

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

Mejora de Dispositivo de IoT para medir la temperatura del medio ambiente
y la contaminación del aire según su ubicación y entorno

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Telemática

Presentado por:

Rafael Johan Estrada Rodriguez

Juan Francisco Mayancela Cordova

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2024

DEDICATORIA

Rafael Johan Estrada Rodriguez

Dedico esta tesis a todas las personas que confiaron en mi desde un principio ya sea amigos o familiares. A mis padres que siempre dieron lo mejor de sí para que yo pueda alcanzar mis logros. Gracias por siempre estar ahí para mí a Rafael Estrada Pico y a Elsa Maria Rodriguez Barberan.

Juan Francisco Mayancela Cordova

Dedico esta tesis a mis padres, hermanos y todas aquellas personas que forman parte de este proceso, que estuvieron en momentos malos y buenos como mi novia Lorena Barros, en especial a Exenia Cordova García y Telmo Mayancela Yuquilima mis padres, quienes con su esfuerzo y sacrificio me brindaron la oportunidad de formar un futuro próspero y duradero. Me guiaron a través de mi infancia y adolescencia enseñándome buenos valores y lecciones de vida que me acompañaran por siempre.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL) por brindarnos las herramientas y el conocimiento necesario para llevar a cabo este proyecto, así como a nuestros tutores y profesores, quienes con su guía y experiencia contribuyeron significativamente al desarrollo de esta investigación. También extendemos nuestro agradecimiento a nuestras familias, cuyo apoyo incondicional fue fundamental para culminar este trabajo.

Declaración Expresa

Nosotros Rafael Johan Estrada Rodriguez y Juan Francisco Mayancela Cordova acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 14 de febrero de 2025.



Rafael Johan Estrada
Rodriguez



Juan Francisco Mayancela
Cordova

EVALUADORES



Firmado electrónicamente por:
**IGNACIO MARIN
GARCIA**

Ignacio Marín García
PROFESOR DE LA MATERIA



Firmado electrónicamente por:
**RAYNER STALYN
DURANGO ESPINOZA**

Rayner Durango Espinoza
PROFESOR TUTOR

RESUMEN

La ciudad de Guayaquil enfrenta constantes problemas relacionados con la contaminación del aire y la variación de temperatura en zonas urbanas con mucha población, afectando la salud de sus habitantes a causa de la exposición de material particulado (PM2.5 y PM10), CO2 y óxidos de nitrógeno. Estas afectaciones, agravadas por la falta de un sistema de monitoreo en tiempo real, dificultan la implementación de una solución efectiva. Este proyecto tiene como objetivo mejorar un dispositivo IoT para medir en tiempo real la calidad del aire, almacenando los datos recolectados en Firebase y visualizándolos en una plataforma web. La justificación del proyecto se basa en la necesidad de un dispositivo tecnológico que permita identificar zonas críticas de contaminación del aire y promover una solución ambiental sostenible. En el desarrollo del proyecto se utilizaron sensores avanzados, como el MQ135 y PMS5003, integrados a un microcontrolador ESP32. Se realizaron pruebas de campo en diversas rutas de la ciudad, evaluando la precisión de los sensores y la transmisión de datos en condiciones climáticas y de tráfico variadas. Esto permitió validar la funcionalidad del sistema para medir parámetros ambientales en tiempo real.

El documento se organiza en capítulos que estructuran el desarrollo del proyecto. El capítulo 1 aborda la problemática, objetivos, justificación y marco teórico, destacando la relevancia de la propuesta. El capítulo 2 detalla la metodología, describiendo los componentes utilizados, la integración de hardware y software, y las pruebas realizadas. En el capítulo 3 se analizan los resultados obtenidos, destacando la efectividad del dispositivo IoT. El capítulo 4 presenta las conclusiones y recomendaciones, junto con posibles líneas futuras de investigación para ampliar el alcance del proyecto.

Palabras Clave: Contaminación, IoT, Firebase, Flutter, Calidad del Aire.

ABSTRACT

The city of Guayaquil faces constant problems related to air pollution and temperature variation in urban areas with a large population, affecting the health of its inhabitants due to exposure to particulate matter (PM2.5 and PM10), CO2 and nitrogen oxides. These effects, aggravated by the lack of a real-time monitoring system, make it difficult to implement an effective solution. This project aims to improve an IoT device to measure air quality in real time, storing the collected data in Firebase and displaying it on a web platform. The justification of the project is based on the need for a technological device that allows identifying critical areas of air pollution and promoting a sustainable environmental solution. In the development of the project, advanced sensors were used, such as the MQ135 and PMS5003, integrated into an ESP32 microcontroller. Field tests were carried out on various routes in the city, evaluating the accuracy of the sensors and the transmission of data in varied weather and traffic conditions. This allowed the system's functionality to be validated for measuring environmental parameters in real time. The document is organized into chapters that structure the development of the project. Chapter 1 addresses the problem, objectives, justification and theoretical framework, highlighting the relevance of the proposal. Chapter 2 details the methodology, describing the components used, the integration of hardware and software, and the tests performed. Chapter 3 analyzes the results obtained, highlighting the effectiveness of the IoT device. Chapter 4 presents the conclusions and recommendations, along with possible future lines of research to expand the scope of the project.

Keywords: Pollution, IoT, Firebase, Flutter, Air Quality.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	i
ABSTRACT	iii
ABREVIATURAS	vii
INDICE DE FIGURAS	vii
1 INTRODUCCION	1
1.1 Descripción del problema	2
1.2 Justificación del problema	2
1.3 Objetivos	3
1.4 Alcance y Limitaciones	3
1.5 Estado del arte	4
1.6 Marco Teórico	7
2 METODOLOGIA	11
2.1 Componentes	11
2.2 Integración	16
2.3 Sistema de Alimentación	17
2.4 Almacenamiento de datos en Firebase	18
2.5 Pruebas	20
3 ANALISIS DE RESULTADOS	23
3.1 Rendimiento del Dispositivo IoT	23
3.2 Interpretación de Datos de Rutas de Prueba	24
3.3 Pagina Web	26
4 CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS	29
4.1 Conclusiones	29

4.2 Recomendaciones	30
4.3 Líneas Futuras	31

BIBLIOGRAFIA **33**

APENDICES **35**

A Diagrama de Actividades	37
B Memoria económica	38
B.1 Costes de Instrumental y Equipamiento	38
B.2 Costes de Personal	39
B.3 Subcontrataciones y Consultorías	39
B.4 Gastos Generales Suplementarios	40
C Análisis de viabilidad económica	40

ABREVIATURAS

COx	Óxidos de Carbono
COV	Compuestos Orgánicos Volátiles
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FIEC	Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación
FIMCP	Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción
GPRS	General Packet Radio Service
GPS	Sistema de Posicionamiento Global
IoT	Internet de las Cosas
NOx	Óxidos de Nitrógeno
PM	Materia Particulada
PPM	Partes por Millón

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Densidad vehicular del centro de Guayaquil	8
1.2	Contaminación del aire	9
2.1	Diagrama de metodología	11
2.2	Sensor MQ135	12
2.3	Sensor PMS5003	13
2.4	Circuito del Dispositivo	17
2.5	Estructura de Datos	19
2.6	Mapa de Ruta prueba 1	21
2.7	Mapa de Ruta prueba 2	22
2.8	Mapa de Ruta prueba 3	22
3.1	Pagina Web interactiva	26
3.2	Dashboard de CO2 vs Recorrido	27

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

La ciudad de Guayaquil, reconocida como el principal puerto del Ecuador, enfrenta actualmente diversos problemas ambientales derivados de su rápido crecimiento urbano e industrial. Aunque la ciudad ha logrado avances en infraestructura y ha implementado algunas políticas de sostenibilidad, los niveles de contaminación continúan representando un desafío importante para su población y entorno natural (Katherine, 2023). Entre las problemáticas más críticas se encuentran la falta de espacios verdes adecuados, la contaminación acústica, la gestión ineficiente de residuos urbanos y la degradación del estero salado, un ecosistema clave para la biodiversidad local (Jiménez et al., 2014).

