm | **Excelente** | 13.99 ppm | **Excelente** |
| | 30.35 ppm | **Excelente** | 9.55 ppm | **Excelente** | 12.78 ppm | **Excelente** |
| Monóxido de Ca (CO) | 35.42 ppm | **Bueno** | 6.03 ppm | **Bueno** | 15.34 ppm | **Bueno** |
| | 32.52 ppm | **Bueno** | 5.95 ppm | **Bueno** | 14.10 ppm | **Bueno** |
| PM2.5 | 33 µg/m³ | **Moderado** | 15 µg/m³ | **Moderado** | 18 µg/m³ | **Moderado** |
| | 8 µg/m³ | **Moderado** | 4 µg/m³ | **Moderado** | 6 µg/m³ | **Moderado** |
| PM10 | 150 µg/m³ | **Moderado** | 59 µg/m³ | **Moderado** | 78 µg/m³ | **Moderado** |
| | 12 µg/m³ | **Moderado** | 6 µg/m³ | **Moderado** | 9 µg/m³ | **Moderado** |

La última prueba se realizó en la parroquia Huachi en las coordenadas -1.2702857947645019, -78.62777513229969. El lugar de estudio se caracterizó por estar dentro de una institución educativa específicamente la pista atlética de la Universidad Técnica de Ambato Campus Huachi. En las gráficas obtenidas por el sistema de monitoreo de calidad aire ambiente en base al historial, se puede observar que los parámetros medidos presentan datos estables, los cuales varían de mayor a menor forma según el muestreo de los datos como se muestra en la Figura 88 .

En el análisis de los datos se puede observar que la toma de datos refleja una calidad de aire ambiente buena, ya que el sensor de hidrógeno muestra un rango de valores buenos tanto en el día como en la noche, el sensor de dióxido de carbono presenta un promedio de valores excelentes durante el día y durante la noche, el sensor de monóxido de carbono presenta un promedio de valores buenos en los dos horarios y el sensor de partículas en PM2.5 presenta un promedio de valores buenos y PM10 presenta un promedio de valores bueno durante el día y la noche, como se muestra en la, todos estos rangos de valores se corroboran con los índices mínimos promedios y máximos de cada sensor según su Tabla 27 Comparación de datos en diferentes tiempos.

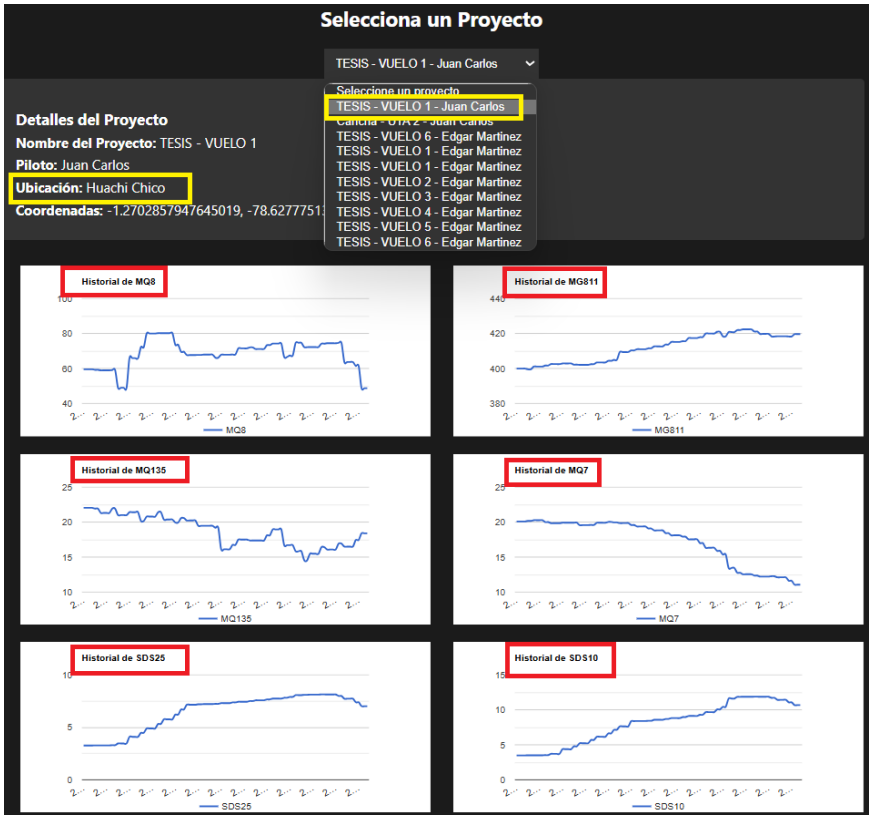



Figura 88. Historial de Huachi Chico

Tabla 27 Comparación de datos en diferentes tiempos

| Gas Detectado | Valor Máx. | Clasificación Máximo | Valor Mín. | Clasificación Mínimo | Valor Prom | Clasificación Promedio |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Hidrógeno (H2) | 56 ppm | **Bueno** | 32.40 ppm | **Bueno** | 37.63 ppm | **Bueno** |
| | 42.45 ppm | **Bueno** | 12 ppm | **Bueno** | 29.56 ppm | **Bueno** |
| CO2 | 15.18 ppm | **Excelente** | 4.72 ppm | **Excelente** | 9.86 ppm | **Excelente** |
| | 12.45 | **Excelente** | 4.45 ppm | **Excelente** | 7.59 ppm | **Excelente** |
| Monóxido de Ca (CO) | 10.37 ppm | **Bueno** | 8.46 ppm | **Bueno** | 9.13 ppm | **Bueno** |
| | 9.86 ppm | **Bueno** | 8.45 ppm | **Bueno** | 9.12 ppm | **Bueno** |
| PM2.5 | 10 µg/m³ | **Bueno** | 5 µg/m³ | **Bueno** | 7 µg/m³ | **Bueno** |
| | 8 µg/m³ | **Bueno** | 4 µg/m³ | **Bueno** | 6 µg/m³ | **Bueno** |
| PM10 | 15 µg/m³ | **Bueno** | 8 µg/m³ | **Bueno** | 11 µg/m³ | **Bueno** |
| | 12 µg/m³ | **Bueno** | 6 µg/m³ | **Bueno** | 9 µg/m³ | **Bueno** |

### 3.6.5 Procesamiento y evaluación de los datos obtenidos

En el análisis estadístico se toma en cuenta los 15000 datos recopilados en el sistema de monitoreo dependiendo de cada una de las zonas monitoreadas con anterioridad, se empleó el software Minitab para obtener el desarrollo estadístico sobre la situación del aire ambiente en la ciudad de Ambato. La versatilidad del software facilitó el uso de varios métodos estadísticos coma uno de ellos son el cálculo de medidas de tendencia central, varianza coma la desviación estándar además también la función de autocorrelación. Estos análisis permitieron ver los patrones temporales además de identificar cuál es la tendencia y evaluar qué consistencia tienen las mediciones a lo largo del tiempo punto la utilización de este software da una perspectiva cercana a la variabilidad de cada uno de los factores químicos, contribuyendo así a una comprensión más profunda de la calidad del aire en la parte céntrica de la ciudad de Ambato.

***Mediana*** :La mediana es una medida estadística que sirve para identificar la tendencia central de un conjunto de datos, siendo menos sensible a valores extremos o atípicos en comparación con la media aritmética. Esta se determina ubicando el valor central de un conjunto de datos ordenados.

Mediana de NO2: 33.9655

Mediana de NO: 14.2806

Mediana de SO2: 14.2758

Mediana de CO: 11.8798

Mediana de CO2: 415.097

Mediana de O3: 28.7744

Mediana de PM2.5: 13.75

Mediana de PM10: 21.3

***Desviación Estándar:*** La desviación estándar es una métrica utilizada para evaluar la dispersión de un conjunto de datos en relación con su media. Esta medida nos indica cuán alejados están los valores individuales del promedio del conjunto de datos. Es crucial en el análisis de calidad del aire, ya que permite entender la consistencia de las mediciones realizadas en diferentes tiempos y ubicaciones. Una baja desviación estándar sugiere menor variabilidad, mientras que una alta indica mayor dispersión en las concentraciones de los componentes químicos.

Desviación estándar de NO2: 2.36544

Desviación estándar de SO2: 1.68349

Desviación estándar de CO: 0.394154

Desviación estándar de CO2: 14.5959

Desviación estándar de O3: 3.69173

Desviación estándar de PM2.5: 3.25

Desviación estándar de PM10: 3.59

***Varianza:*** La varianza se define como una métrica que cuantifica el grado de dispersión de los datos en relación con su media. Se utiliza para evaluar la magnitud de las variaciones en las mediciones de calidad del aire. Comprender la varianza es esencial para evaluar la estabilidad de los resultados obtenidos.

En la Tabla 28, se observa como hay un cambio de valores y la varianza la misma que nos ayuda a entender qué separación tiene un valor de la otra independencia a la media de los conjuntos de los datos además ofrece una perspectiva detallada de qué estos valores se desvían de la media.

Tabla 28. Valores de la varianza de todos los sensores

| Variable | N | Desviación Estándar | Varianza |
|---|---|---|---|
| NO2 | 14898 | 2.37 | 5.60 |
| NO | 14898 | 1.68 | 2.83 |
| SO2 | 14898 | 1.68 | 2.83 |
| CO | 14898 | 0.394 | 0.155 |
| CO2 | 14898 | 14.6 | 213 |

| Variable | N | Desviación Estándar | Varianza |
|---|---|---|---|
| O3 | 14898 | 3.69 | 13.6 |
| PM2.5 | 14898 | 3.25 | 10.56 |
| PM10 | 14898 | 3.59 | 12.88 |

### 3.6.6 Presupuesto

Los costos para la realización del proyecto de investigación son financiados por el investigador la presenta un desglose estimado, vete presupuesto incluye costos de hardware software diseño 3d fabricación de la carcasa desarrollo web entre otros elementos esenciales que sirvieron de importancia para el proyecto. Se debe tomar en cuenta valores aproximados ya que podrían variar según la disponibilidad de los recursos.

| **Ítem** | **Detalle** | **Unidad** | **Cantidad** | **Valor Unitario** | **Total** |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Sensor SDS011 | c/u | 1 | 96,00 | 96,00 |
| 2 | Sensor MQ-7 | c/u | 1 | 10,00 | 10,00 |
| 3 | Sensor MQ-8 | c/u | 1 | 10,00 | 10,00 |
| 4 | Sensor MQ-135 | c/u | 1 | 10,00 | 10,00 |
| 5 | Sensor MQ-811 | c/u | 1 | 75,00 | 75,00 |
| 6 | Servo motor | c/u | 1 | 45,00 | 45,00 |
| 7 | Sterp Down | c/u | 2 | 5,50 | 11,00 |
| 8 | Baquelita | c/u | 2 | 4,25 | 8,50 |
| 9 | Materiales de Oficina | c/u | 1 | 22,00 | 22,00 |
| 10 | Materiales electrónicos | c/u | 1 | 80,00 | 80,00 |
| 11 | Servicios de diseño en FUSION 360 | c/u | 2 | 22,64 | 45,28 |
| 12 | Impresión 3D de la carcasa en PLA | c/u | 1 | 120,00 | 120,00 |
| 13 | Servidor | c/u | 1 | 62,50 | 62,50 |
| 14 | Fuente alimentación | c/u | 2 | 25,50 | 51 |
| 15 | Cableado, conectores y otros accesorios | c/u | 1 | 32,50 | 32,50 |
| 16 | Diseño y elaboración PCB | c/u | 2 | 10,00 | 20,00 |
| | | | Subtotal | | 728,50 |
| | | | IVA (12%) | | 101,99 |
| | | | TOTAL | | 830,49 |