Estos factores no solo afectan la calidad ambiental de Guayaquil, sino que también tienen repercusiones directas en la salud de sus habitantes, aumentando el riesgo de enfermedades respiratorias y cardiovasculares, además de contribuir a un deterioro general de la calidad de vida. La presente investigación busca analizar los niveles de contaminación actuales en Guayaquil, identificar las principales fuentes y efectos de estos problemas ambientales, y proponer soluciones sostenibles que puedan integrarse en la planificación urbana y la gestión ambiental de la ciudad (Jiménez et al., 2014).

Este proyecto tiene como objetivo proporcionar datos precisos y en tiempo real sobre estas condiciones térmicas, identificar las zonas más afectadas y presentar la información de manera accesible y atractiva. Así, se busca fomentar la adopción de soluciones ambientales sostenibles que contribuyan a reducir el CO₂ atmosférico y, con ello, mitigar tanto el calor urbano como su impacto en la salud pública.

1.1 Descripción del problema

La ciudad de Guayaquil enfrenta un serio problema de contaminación del aire, que agrava en gran medida la salud y calidad de vida de sus habitantes, especialmente en zonas de alta densidad vehicular e industriales. La falta de control sobre el aumento de vehículos y actividades industriales empeora la presencia de contaminantes en el ambiente, incluyendo partículas finas (PM2.5 y PM10), óxidos de nitrógeno (NOx), y compuestos orgánicos volátiles (COV), que aumentan el riesgo de enfermedades respiratorias y cardiovasculares entre la población (Doménica, 2020). Este problema de calidad del aire es más notorio durante periodos de clima seco, cuando la escasez de lluvia no permite la dispersión natural de los contaminantes, aumentando su concentración y los riesgos de exposición.

El impacto negativo de la contaminación del aire no solo recae en la salud de los ciudadanos, sino también en la economía local, al subir los costos de atención médica y bajar la productividad de los trabajadores producto de problemas de salud relacionados con la exposición constante a contaminantes. Además, la falta de un sistema de monitoreo en tiempo real limita la capacidad de la municipalidad para evaluar de manera correcta la distribución y variación de los niveles de contaminación en distintas zonas de la ciudad, dificultando la implementación de planes efectivos de mitigación y la planificación urbana que considere medidas de protección ambiental y salud pública.

1.2 Justificación del problema

Dar una solución a la contaminación del aire en Guayaquil es esencial no solo para mejorar la salud y el bienestar de sus habitantes, sino también para promover un desarrollo urbano sostenible y resiliente. Por ello, una mejora en el dispositivo IoT móvil existente permitirá no solo la recolección de datos de temperatura y ubicación, sino también la medición de parámetros clave de la contaminación del aire, como las concentraciones de partículas finas (PM2.5 y PM10), óxidos de nitrógeno (NOx) y otros contaminantes en distintos puntos estratégicos de la ciudad. Esta mejora en la capacidad del dispositivo facilitará la recolección de datos ambientales de manera sencilla y efectiva, optimizando el monitoreo en tiempo real de la calidad del aire.

De igual forma, la optimización del portal web permitirá que, además de visualizar los datos de temperatura, los usuarios puedan acceder a una representación detallada de los niveles de contaminación del aire en la ciudad. La interfaz ampliada presentará la información de manera clara y atractiva, proporcionando a los usuarios una herramienta poderosa para analizar el estado del aire y su impacto en distintas zonas de la ciudad. Esto ofrecerá una base sólida y fundamentada en datos para la toma de decisiones en políticas ambientales, permitiendo a ingenieros ambientales, planificadores urbanos y autoridades locales diseñar e implementar soluciones específicas, como la regulación de emisiones, el aumento de espacios verdes y la promoción de tecnologías de mitigación de contaminantes, todo enfocado en mejorar la calidad de vida y la sostenibilidad urbana.

1.3 Objetivos

El **objetivo principal** de este proyecto es "mejorar y modificar el diseño de un dispositivo IoT para que sea capaz de medir la contaminación del aire en distintas zonas de la ciudad de Guayaquil, para mostrar los datos censados por medio de graficas en una página web y así permitir a los usuarios encontrar soluciones a la contaminación del aire".

Los **objetivos específicos** planteados para alcanzar nuestro objetivo principal son los siguientes:

1. Modificar el dispositivo IoT agregando al circuito dos sensores para medir valores como dióxido de carbono y partículas PM.
2. Modificar la página web agregando nuevas gráficas para que se pueda visualizar los datos de las mediciones con los nuevos sensores.
3. Realizar un muestreo con el dispositivo IoT en áreas específicas del centro de Guayaquil para la recopilación de datos.

1.4 Alcance y Limitaciones

El alcance del proyecto incluye la mejora de una herramienta de monitoreo ambiental en Guayaquil, diseñada para visualizar en tiempo real datos de temperatura, humedad y niveles de contaminación del aire en diversas zonas de la ciudad. La propuesta

consiste en un sistema integral que incorpora un dispositivo IoT capaz de recolectar estos parámetros ambientales de manera continua, permitiendo a los involucrados desarrollar soluciones sostenibles con el acceso a datos precisos y detallados. Esto permitirá identificar zonas con mayor impacto de contaminación y variación térmica, proporcionando una mejor toma de decisiones informadas que busquen aumentar las condiciones ambientales y la calidad de vida en la ciudad.

El proyecto, sin embargo, enfrenta varias limitaciones que afectan considerablemente su desempeño. La cobertura de la red de datos puede ser reducida o intermitente en ciertas zonas, lo cual podría interferir con la transmisión de datos en tiempo real y limitar el acceso continuo a la información. Además, el dispositivo deberá operar en un entorno donde las condiciones climáticas, como lluvia intensa o altas temperaturas, podrían afectar su condición y precisión. Por esta razón, el diseño del dispositivo se enfocará en asegurar la resistencia ante estos factores, garantizando la calidad y confiabilidad de las mediciones recolectadas.

1.5 Estado del arte

La contaminación del aire representa uno de los mayores desafíos ambientales, especialmente en zonas urbanas donde la densidad poblacional y el tránsito vehicular incrementan la liberación de contaminantes. Estos contaminantes, como el monóxido de carbono (CO), el dióxido de nitrógeno (NO₂), y partículas en suspensión (PM_{2.5} y PM₁₀), están directamente relacionados con problemas respiratorios y enfermedades cardiovasculares en la población. Según la Organización Mundial de la Salud, cada año millones de personas mueren prematuramente debido a la exposición prolongada a aire contaminado (Doménica, 2020), lo que resalta la urgencia de implementar sistemas de monitoreo que permitan medir y mitigar esta contaminación de manera efectiva.