Nota: El Dron será facilitado por el grupo de investigación con el tema DISEÑO DE UNA PLATAFORMA DE COMUNICACIONES PARA APLICACIONES TECNOLÓGICAS DE AGRICULTURA DE PRECISIÓN CON DRONES aprobado con el número de resolución UTA-CONIN-2023-0088R

# CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## 4.1 Conclusiones

- En los últimos años el determinar la calidad del aire ambiente en diferentes lugares ha sido uno de los puntos más relevantes dentro de los estudios medioambientales. Esto se debe a la alta correlación que presenta la contaminación ambiental con la contribución del calentamiento global y el desencadenamiento de enfermedades de tipo respiratorias que pueden afectar al sistema nervioso e incluso al desarrollo de varios tipos de cáncer. Así mismo los altos niveles de contaminación pueden tener consecuencias más graves como la generación de lluvia ácida y elevar los índices de mortalidad de plantas, animales e incluso seres humanos. Para minimizar estas consecuencias se ha desarrollado varios sistemas comerciales que permiten el monitoreo de la calidad del aire y la identificación de diferentes elementos en el aire como: Dióxido de nitrógeno (NO2), Óxido nítrico (NO), Dióxido de azufre (SO2), Monóxido de carbono (CO), Dióxido de carbono (CO2), Ozono troposférico (O3), PM10, PM2.5. Este tipo de dispositivos presentan tecnologías de identificación como son sensores de dispersión de luz láser, fotoionización, MOS, fluorescencia, conducción térmica, interferencia infrarroja y electroquímicos. Cada una de estas tecnologías están ligadas a diferentes dispositivos comerciales que permiten realizar el monitoreo de la calidad de aire ambiente. Sin embargo, cabe destacar que estos sistemas son muy costosos y estacionarios. Por lo que el disponer de un sistema de monitoreo de calidad de aire ambiente móvil es una propuesta innovadora.

- Tomando en cuenta la gran cantidad de sensores de tecnología TTL que existen en el mercado se ha desarrollado un análisis comparativo para determinar cuál de estos se ajusta de forma adecuada para el proyecto. El análisis de las características de estos sensores ha permitido seleccionar los sensores MQ-7, MQ-9, MQ-135, MG-811, SDS011 los mismo que combinan tecnologías de conducción térmica y dispersión de luz láser como el SDS011 ideal para la medición de partículas en exteriores. Debido a que el sistema se debe acoplar

en el dron se ha diseñado una carcasa hueca de forma cilíndrica tomando en cuenta su comportamiento aerodinámico para reducir la inestabilidad en el acoplamiento del sistema al dron. Por otra parte que el sistema puede descender y ascender de forma adecuada para la toma de muestras se ha realizado un mecanismo de comunicación mediante los dispositivos Lora que permiten el envío de la acción mediante una interfaz que se encuentra alojada en la nube. Así mismo para para la recolección de datos se cuenta con una red de sensores que envían la información mediante los dispositivos Lora creando una red de un maestro y dos esclavos en la comunicación, teniendo un alcance de aproximadamente 300 metros con línea de vista. El sistema permite tomar los datos cada 6 segundos y presenta una latencia de 100 a 300 milisegundos, sin embargo, ya que las mediciones del sistema de monitoreo de calidad el aire se realiza con un estimado de media de mediciones no afecta en el comportamiento del sistema

- Para la implantación del sistema de monitoreo de la calidad de aire ambiente usando el Dron se diseñaron diferentes acoples tanto mecánicos como eléctricos que permitieron la integración adecuada del sistema de medición, así como la toma de datos por parte del sistema y su visualización. Uno de los puntos claves del controlador de vuelo Pixhawk, es que dispone de salidas que se pueden energizar mediante el software Mission Planner, lo que permite alimentar el sistema del mecanismo de ascenso y descenso del sistema de monitoreo. Cabe aclarar que el sistema no tiene un consumo elevado de energía ya que solo se activa para bajar y subir el sistema de monitoreo por lo que no le resta autonomía de vuelo al hexacóptero en el cual se encuentra acoplado. En cuanto a la red de sensores desarrollada con tecnología lora se ha sincronizado de forma adecuada los tiempos de envío y recepción de datos del sistema a entre 2 y 3 segundos dependiendo del nodo esclavo, por cual se ha conseguido tener un alcance máximo de 300 metros con línea de vista permitiendo que los datos se muestran de forma continua en la plataforma de monitoreo de calidad de ambiente, con un porcentaje de error del 5% frente a los dispositivos de medición comercial. Así mismo el desarrollo de la interfaz permite la generación de un proyecto para poder realizar el análisis de los datos

de la zona de estudio y poder obtener la información adecuada para la toma de decisiones.

- La implementación de un sistema de monitoreo basado en hardware de código abierto, como el microcontrolador ESP32 Lora ha demostrado ser altamente eficaz y versátil. Su cobertura para poder enviar y recibir datos facilita la comunicación entre el drone y una estación base de monitoreo Además del servidor qué establece la comunicación inalámbrica permite observar todos los datos desde cualquier pan té del mundo en tiempo real.

## 4.2 Recomendaciones

- Aunque los vuelos qué se tuvieron fueron exitosos es recomendable hacer uso de otras funcionalidades del dron de tal manera que pueda cumplir con una trayectoria de vuelo tomando así varios datos de varios sectores al mismo tiempo, pero con una guía prevista de vuelo. Con esto se optimizará las rutas de vuelo y por consiguiente reducción en el consumo de energía Además tener en cuenta una evaluación constante de la batería y los motores.

- Se puede mejorar aún más la fiabilidad y la precisión de los datos que emite cada uno de los sensores basándose en técnicas de filtrado y algoritmos de corrección de errores de manera que se minimice las interferencias qué tiene cada sensor. Además, hacer uso de otros sensores qué ayuden a medir parámetros ambientales como temperatura humedad esto pueden proporcionar una visión más integral con respecto a la calidad del aire ambiente en la ciudad de Ambato

- Priorizar los protocolos de comunicación ya que esto incluye una configuración adecuada para que los datos sean transmitidos en tiempo real y sin pérdida de datos es decir que no haya redundancia en la conexión de cada uno de los nodos. Para cada uno de los nodos esclavos es óptimo trabajar en diferentes tiempos para qué la sincronización con el nodo maestro sea exitosa y no haya datos perdidos tomando en cuenta los tiempos en milisegundos.

# REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS


[1] G. d. Ecuador, Norma de calidad del aire ambiente, Ecuador, 2003.

[2] M. d. ambiente, Acuerdo No 050, Ecuador, 2001.

[3] H. a. S. R. Zhang, «A Systematic Review of Air Quality Sensors, Guidelines, and Measurement Studies for Indoor Air Quality Management,» *Sustainability,* vol. 12, nº 21, pp. 45-59, 2020.

[4] N. a. M. V. P. a. I. S. M. N. a. N. Z. a. J. R. a. R. S. Thakur, «IoT based Air Pollution Monitoring System,» *International Conference on Computational Intelligence and Knowledge Economy (ICCIKE),* 2023.

[5] D. Suriano, «Preface to State-of-the-Art in Real-Time Air Quality Monitoring through Low-Cost Technologies,» *Atmosphere,* vol. 14, nº 3, p. 554, 2023.

[6] T. S. a. D. V. a. N. a. K. Srikanth, Iot BASED SMART INDUSTRY POLLUTION MONITORING, 2021.

[7] O. Sotomayor, «Cepal,» [En línea]. Available: https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/787ce64b-7f95-4a27-aad9-0a3dc9a3bb70/content. [Último acceso: 10 01 2024].

[8] B. a. N. A. N. a. A. D. Siregar, «Air Pollution Monitoring System Using Waspmote Gases Sensor Board in Wireless Sensor Network,» *International Conference on Data Science, Artificial Intelligence, and Business Analytics (DATABIA),* 2020.

[9] R. S. a. H. S. a. S. Singh, Air Pollution Quality Monitoring System Using Internet of Things for Smart Cities, 2021.

[10] R. J. a. P. D. a. N. J. a. S. Singh, AIR AND SOUND POLLUTION MONITORING SYSTEM USING IOT, 2022.

[11] A. a. H. R. a. R. A. R. a. L. N. Silvia, «PERANCANGAN WIRELESS SENSOR NETWORK MENGGUNAKAN TEKNOLOGI MULTISENSOR SEBAGAI SISTEM MONITORING KUALITAS UDARA,» *Jurnal Qua Teknika,* vol. 10, nº 2, pp. 1-13, 2020.

[12] S. a. K. K. U. a. K. K. R. a. K. N. S. a. R. M. S. R. Shakeela, «Novel Computational and Forecasting Strategy For Environment Quality Monitoring using Deep Learning,» *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE),* vol. 8, nº 3, pp. 2222-2227, 2019.

[13] S. a. V. S. a. 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, nº 3, pp. 419-431, 2020.

[14] M. a. B. A. Rogulski, «Current trends in network based air quality monitoring systems,» *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,* vol. 214, pp. 85-100, 2019.

[15] O. E. D. Rodrigo, «Sistema de monitoreo de contaminación del aire con redes de sensores inalámbricos en tiempo real,» *Ciencias Ambientales, Ingeniería, Ciencias de la Computación,* 2018.

[16] R. E. Rios Hernández, «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.

[17] K. Reddy, «On Air Pollution Monitoring Systems using IoT,» *International Journal of Engineering and Advanced Technology,* vol. 8, nº 63, pp. 1861-1862, 2019.

[18] T. M. a. I. I. M. a. H. E. N. a. H. S. I. Rachovski, «Air Pollution Monitoring System,» *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering,* vol. 8, nº 11, pp. 2275-2279, 2019.

[19] P. a. C. G. K. 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.

[20] C. R. Y.-P. F. E. V.-Z. S. P. M.-P. Pedro Luis Cabanillas-Gálvez, «Relationship between the vehicle fleet and its environmental,» *Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán,* vol. 25, nº 2, 2021.

[21] U. R. a. V. G. a. G. K. S. a. T. K. P, «Realtime Multi - Sensor Control Escalation and Alert Aggregator System for Vehicle Pollution Through IoT,» *International Journal of Engineering Research ,* vol. 9, nº 2, 2020.

[22] H. a. K. U. S. P, «An Analysis on the Implementation of Air Pollution Monitoring System,» *SSRN Electronic Journal,* 2020.

[23] W. J. a. D. Z. Ng, «Enhancement of real-time IoT-based air quality monitoring system,» *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS),* vol. 11, nº 1, p. 390, 2020.

[24] R. R. a. A. N. a. I. S. a. A. Mishra, «Recent developments in the production of inexpensive indoor air quality monitoring device,» *International Journal of Science and Research Archive,* vol. 7, nº 2, pp. 357-363, 2022.

[25] M. G.-B. A. S. Meza-Leandro, «Uso de vehículos aéreos no tripulados,» p. 12, 9 Diciembre 2019.

[26] A. S. a. R. M. M. Medina Nadila Prima Putri and Handayani, «Sistem Monitoring Kualitas Udara dengan Platform Web,» *Explore IT! : Jurnal Keilmuan dan Aplikasi Teknik Informatika,* vol. 12, nº 2, pp. 54 - 61, 2020.

[27] C. M. MAYORGA, M. E. RUIZ y D. S. ALDAS, «Perceptions about air pollution generated by urban transportation in Ambato City, Ecuador,» *Revista Espacios,* vol. 41, nº 17, p. 11, 2020.

[28] Mauricioespalialt, «Prevencion integral,» [En línea]. Available: https://www.prevencionintegral.com/comunidad/blog/hacia-mundo-sostenible/2017/03/17/monitorizacion-calidad-ambiental-mediante-tecnologias-inalambricas. [Último acceso: 18 01 2024].

[29] D. A. a. C. L. V. A. D. a. M. K. R. V. a. M. V. C. Q. Martillano, «Multi Zone-Based Surface Air Quality Monitoring via Internet of Things,» *Journal of Communications,* pp. 470-477, 2019.