El sensor MQ-135 es ampliamente utilizado en sistemas de monitoreo de la calidad del aire debido a su capacidad para detectar gases como amoníaco, dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), benceno y otros compuestos volátiles (Gessal et al., 2019). Su funcionamiento se basa en la variación de resistencia interna del sensor, la cual responde a la concentración de gases presentes en el ambiente. Este principio lo hace

adecuado para medir rangos de concentración de gases en partes por millón (ppm), con un enfoque en el análisis de ambientes interiores y exteriores, especialmente en entornos urbanos y residenciales donde se requiere monitoreo constante y de bajo costo (Abbas et al., 2020).

A nivel de investigación, el sensor MQ-135 ha sido integrado en sistemas embebidos móviles que permiten recolectar datos en diferentes ubicaciones para obtener un mapa detallado de la calidad del aire. Por ejemplo, en el proyecto AirQIB, realizado en la ciudad de Ibarra, Ecuador, el sensor se instaló en vehículos junto a un módulo GPS para registrar lecturas de gases y geolocalizarlas. Esta configuración permite analizar los niveles de contaminación en zonas con tráfico alto o industrias cercanas, obteniendo así información en tiempo real sobre la dispersión de contaminantes en varias zonas de la ciudad, superando las limitaciones de los sistemas fijos (Prado, 2019).

Además, el sensor MQ-135 es compatible con plataformas de desarrollo como Arduino, lo que facilita su integración con tecnologías de comunicación y visualización de datos en la nube. En el proyecto mencionado, el sensor se conecta mediante GPRS para transmitir las lecturas a una plataforma en línea, como Ubidots, donde los datos se visualizan en gráficos que permiten el monitoreo remoto. Estas soluciones basadas en IoT optimizan el análisis ambiental, ya que permiten detectar patrones de contaminación y tomar decisiones en tiempo real para mitigar su impacto en la salud pública y el medio ambiente (Gozalo, 2020).

El sensor de bajo costo PMS5003 se utiliza ampliamente para el monitoreo de partículas finas (PM2.5 y PM10), ofreciendo una alternativa viable y económica a los sistemas de monitoreo tradicionales en áreas urbanas y altoandinas. Su funcionamiento basado en detección láser permite capturar datos en tiempo real, lo cual es ideal para estudios donde se requiere alta sensibilidad y precisión en la medición de partículas. En un estudio realizado en Huancayo, Perú, se emplearon estos sensores para evaluar la variabilidad temporal y geográfica de la contaminación, registrando datos en tres sitios estratégicos durante un año. Los resultados permitieron identificar picos de contaminación relacionados con el tráfico y eventos festivos, así como variaciones estacionales que coincidieron con épocas de quema de biomasa, demostrando la utilidad de los sensores PMS5003 para caracterizar y analizar patrones de contaminación en

áreas de recursos limitados (Gomez and Vassallo, 2023).

A pesar de sus ventajas, el PMS5003 presenta limitaciones en condiciones de alta humedad o aerosoles complejos, que pueden interferir en la precisión de las mediciones y requerir calibración periódica. No obstante, la portabilidad, bajo costo y capacidad de capturar datos continuos hacen que estos sensores sean especialmente útiles en redes de monitoreo densas, proporcionando datos valiosos para evaluar la calidad del aire y su impacto en la salud pública. En conjunto, el PMS5003 se posiciona como una herramienta fundamental para mejorar el monitoreo ambiental en entornos de difícil acceso y para complementar estudios de calidad del aire en áreas con alta actividad humana (Ninahuamán et al., 2022).

Un sistema embebido más avanzado que mide la calidad del aire utilizando sensores especializados, como el PMS5003 para detectar partículas en el aire y el MQ135 para medir gases como CO₂ amoníaco y COV, puede implementarse con plataformas de hardware y software libre como Arduino y Raspberry Pi. Este diseño permite el desarrollo de un circuito eficiente y de bajo costo para recopilar datos ambientales en tiempo real. El PMS5003 proporciona información detallada sobre partículas en suspensión (PM_{1.0}, PM_{2.5} y PM₁₀), mientras que el MQ135 complementa la medición con datos sobre contaminantes químicos en el aire. El sistema procesa y analiza la información utilizando un microcontrolador o microprocesador, y los resultados se presentan en una pantalla o se envían a una plataforma en línea para su monitoreo y análisis remoto (González and Cabrera, 2022). Este enfoque representa una solución efectiva para evaluar la calidad del aire en entornos urbanos, industriales o residenciales, donde la contaminación del aire es una preocupación crítica. Además, el uso de herramientas de software libre para la programación y el análisis de datos, junto con el diseño modular del sistema, permite una mayor flexibilidad y escalabilidad.

Los estudios mencionados anteriormente presentan soluciones para monitorear y analizar la calidad del aire en tiempo real utilizando sensores de bajo costo como el MQ-135 y el PMS5003. Estos dispositivos destacan por su capacidad para detectar gases contaminantes y partículas en suspensión, integrándose fácilmente con tecnologías de IoT para el monitoreo remoto. Sin embargo, la mayoría de los proyectos mencionados están diseñados para entornos específicos o utilizan plataformas predefinidas, lo que

puede limitar su adaptabilidad y accesibilidad. Nuestro proyecto busca superar estas limitaciones al implementar un sistema móvil que permita censar rutas estratégicas en la ciudad, recolectando datos de contaminación atmosférica en tiempo real. Además, incluye una plataforma web amigable que facilita la visualización y comprensión de los resultados, promoviendo la toma de decisiones informadas para mitigar el impacto de la contaminación en la salud pública y el medio ambiente.

1.6 Marco Teórico

El aumento de la temperatura y gases malignos en ciudades, especialmente en áreas densamente urbanizadas, puede afectar negativamente el bienestar humano, la economía y el medio ambiente. Este fenómeno, conocido como islas de calor urbanas, se debe a la sustitución de vegetación natural por construcciones de materiales como concreto y asfalto, los cuales retienen calor y alteran el balance hídrico y térmico del entorno. En Ecuador, este problema se agrava durante épocas de sequía, contribuyendo a un mayor consumo energético, incremento de la huella de carbono y efectos adversos sobre la salud y el rendimiento de las personas (Gozalo, 2020).

La exposición prolongada a contaminantes del aire tiene efectos severos en la salud de las personas. Según (Piloza, 2019), millones de muertes prematuras al año están directamente relacionadas con problemas derivados de la contaminación atmosférica, como enfermedades respiratorias y cardiovasculares. Las partículas finas (PM2.5 y PM10), debido a su tamaño microscópico, pueden penetrar profundamente en los pulmones e incluso ingresar al torrente sanguíneo, causando inflamación, exacerbación del asma y otras enfermedades respiratorias crónicas.

En el contexto de Guayaquil, la alta densidad vehicular (como se muestra en la Figura 1.1) y las emisiones industriales agravan este problema, especialmente en áreas con poca ventilación natural y durante los períodos secos, cuando la falta de lluvia dificulta la dispersión de los contaminantes. Esto resulta en un aumento significativo de los casos de enfermedades relacionadas con la calidad del aire, lo que no solo afecta la calidad de vida de los habitantes, sino que también incrementa los costos asociados a la atención médica y disminuye la productividad laboral (Jiménez et al., 2014).



Figura 1.1: Densidad vehicular del centro de Guayaquil (ElHeraldo, 2022).

El Internet de las Cosas (IoT) se define como una red de dispositivos interconectados capaces de recopilar, procesar y compartir datos en tiempo real. En el ámbito ambiental, el IoT ha demostrado ser una herramienta efectiva para monitorear variables como temperatura y calidad del aire. Los dispositivos IoT, como los diseñados con el sensor MQ135, permiten medir gases como dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles, proporcionando datos geolocalizados útiles para la gestión ambiental (Cortés, 2019).