[30] M. B. a. T. I. a. N. B. a. N. G. a. D. T. Marinov, «Smart Multisensor Node for Environmental Parameters Monitoring in Urban Areas,» *National Conference with International Participation (ELECTRONICA),* 2019.

[31] A. a. M. P. a. G. A. a. P. S. a. S. P. a. P. M. a. M. L. a. M. M. Marini, «Design of an Urban Monitoring System for Air Quality in Smart Cities,» *10th International Conference on Smart Cities and Green ICT Systems,* 2021.

[32] D. M. López Meza y E. F. Mena Rueda, «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.

[33] A. S. V. LARA, «DESARROLLO DE UN PROTOTIPO PARA LA MONITORIZACIÓN,» Quito, 2020.

[34] U. a. S. H. a. K. a. N. A. 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.

[35] R. S. L. KATHERINE, «CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTA,» [En línea]. Available: https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/RAMOS%20SANTANA%20LISBETH%20KATHERINE.pdf. [Último acceso: 05 02 2024].

[36] A. a. P. A. a. A. A. a. V. P. M. D. R. Janarthanan, «Real-time indoor air quality monitoring using the Internet of Things,» *Third International Conference on Intelligent Computing Instrumentation and Control Technologies (ICICICT),* 2022.

[37] S. A. a. A. Irhami, Air pollution monitoring system with internet of thing [IOT] technology/Afif Irhami Shaik Amair, 2021.

[38] https://oa.upm.es/75921/1/TFG_ALEJANDRO_ALVAREZ_CORRAL.pdf, «Upm,» 06 2023. [En línea]. Available: https://oa.upm.es/75921/1/TFG_ALEJANDRO_ALVAREZ_CORRAL.pdf. [Último acceso: 20 01 2024].

[39] Q. a. L. P. a. Z. H. a. C. Z. Han, «A Wireless Sensor Network for Monitoring Environmental Quality in the Manufacturing Industry,» *IEEE Access,* vol. 7, pp. 78108-78119, 2019.

[40] E. A. L. GUAIGUA, «EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL Y PLAN DE MANEJO,» Quito, 2019.

[41] P. a. S. J. a. I. G. a. S. K. a. P. V. G. K. D. Gokul, «Internet of Things Based Air Pollution Monitoring and Forecasting System,» *Sustainable Communication Networks and Application,* pp. 439-451, 2019.

[42] R. F. E. Godoy, «Prototipo de un sistema de monitorizacion ambiental mediante una red de sensores 802.15.4,» Quito, 2018.

[43] M. a. B. M. K. Godase, «WSN Node for Air Pollution Monitoring,» *6th International Conference for Convergence in Technology (I2CT),* 2021.

[44] R. a. G. J. W. a. G. P. K. Ghosh, «Air Pollution Monitoring Using Near Room Temperature Resistive Gas Sensors: A Review,» *IEEE Transactions on Electron Devices,* vol. 66, nº 8, pp. 3254-3264, 2019.

[45] A. a. J. A. a. W. M. a. K. G. Ghadge, 2023 International Conference on Emerging Smart Computing and Informatics (ESCI), IEEE, 2023.

[46] Á. N. a. A. P. R. a. D. H. R. a. O. C. I. a. O. M. d. l. C. Garciga, MEASUREMENT OF ENVIROMENTAL VARIABLES IN DIFFERENT SCENARIOS, 2021.

[47] C. E. F. Gaona, «DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO EN,» Loja, 2020.

[48] C. F. L. Flores, «Cominidad e innovacion en mineria,» [En línea]. Available: https://www.codeauni.com/comunidad/blog/182/. [Último acceso: 15 01 2024].

[49] C. Fito, «Itene,» [En línea]. Available: https://www.itene.com/soluciones/calidad-aire-industrial-exterior-urbano-interior/. [Último acceso: 22 01 2024].

[50] U. a. R. R. a. P. P. Elangovan, «Monitoring Hazardous Pollutants Using Smart Sensors and WSN,» *International Conference on Data Science, Agents & Artificial Intelligence (ICDSAAI),* 2022.

[51] I. N. d. Ecologia, «Ine,» [En línea]. Available: https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/guias/1-%20Principios%20de%20Medici%C3%B3n%20de%20la%20Calidad%20del%20Aire.pdf. [Último acceso: 18 01 2024].

[52] E. a. E.Kavitha, AIR QUALITY MONITORING USING NODE MICROCONTROLLER UNIT AND BLYNK SOFTWARE, 2022.

[53] E. a. E.Kavitha, AIR QUALITY MONITORING USING NODE MICROCONTROLLER UNIT AND BLYNK SOFTWARE, 2020.

[54] S. S. a. K. N. a. K. P. P. a. P. K. K. Devi, «Air Pollution Prevention Using Wireless Sensors,» *2nd International Conference on Advancements in Electrical, Electronics, Communication, Computing and Automation (ICAECA),* 2023.

[55] C. N. H. Cerda, «scielo,» [En línea]. Available: https://www.scielo.sa.cr/pdf/rca/v57n1/2215-3896-rca-57-01-17718.pdf. [Último acceso: 12 02 2024].

[56] Cepal, «Acerca de Cambio climático,» [En línea]. Available: https://www.cepal.org/es/temas/cambio-climatico/acerca-cambio-climatico. [Último acceso: 10 01 2024].

[57] R. M. Q.-D. L. C. N. A. E.-N. y. L. A. H.-Y. Carlos Alberto Herrera-Quispe, «Evaluación de Impacto Ambiental Mediante Vehículo Aéreo,» Peru, 2021.

[58] S. A. a. J. S. a. D. S. A. a. Z. M. U. a. R. S. A. 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.

[59] J. C. C. BONILLLA, «CONCENTRACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO SEDIMENTABLE PARA,» Ambato, 2018.

[60] G. C. Aragón, «Uso de los vehículos aéreos no tripulados (drones) para el,» Colombia, 1019.

[61] Aquae, «¿Cómo se mide la calidad del aire?,» 11 03 2022. [En línea]. Available: https://www.fundacionaquae.org/wiki/como-se-mide-calidad-aire/. [Último acceso: 15 01 2024].

[62] R. a. H. R. AlSheikh, «A Survey on Smart Monitoring System of Environment Based on IoT,» *Al-Rafidain Engineering Journal (AREJ),* vol. 26, nº 1, pp. 147-159, 2021.

[63] G. Akhobadze, «Diagnosing Technosphere Pollution to Form Environmental Policy,» *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,* vol. 988, nº 3, pp. 11-32, 2022.

[64] E. A. Acosta Curipallo, « Sistema prototipo para el monitoreo inalámbrico de la cantidad de desechos de un contenedor de basura para ciudades inteligentes,» Repositorio Digital - EPN, Quito, 2020.

[65] J. V. &. R. L. C. D. Acero Delgado, «Sistema prototipo para el monitoreo inalámbrico de gases contaminantes del aire desarrollado bajo plataformas de hardware y software libre,» Repositorio Digital - EPN, Quito, 2016.

[66] «Universidad Politecnica Salesiana,» [En línea]. Available: https://www.ups.edu.ec/noticias?articleId=582669&byid. [Último acceso: 10 01 2024].

[67] «SGS,» 12 07 2019. [En línea]. Available: https://www.sgs.com/es-ec/services/monitoreo-del-aire-ambiente. [Último acceso: 12 01 2024].

[68] «Ingenieros Asesores,» 17 12 2019. [En línea]. Available: https://ingenierosasesores.com/actualidad/sistemas-de-monitorizacion-ambiental-en-la-industria/. [Último acceso: 12 01 2024].

[69] «Crónica ONU,» [En línea]. Available: https://www.un.org/es/chronicle/article/los-espacios-verdes-un-recurso-indispensable-para-lograr-una-salud-sostenible-en-las-zonas-urbanas. [Último acceso: 10 01 2024].

[70] N. A. a. Sopace, «Nasa,» [En línea]. Available: https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19770009539/downloads/19770009539.pdf. [Último acceso: 2 05 2024].

# ANEXOS

Anexo A. Datasheet de los sensores

***Autocorrelación:*** La autocorrelación permite analizar patrones temporales y dependencias entre observaciones sucesivas en los datos de calidad del aire. Esto es útil para identificar tendencias y ciclos en la concentración de químicos monitoreados.

En la Tabla 29,Tabla 30,Tabla 31,Tabla 32,Tabla 33,Tabla 34,Tabla 35 se obtiene la función que representa la autocorrelación por cada factor químico dónde se puede los datos evaluados en cada nodo.

La Figura 89,Figura 90,Figura 91,Figura 92,Figura 93,Figura 94,Figura 95,Figura 96 muestra la función que genera la autocorrelación con deferencia a las medidas de cada sensor. Esto alerta que hay más concentración de $O_3$, $CO_2$ y N en el área que se está estudiando o haciendo el análisis, se puede observar que después de haber recolectado muestras más o menos unos 9 minutos, esta tiene un aumento de 15%. Esta información es adecuada para decir que esto se da por una combinación variada de factores, tomando en cuenta que en la ciudad hay muchas fuentes de contaminación como los automóviles buses y otras reacciones químicas que tienden a subir el nivel relativamente estable en el que estaban cada uno de los sensores.