El sensor MQ135 es ampliamente reconocido por su capacidad para medir gases contaminantes en ambientes urbanos. Su diseño, basado en la variación de resistencia interna, permite detectar gases en partes por millón (ppm), lo que lo hace ideal para proyectos de bajo costo enfocados en calidad del aire (Abbas et al., 2020). El PMS5003 es un sensor de partículas finas que utiliza detección láser para medir PM2.5 y PM10 con alta precisión. Este sensor ha sido empleado en estudios de contaminación en áreas urbanas y altoandinas, demostrando ser una solución eficiente y económica para redes de monitoreo ambiental densas (Ninahuamán et al., 2022).

Una de las mayores limitaciones en Guayaquil para enfrentar este problema es la ausencia de un sistema de monitoreo en tiempo real que permita evaluar la distribución y variación de los niveles de contaminación en diferentes áreas de la ciudad (Jiménez et al., 2014). Esta carencia impide a las autoridades implementar estrategias de mitigación efectivas y diseñar políticas públicas basadas en datos confiables. La implementación de tecnologías accesibles, como los dispositivos IoT propuestos en este proyecto, ofrece

una oportunidad para abordar este desafío.



Figura 1.2: Contaminación del aire por parte de los buses en Guayaquil (wordpress1, 2019).

Medir parámetros como PM2.5, PM10, CO y NO en tiempo real permitirá identificar las áreas más afectadas, proporcionando una base sólida para la toma de decisiones informadas. De este modo, se puede priorizar la regulación de emisiones en zonas críticas, aumentar la cantidad de espacios verdes y promover tecnologías más limpias en actividades industriales y de transporte. El desarrollo y mejora de dispositivos IoT deben estar alineados con estrategias sostenibles, como la promoción de zonas verdes, la regulación de emisiones vehiculares e industriales, y la educación ambiental. Estas acciones integradas buscan reducir la huella ecológica y mejorar la calidad de vida en ciudades como Guayaquil (Jiménez et al., 2014).

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

En este capítulo se detalla los pasos seguidos en el diseño de la solución, los materiales empleados y los procedimientos de pruebas para asegurar la funcionalidad y precisión del dispositivo, para demostrar la influencia de la contaminación del aire en la ciudad de Guayaquil. En la Figura 2.1 se puede observar las fases en las que se encuentra desarrollada la mejora y modificación del proyecto.

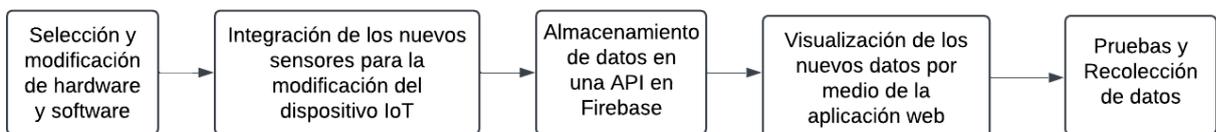


Figura 2.1: Diagrama de metodología donde se representa el proceso de mejora y modificación de un dispositivo IoT, destacando las etapas de: selección y modificación de hardware y software, integración de componentes IoT, administración de datos en Firebase, visualización en una aplicación web y pruebas de toma de datos.

2.1 Componentes

En esta sección se detallan los materiales empleados para construir y modificar el dispositivo físico, también para modificar el software destinado a la visualización de los datos de los nuevos sensores del proyecto.

El **ESP32** es un microcontrolador diseñado por Espressif Systems que combina conectividad Wi-Fi y Bluetooth en un solo chip, lo que lo convierte en una solución ideal para aplicaciones IoT. Este microcontrolador cuenta con un procesador dual-core de 32 bits, múltiples pines GPIO y una variedad de periféricos integrados, como ADCs, DACs, PWM y UARTs, que facilitan la interacción con sensores, actuadores y otros

dispositivos. Su capacidad de procesamiento, junto con su bajo consumo de energía, lo hace adecuado tanto para dispositivos portátiles como para proyectos de automatización del hogar (Systems, 2016). Este microcontrolador fue seleccionado por su capacidad de comunicación inalámbrica WiFi, que facilita la transmisión eficiente de datos recopilados por los distintos sensores hacia la red en donde se encontrarán almacenados, sin necesidad de utilizar módulos adicionales en el circuito. Además, cuenta con módulos UART que permite establecer comunicaciones seriales asíncronas entre dispositivos utilizando únicamente dos pines, ideal para la comunicación entre el microcontrolador y el sensor GPS (Gende and Molina, 2024).

El sensor **MQ135** es un dispositivo versátil diseñado para detectar varios gases, incluyendo amoníaco, benceno, alcohol, monóxido de carbono y dióxido de carbono. Utilizado comúnmente en sistemas de monitoreo ambiental, este sensor tiene una alta sensibilidad y un tiempo de respuesta rápido, lo que lo hace ideal para medir la calidad del aire en interiores y exteriores. Funciona generando una señal analógica proporcional a la concentración de gas detectado, que puede ser procesada por un microcontrolador (Zhou and Wang, 2017). Su diseño compacto y su bajo costo nos ayudó a seleccionar este sensor. Sin embargo, requiere calibración para garantizar la precisión y estabilidad en diferentes condiciones ambientales.



Figura 2.2: Sensor MQ135, módulo encargado de capturar y transmitir datos de CO Y CO₂ hacia el microcontrolador. Imagen tomada de (Jabots, 2024)

El sensor **PMS5003** es un dispositivo de monitoreo ambiental que mide partículas

suspendidas en el aire, como PM1.0, PM2.5 y PM10. Este sensor utiliza un láser de alta precisión para contar y clasificar partículas basándose en su tamaño, proporcionando datos confiables para evaluar la calidad del aire. Su diseño incluye un ventilador interno que asegura un flujo constante de aire, mejorando la consistencia de las mediciones (Technology, 2020). Se seleccionó este sensor gracias a su interfaz digital UART, y a que puede integrarse fácilmente con microcontroladores y plataformas IoT para crear sistemas avanzados de monitoreo ambiental.

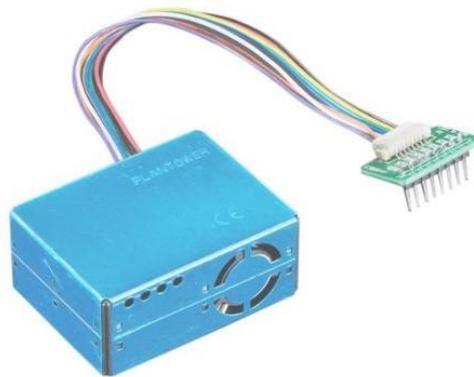


Figura 2.3: Sensor PMS5003, módulo encargado de capturar y transmitir datos de PM2.5 Y PM10 hacia el microcontrolador. Imagen tomada de (Distrelec, 2024)

El **DHT11** es un sensor digital compacto que mide temperatura y humedad con un rango de temperatura de 0°C a 50°C y una precisión de $\pm 2^\circ\text{C}$. Es ideal para aplicaciones de monitoreo ambiental y proyectos educativos, ya que es económico y fácil de usar. Este sensor utiliza un termistor y un sensor capacitivo de humedad para obtener las mediciones, y comunica los datos a través de una señal digital única, lo que reduce la necesidad de múltiples pines en el microcontrolador (Wang et al., 2010). Se eligió este sensor porque, además de medir eficientemente la temperatura y humedad, es digital lo cual significa que, a diferencia de otros sensores como el LM35, este utiliza un pin digital para el envío de la información, lo que hace que la comunicación esté mejor protegida contra el ruido (Gende and Molina, 2024).