**Función de autocorrelación: $NO_2$**

Tabla 29. Valores de ACF de $NO_2$

| 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 |

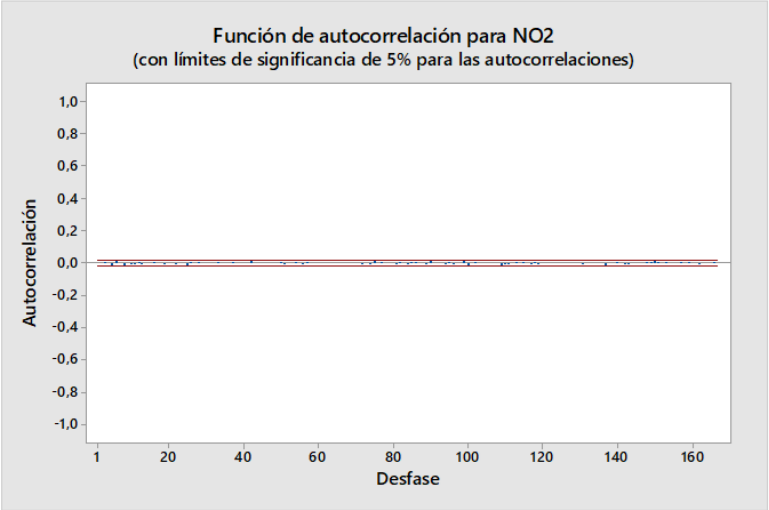



Figura 89. Función de autocorrelación para $NO_2$

**Función de autocorrelación: NO**

Tabla 30. 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 |

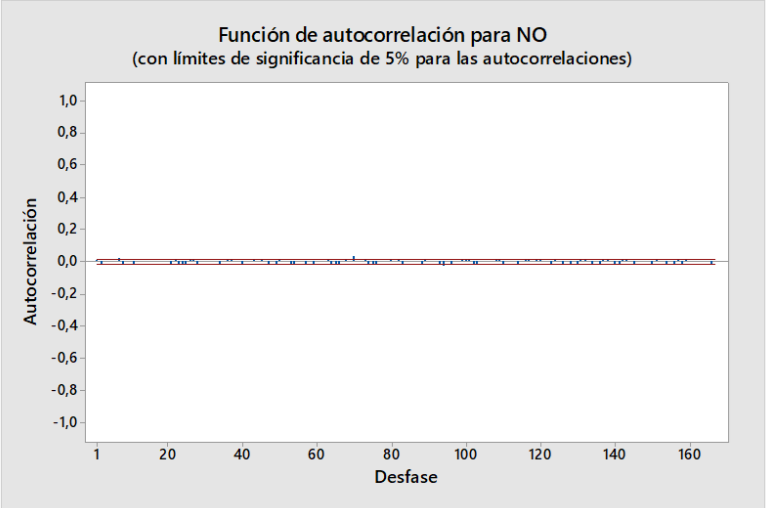



Figura 90. Función de autocorrelación para NO

**Función de autocorrelación: $SO_2$**

Tabla 31. Valores de ACF de $SO_2$

| 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 |

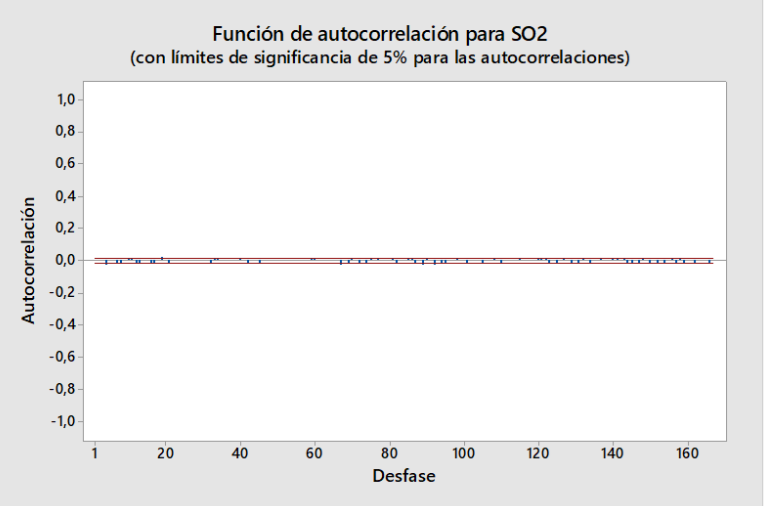



Figura 91. Función de autocorrelación para $SO_2$

**Función de autocorrelación: CO**

Tabla 32. 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 |

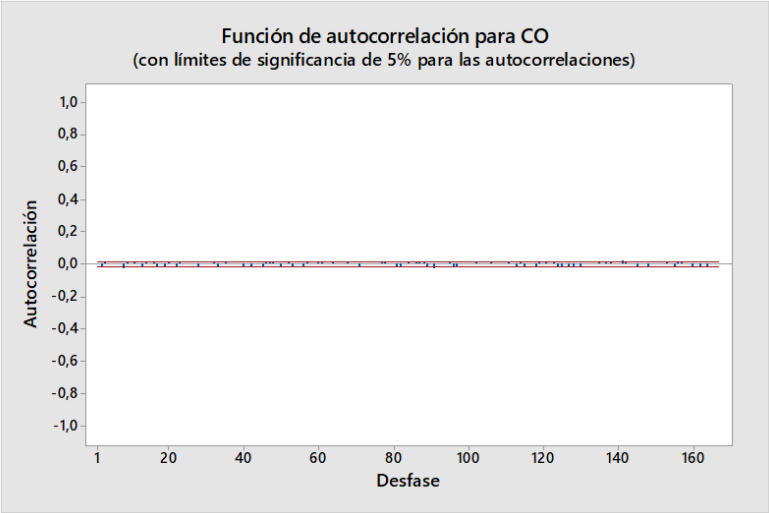



Figura 92. Función de autocorrelación para CO

**Función de autocorrelación: $CO_2$**

Tabla 33. Valores de ACF de $CO_2$

| 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 |

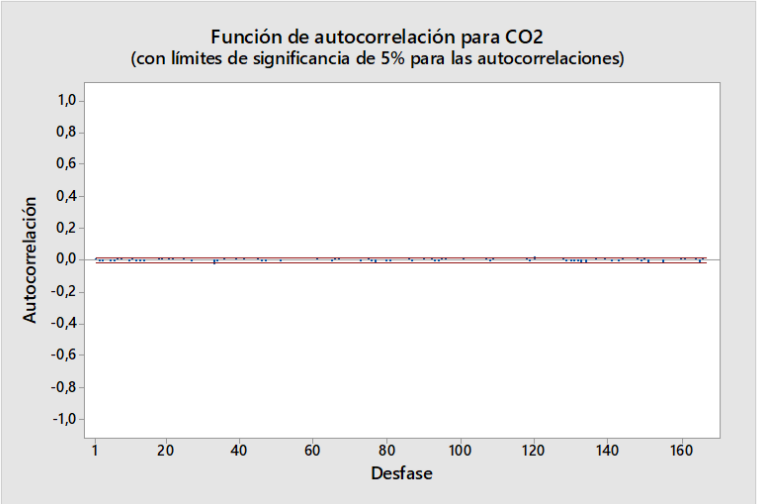



Figura 93. Función de autocorrelación para $CO_2$

**Función de autocorrelación: $O_3$**

Tabla 34. Valores de ACF de $O_3$

| 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 |

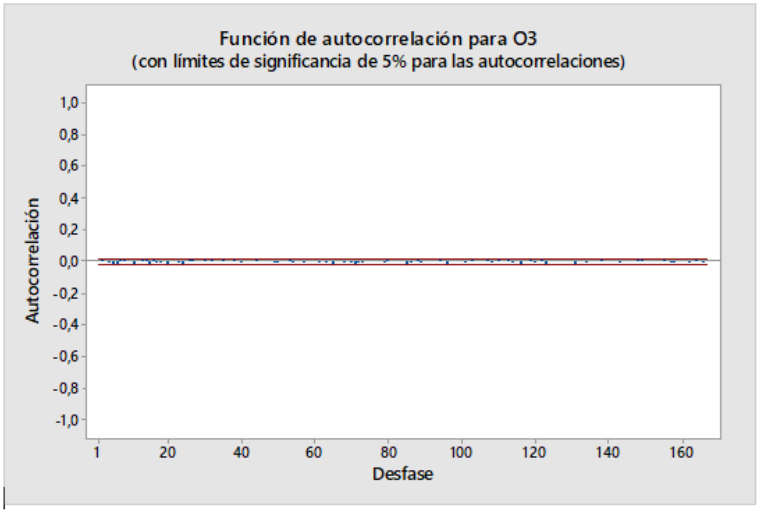



Figura 94. Función de autocorrelación para $O_3$

**Función de autocorrelación: SDS2.5**

Tabla 35. Valores de ACF de PM2.5:

| Desfase | ACF |
|---|---|
| 1 | 0.5 |
| 2 | 0.3 |
| 3 | 0.1 |
| 4 | -0.1 |
| 5 | -0.3 |

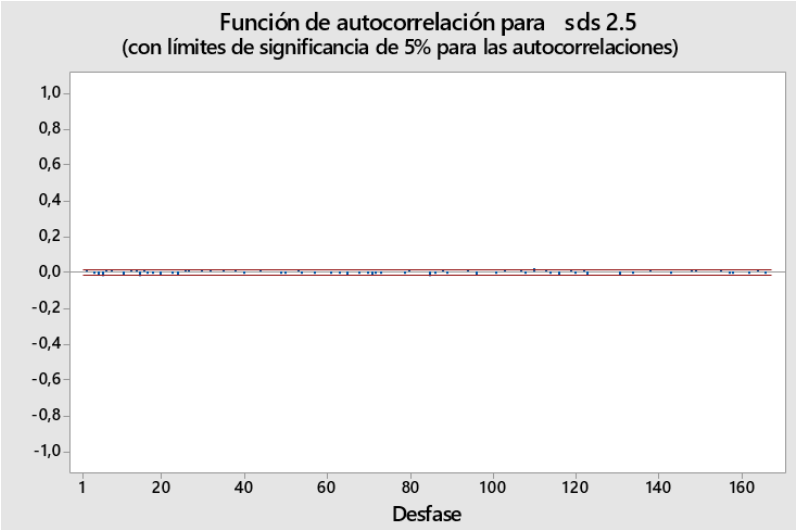



Figura 95. Función de autocorrelación Sds2.5

**Función de autocorrelación: SDS10**

Tabla 36. Valores de ACF de PM10:

| Desfase | ACF |
|---|---|
| 1 | 0.6 |
| 2 | 0.4 |
| 3 | 0.2 |
| 4 | 0.0 |
| 5 | -0.2 |

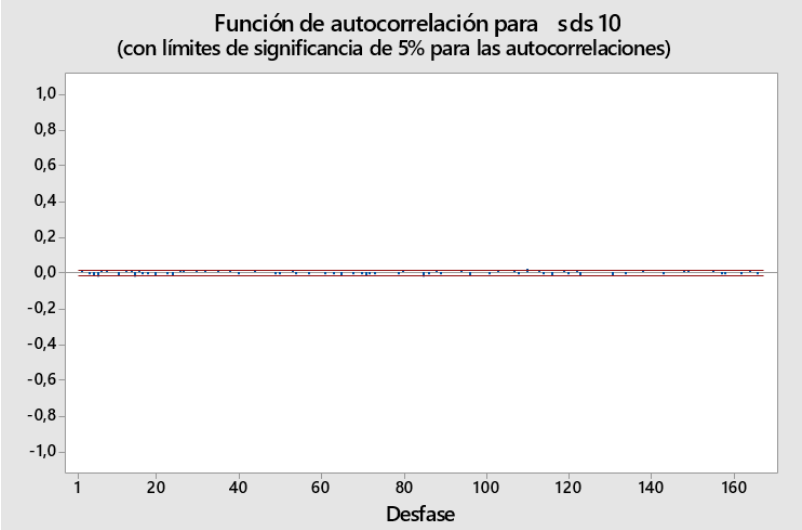



Figura 96. Función de autocorrelación Sds10

Anexo B. Códigos en Arduino

En el enlace se adjunta los códigos de Arduino.

https://github.com/edgarmartinezdiaz/SISTEMA-DE-MONITOREO-PARA-LA-CALIDAD-DE-AIRE-AMBIENTE-DE-LA-CIUDAD-DE-AMBATO-UTILIZANDO-DRONES/tree/main/C%C3%B3digos%20de%20Arduino

## Anexo C. Códigos en Node red

En el enlace se adjunta los códigos de Node-Red.

https://github.com/edgarmartinezdiaz/SISTEMA-DE-MONITOREO-PARA-LA-CALIDAD-DE-AIRE-AMBIENTE-DE-LA-CIUDAD-DE-AMBATO-UTILIZANDO-DRONES/tree/main/C%C3%B3digos%20de%20Node-Red

## Anexo D. Códigos en HTML

En el enlace se adjunta los códigos de HTML

https://github.com/edgarmartinezdiaz/SISTEMA-DE-MONITOREO-PARA-LA-CALIDAD-DE-AIRE-AMBIENTE-DE-LA-CIUDAD-DE-AMBATO-UTILIZANDO-DRONES/tree/main/C%C3%B3digos%20de%20Html

## Anexo E. Diseños en 3D

En el enlace se adjunta los Diseños de 3D

https://github.com/edgarmartinezdiaz/SISTEMA-DE-MONITOREO-PARA-LA-CALIDAD-DE-AIRE-AMBIENTE-DE-LA-CIUDAD-DE-AMBATO-UTILIZANDO-DRONES/tree/main/Dise%C3%B1o%20en%203d

## Anexo F. Diseños en Proteus

En el enlace se adjunta el diseño de Proteus

https://github.com/edgarmartinezdiaz/SISTEMA-DE-MONITOREO-PARA-LA-CALIDAD-DE-AIRE-AMBIENTE-DE-LA-CIUDAD-DE-AMBATO-UTILIZANDO-DRONES/tree/main/Dise%C3%B1o%20de%20proteus

Anexo G. Código de base de datos

En el link se adjunta la base de datos

https://github.com/edgarmartinezdiaz/SISTEMA-DE-MONITOREO-PARA-LA-CALIDAD-DE-AIRE-AMBIENTE-DE-LA-CIUDAD-DE-AMBATO-UTILIZANDO-DRONES/tree/main/Base%20de%20datos