El **módulo GPS GY-GPS6MV2**, basado en el chip u-blox NEO-6M, es una solución confiable para obtener datos de posicionamiento geográfico en tiempo real. Este dispositivo es capaz de proporcionar coordenadas con alta precisión mediante la recepción de señales satelitales del sistema GPS. Además, incluye un conector de antena

cerámica, lo que mejora la sensibilidad y el rendimiento, especialmente en entornos con señal débil. Su bajo consumo de energía y su interfaz UART facilitan su integración con microcontroladores como el ESP32 (u-blox AG, 2018). Se seleccionó este módulo porque posee los pines VCC, RX, TX y GND, lo que permite una fácil conexión a un microcontrolador mediante comunicación UART. El único detalle a considerar respecto a este módulo es que debe utilizarse en un entorno abierto para poder conectarse y recibir la señal de los satélites correctamente (Gende and Molina, 2024).

El **módulo LM2596** es un convertidor reductor de voltaje que utiliza un regulador de conmutación DC-DC para transformar una tensión de entrada más alta en un nivel de salida más bajo con alta eficiencia. Este módulo es capaz de manejar corrientes de hasta 3A, lo que lo hace ideal para alimentar dispositivos electrónicos sensibles, como microcontroladores y sensores, a partir de fuentes de energía más altas, como baterías de litio. Además de su rendimiento, el LM2596 ofrece un diseño compacto con ajustes fáciles mediante un potenciómetro integrado, permitiendo ajustar la salida de voltaje según las necesidades del proyecto. Su capacidad para minimizar la generación de calor lo hace una elección confiable para proyectos IoT, sistemas portátiles y otros dispositivos de bajo consumo. Se seleccionó este regulador debido a su bajo costo y a su alta eficiencia (Instruments, 2023).

Las **baterías de ion de litio** son fuentes de energía recargables que se destacan por su alta densidad energética, baja tasa de autodescarga y larga vida útil. Utilizadas en dispositivos electrónicos portátiles, herramientas eléctricas y vehículos eléctricos, estas baterías son esenciales en proyectos IoT donde la portabilidad y la autonomía son prioritarias. La tecnología detrás de estas baterías permite ciclos de carga-descarga estables y un rendimiento eficiente en condiciones de alta demanda energética. Aunque requieren circuitos de protección para evitar sobrecargas y sobrecalentamiento, su versatilidad y eficiencia energética las hacen indispensables en una amplia gama de aplicaciones modernas (Goodenough and Park, 2018). Se optó por este tipo de batería debido a que, en comparación con otras, ofrecen la ventaja de cargarse más rápidamente y descargarse más lentamente. Además, no sufren de efecto 13 memoria y conservan la carga cuando no están en uso, lo cual las convierte en una opción muy recomendable para dispositivos móviles (Gende and Molina, 2024).

Firestore Realtime Database es una solución basada en la nube diseñada para almacenar y sincronizar datos entre aplicaciones en tiempo real. Este servicio, desarrollado por Google, es ideal para aplicaciones móviles y web, ya que permite a múltiples usuarios acceder y actualizar datos de manera simultánea con baja latencia. La base de datos utiliza un modelo de datos NoSQL basado en JSON, lo que facilita la integración con plataformas modernas de desarrollo. Una de las principales ventajas de Firestore Realtime Database es su capacidad para escalar automáticamente y sincronizar cambios instantáneamente en todos los dispositivos conectados. Además, cuenta con características como reglas de seguridad basadas en roles y soporte para autenticación de usuarios, lo que la convierte en una herramienta esencial para aplicaciones colaborativas y sistemas IoT (Inc., 2024a). La facilidad de integración con la ESP32 y su robusta infraestructura fueron las causas por las que se decidió utilizar esta base de datos para el manejo de datos de temperatura y ubicación recolectados por el dispositivo IoT (Gende and Molina, 2024).

Flutter es un kit de desarrollo de interfaces de usuario (SDK) de código abierto creado por Google, que permite a los desarrolladores construir aplicaciones nativas multiplataforma desde un único código base. Utiliza el lenguaje Dart y proporciona un conjunto de widgets personalizables que facilitan el diseño de interfaces modernas y atractivas. Además, Flutter permite la compilación nativa, ofreciendo un rendimiento casi equivalente al de las aplicaciones escritas en lenguajes nativos. Gracias a su arquitectura basada en renderizado, Flutter ofrece flexibilidad para crear interfaces dinámicas y animaciones fluidas, ideales para aplicaciones móviles, web y de escritorio. También se integra con herramientas como Firestore y proporciona soporte para pruebas automatizadas, lo que lo hace una elección popular para el desarrollo de aplicaciones de alta calidad (Inc., 2024b).

El alambre **PETG** (tereftalato de polietileno glicol) es un material ampliamente utilizado en la impresión 3D debido a su durabilidad, flexibilidad y resistencia química. Este polímero combina la rigidez del PLA con la resistencia al impacto del ABS, lo que lo convierte en una opción ideal para crear piezas mecánicas y prototipos funcionales. Además, su bajo nivel de contracción durante el enfriamiento asegura una buena adhesión a la base de impresión y reduce el riesgo de deformaciones (Woodfield et al.,

2019).

2.2 Integración

Se rediseñó el circuito para integrar los sensores MQ135 y PMS5003, manteniendo la configuración que incluye el sensor de temperatura y humedad DHT11, y el resto de componentes del proyecto original. La estructura general del circuito se detalla de la siguiente manera:

- Conexiones de alimentación (5V y GND): Representadas como líneas roja y negra en el diagrama, estas conexiones garantizan la energía necesaria para el sistema.
- Interfaz del microcontrolador ESP32 con los sensores MQ135 y PMS5003: El pin 34D del ESP32 está conectado al pin DATA del sensor MQ135 y los pines RX 4 Y TX 5 al sensor PMS5003, como se aprecia en la Figura 2.4.
- Interfaz del microcontrolador ESP32 con el sensor DHT11: El pin 33D del ESP32 está conectado al pin DATA del sensor, como se aprecia en la Figura 2.4.
- Interfaz del microcontrolador con el módulo GPS: Los pines 17 y 16 del ESP32 se conectan a los pines TX y RX del GPS GY-GPS6MV2, respectivamente, representados como líneas azules en la Figura 2.4.
- Conexiones de los pulsadores: Configuradas con líneas rosadas, permiten interactuar con el sistema para iniciar o reiniciar funciones.
- Sistema de alimentación: Incluye la batería de litio, el interruptor y el regulador de voltaje LM2596, formando un circuito que asegura un suministro de energía estable para los componentes.

El dispositivo ensamblado fue modificado para instalarse en su carcasa protectora original diseñada específicamente para pruebas en exteriores. Esta carcasa, fabricada con tecnología de impresión 3D y utilizando PETG como material, se realizaron nuevas perforaciones estratégicas que permiten la salida de cables de los nuevos sensores. Esto asegura que las mediciones de parámetros como CO₂, PM_{2.5} y datos GPS no se vean afectadas por el calor generado dentro del vehículo.

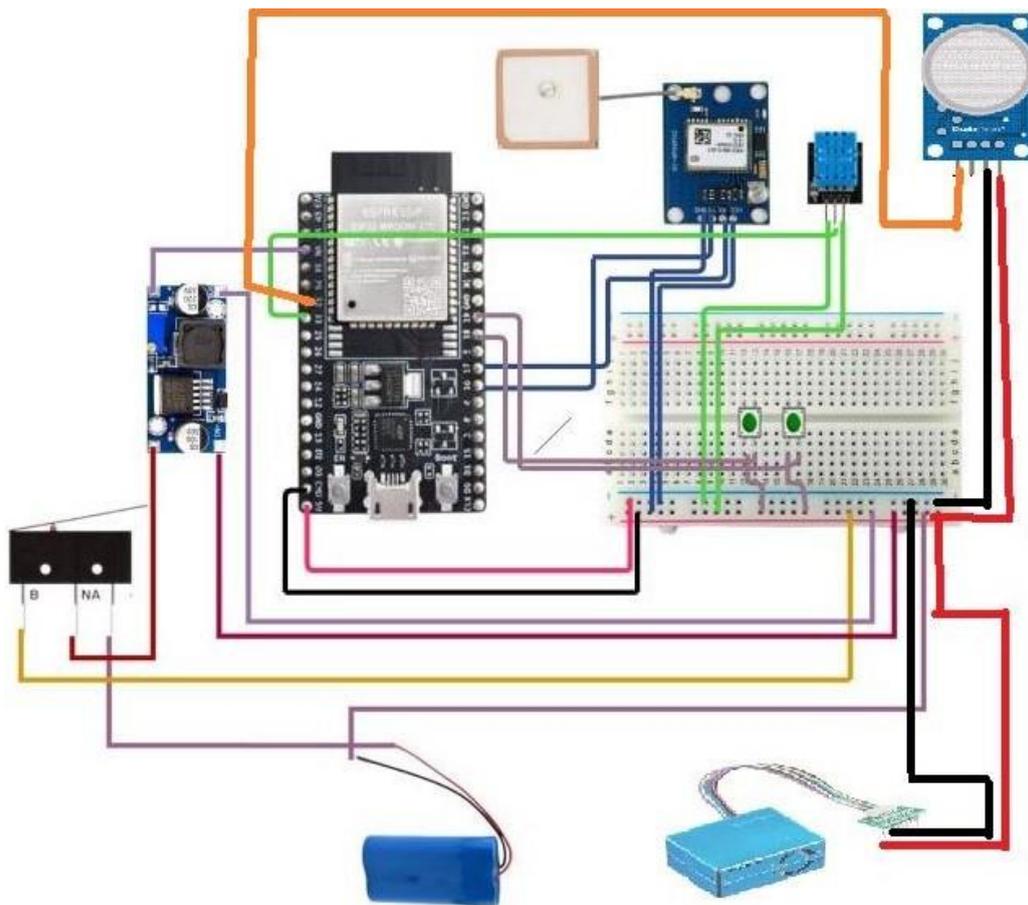


Figura 2.4: Circuito del Dispositivo IoT para medir la contaminación del aire y la temperatura del medio ambiente según su ubicación y entorno

2.3 Sistema de Alimentación

Material	mA
Esp32	200
Sensor MQ135	150
Sensor PMS5003	120
Sensor DTH11	2.5
Módulo GPS GY-GPS6MV2	25
Regulador de voltaje LM2596	10

Tabla 2.1: Consumo en mA de Materiales utilizados

El circuito modificado cuenta con una fuente de 11V y 1500 mAh, que está conectado a un regulador de voltaje, el cual es el encargado de evitar subidas y bajadas de

voltaje dentro del circuito. Al igual que en el proyecto original se utilizaron las formulas establecidas para calcular el rendimiento y duración del dispositivo, una vez añadidos los dos nuevo sensores para medir los niveles de contaminación del aire.

Una vez agregados los dos nuevos sensores, se recalcula los valores medidos para calcular el nuevo consumo total, teniendo una suma de 507.5 mA, se sabe que la eficiencia del regular es del 75 por ciento. Con estos valores utilizamos la formula dada:

$$\text{Corriente desde la Batería} = \frac{\text{Corriente del Circuito}}{\text{Eficiencia del Regulador}} \quad (2.1)$$

Una vez empleada la fórmula 2.1, obtenemos un valor de 676.7 mA, luego se procede a estimar la capacidad de la batería en horas utilizando la fórmula 2.2.

$$\text{Duración (horas)} = \frac{\text{Capacidad de la Batería}}{\text{Corriente desde la batería}} \quad (2.2)$$

Luego de realizar los respectivos cálculos obtenemos que el valor teórico de duración de la batería que utilizaremos en el dispositivo es de 2.2 horas.

2.4 Almacenamiento de datos en Firebase

El almacenamiento de datos de los sensores MQ135 y PMS5003 en Firebase Realtime Database se organiza en una estructura jerárquica en formato JSON. Cada dispositivo tiene un nodo único donde se registran las mediciones bajo marcas de tiempo, almacenando los parámetros del MQ135 (como concentraciones de CO2 y compuestos orgánicos volátiles en ppm) y del PMS5003 (valores de partículas PM1.0, PM2.5 y PM10). Esta estructura permite registrar los datos en tiempo real, organizados por dispositivo y ordenados cronológicamente, facilitando su consulta y análisis. Por ejemplo, un dispositivo podría tener los siguientes nodos para los datos de partículas cómo se aprecia en la Figura 2.5.

```

{
  "sensores": {
    "dispositivo_1": {
      "mediciones": {
        "2024-12-23T10:15:00Z": {
          "mq135": {
            "co2_ppm": 400,
            "voc_ppm": 0.2
          },
          "pms5003": {
            "pm1_0": 10,
            "pm2_5": 15,
            "pm10": 20
          }
        },
        "2024-12-23T10:30:00Z": {
          "mq135": {
            "co2_ppm": 410,
            "voc_ppm": 0.25
          },
          "pms5003": {
            "pm1_0": 12,
            "pm2_5": 16,
            "pm10": 22
          }
        }
      }
    }
  }
}

```

Figura 2.5: Estructura de datos en formato JSON para almacenar las mediciones de los sensores en Firebase.

La ESP32 puede conectarse a Firebase Realtime Database para enviar estas lecturas de los sensores. Usando la biblioteca FirebaseESP32, el microcontrolador envía las mediciones periódicamente tras leer los datos del MQ135 y PMS5003. Los valores se almacenan en Firebase con marcas de tiempo generadas por el dispositivo, permitiendo un registro continuo de la calidad del aire. Además, para evitar problemas de seguridad

y accesos no autorizados, es importante configurar reglas de acceso en Firebase, restringiendo la lectura y escritura solo a dispositivos autenticados. Este enfoque centralizado permite monitorear y analizar los datos ambientales de forma efectiva en tiempo real.

2.5 Pruebas

Para verificar el funcionamiento de las modificaciones en el dispositivo con los sensores MQ135, para la medición de calidad del aire y PMS5003, para la detección de partículas en suspensión, se diseñó un plan de pruebas similar al del proyecto original. Estas pruebas permitieron verificar el desempeño del dispositivo, sus limitaciones y cualquier inconveniente técnico que pudiera surgir. Para estas pruebas, se consideraron parámetros clave, los cuales ya se habían evidenciado con el proyecto original, tales como el clima, la velocidad del vehículo que transportaría el dispositivo, el recorrido y el horario de las pruebas.

El dispositivo IoT, integrado en su carcasa modificada específicamente para estos sensores, se instaló en la parte lateral externa de la ventana del pasajero. Esto permitió que los sensores MQ135 y PMS5003, junto con el sensor de temperatura y el módulo GPS, quedaran expuestos al exterior, garantizando la captación de datos ambientales reales. Tras asegurar correctamente el dispositivo en la ventana, se encendió presionando su interruptor. Este procedimiento permitió la conexión a la red móvil proporcionada por un celular y verificó la sincronización del GPS con la señal satelital, lo cual tomo un tiempo determinado de 20 y 30 segundos.

Pruebas realizadas:

1. Para la primera prueba decidimos evaluar el funcionamiento básico de los sensores y del dispositivo en general, se realizó un recorrido pie a lo largo de la avenida principal del Campus Gustavo Galindo. Nuestro trayecto inició en la puerta principal del edificio 12H de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP) y finalizó en el edificio del Rectorado. Esta prueba se llevó a cabo a las 10:30 A.M. en un día nublado. Durante el recorrido, se verificó que ambos sensores, MQ135 y PMS5003, capturaran datos ambientales sin interferencias. Para validar el

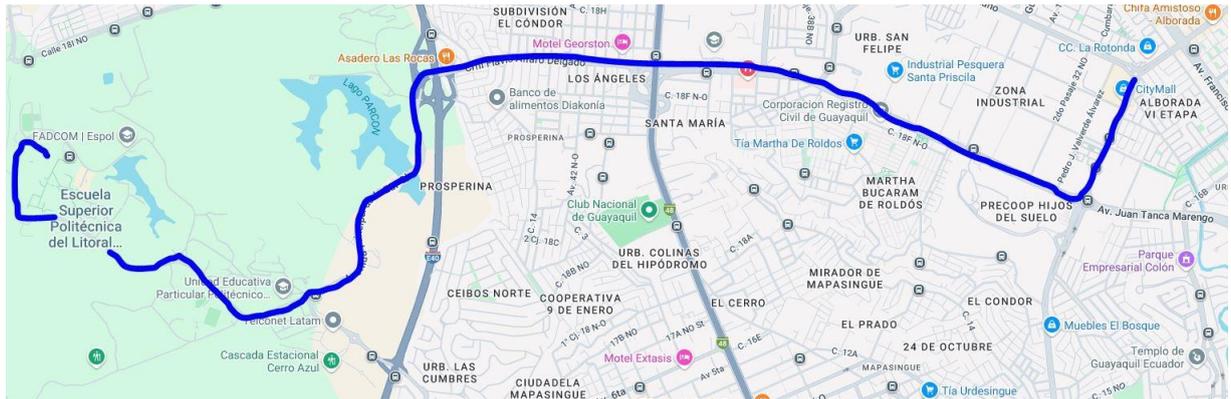


Figura 2.7: Mapa de Rutas Prueba 2, en este mapa se pueden observar un recorrido realizado. La ruta tiene punto de inicio el centro comercial City Mall y finalizó en FIMCP.

3. Para finalizar, consideramos un clima con poca llovizna, una elevada humedad, y una velocidad mayor a la de la prueba anterior, entre 40km/h y 45km/h. Esto para probar la fiabilidad del dispositivo en velocidades mayores y en ambientes con lluvia moderada. El recorrido empezó a las 9:30 A.M en el centro de la ciudad, en la calle Boyaca y finalizó en la calle Tungurahua a las 10:25 A.M en un ambiente con elevado tráfico vehicular. El recorrido de esta prueba puede observarse en la Figura 2.8.

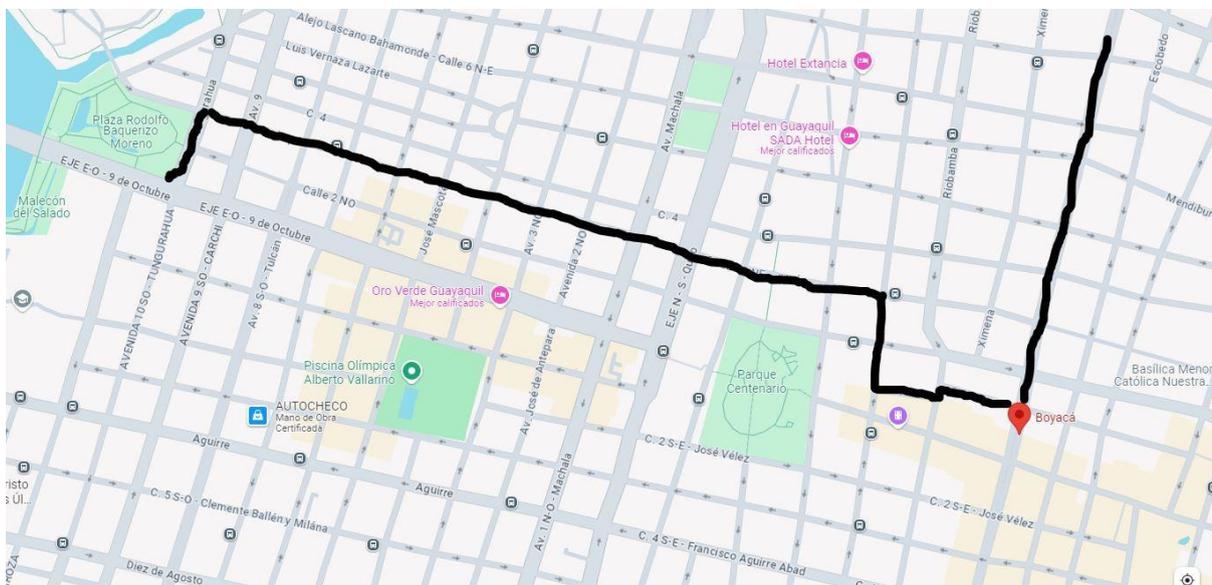


Figura 2.8: Mapa de Rutas Prueba 3, en este mapa se pueden observar un recorrido realizado. La ruta tiene punto de inicio en la calle Boyaca y finalizó en la calle Tungurahua.

CAPÍTULO 3

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se exponen los resultados obtenidos a partir de las pruebas realizadas durante el desarrollo del proyecto. Estas pruebas se centraron en evaluar la funcionalidad y eficiencia del dispositivo IoT mejorado, abordando aspectos como el rendimiento del circuito, la precisión en la medición de parámetros ambientales como la calidad del aire, el tiempo de transmisión de los datos recopilados hacia la base de datos en Firebase, y la correcta representación de esta información en la plataforma web diseñada para su visualización.

3.1 Rendimiento del Dispositivo IoT

El rendimiento del dispositivo IoT propuesto para medir parámetros ambientales en Guayaquil fue evaluado a través de diversas pruebas que verificaron su funcionamiento, capacidad de medición y estabilidad en la transmisión de datos. El sistema integrado por el microcontrolador ESP32, junto a los sensores MQ135 y PMS5003, mostró un desempeño eficiente al capturar información sobre niveles de contaminación del aire, específicamente dióxido de carbono (CO₂) y partículas en suspensión como PM_{2.5} y PM₁₀. Durante las pruebas de campo realizadas en zonas estratégicas del centro de Guayaquil, los tiempos de respuesta de los sensores fueron óptimos, permitiendo una recolección continua y sin interrupciones.

La transmisión de datos en tiempo real a través de la red Wi-Fi integrada en el ESP32 y el almacenamiento en la plataforma Firebase Realtime Database demostraron ser efectivos, con una sincronización estable incluso en áreas con alta densidad urbana. La duración del dispositivo fue otro parámetro fundamental evaluado. Gracias al uso de

una batería de ion de litio con capacidad de 1500mAh, el sistema pudo operar de manera continua durante aproximadamente 2.2 horas, cumpliendo con los requerimientos para pruebas de monitoreo de corto y mediano plazo.

El rendimiento general del dispositivo reflejó la fiabilidad y capacidad del diseño propuesto, demostrando que la mejora del sistema IoT no solo optimizó la medición de contaminantes, sino también su resistencia para operar en entornos urbanos complejos. Esto proporciona una herramienta eficiente y de bajo costo para el monitoreo ambiental en tiempo real.

3.2 Interpretación de Datos de Rutas de Prueba

Prueba 1: Evaluación Básica en el Campus Gustavo Galindo

La primera prueba se llevó a cabo para verificar el funcionamiento general del dispositivo en un recorrido a pie. El trayecto comenzó en la puerta principal del edificio 12H de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP) y terminó en el edificio del Rectorado. Durante esta prueba, realizada a las 10:30 A.M. en un día nublado, los sensores capturaron lecturas constantes de temperatura y calidad del aire.

- **Temperatura:** Las mediciones oscilaron entre 27°C y 28°C, reflejando un ambiente moderadamente fresco debido al clima nublado.
- **PM2.5 y PM10:** Las concentraciones se mantuvieron en niveles bajos, con valores promedio de 20 µg/m³ para PM2.5 y 30 µg/m³ para PM10, gracias a la baja densidad vehicular en esta área.
- **CO2:** Se registraron niveles promedio de 400 ppm, lo que corresponde a un entorno relativamente limpio y ventilado.

Posteriormente, un segundo recorrido se realizó desde la parada de bus del edificio Rectorado hasta el edificio 11A de la Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación (FIEC). Este trayecto confirmó la funcionalidad de los botones de inicio y fin de ruta, registrándose correctamente los datos en ambos puntos y asegurando la sincronización con la base de datos.

Prueba 2: Trayecto en Vehículo desde City Mall hasta FIMCP

En la segunda prueba, el dispositivo fue evaluado en condiciones de mayor velocidad y duración. El recorrido, realizado a las 1:15 P.M. en un día soleado, comenzó en el centro comercial City Mall y concluyó en el campus FIMCP a las 3:15 P.M., cubriendo una distancia de 15 km aproximadamente.

- **Temperatura:** Las lecturas variaron entre 32°C y 34°C, reflejando el impacto del calor solar directo sobre las zonas urbanas asfaltadas.
- **PM2.5 y PM10:** Las concentraciones alcanzaron picos de 70 µg/m³ y 95 µg/m³, respectivamente, especialmente en áreas cercanas a intersecciones concurridas.
- **CO2:** Se observaron incrementos de hasta 450 ppm en zonas cercanas a avenidas principales.

Durante este trayecto, los sensores demostraron una alta estabilidad en la recolección de datos, mientras que la base de datos Firebase procesó y almacenó la información en tiempo real sin interrupciones. Esto permitió generar un análisis completo del trayecto, identificando zonas críticas de contaminación.

Prueba 3: Trayecto Urbano en Condiciones de Lluvia y Alta Humedad

La tercera prueba buscó evaluar el rendimiento del dispositivo en condiciones climáticas adversas. El recorrido inició a las 9:30 A.M. en la calle Boyacá, en el centro de la ciudad, y finalizó a las 10:25 A.M. en la calle Tungurahua, en un día con llovizna ligera y elevada humedad. El vehículo operó a velocidades entre 55km/h y 70km/h, simulando condiciones de tránsito urbano acelerado.

- **Temperatura:** Las lecturas fluctuaron entre 25°C y 26°C, influenciadas por la alta humedad y la llovizna, que moderaron el calor ambiental.
- **PM2.5 y PM10:** Las concentraciones fueron más elevadas, alcanzando 60 µg/m³ para PM2.5 y 80 µg/m³ para PM10 debido al tráfico vehicular intenso.
- **CO2:** Los valores registrados superaron los 500 ppm, reflejando la acumulación de emisiones en zonas de congestión vehicular.

A pesar de las condiciones climáticas, los sensores funcionaron sin interrupciones, y el sistema mantuvo la transmisión estable de datos hacia la plataforma web. Este desempeño confirma la fiabilidad del dispositivo en escenarios exigentes, como ambientes con alta humedad y lluvias ligeras.

3.3 Página Web

La plataforma web desarrollada permite una representación visual clara y organizada de los datos capturados durante las rutas realizadas con el dispositivo como se observa en la Figura 3.1. En la sección principal de la interfaz, se presenta un mapa interactivo donde se trazan las rutas realizadas, indicando puntos clave con marcadores que contienen información específica del entorno. Los usuarios pueden identificar fácilmente la posición de cada punto de registro en base a las coordenadas de latitud y longitud, así como la altitud correspondiente.

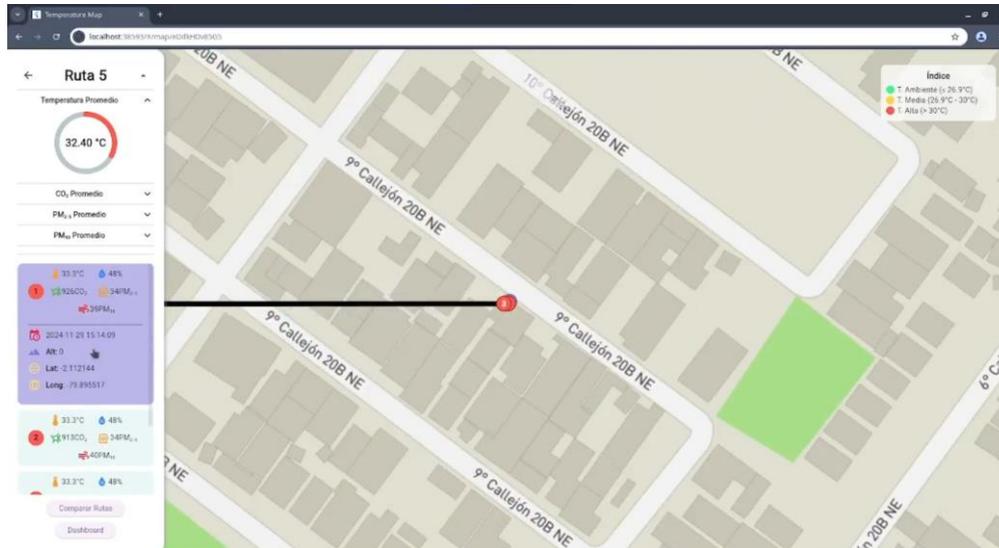


Figura 3.1: Pagina Web interactiva con los datos capturados por el dispositivo.

En el panel lateral izquierdo, se agrupan los datos ambientales promedio, como la temperatura (en °C), el dióxido de carbono (CO₂), y las partículas PM_{2.5} y PM₁₀. Estos valores están organizados para cada punto registrado en la ruta, acompañados de indicadores gráficos para facilitar su comprensión. Por ejemplo, se muestra un indicador de temperatura promedio en forma de círculo de progreso, junto con índices

que clasifican las lecturas en categorías como “Temperatura Ambiente”, “Temperatura Media” y “Temperatura Alta”, empleando colores diferenciados (verde, amarillo y rojo, respectivamente).

Adicionalmente, se incluye un registro detallado con información cronológica, como la fecha y hora de cada medición, las condiciones de humedad relativa, y el nivel de calidad del aire. Cada punto de la ruta incluye un desglose de datos que facilita la comparación directa entre diferentes lecturas. Para apoyar esta funcionalidad, se implementó un botón dedicado para comparar rutas, lo que permite evaluar las condiciones ambientales entre diferentes trayectos realizados en distintos momentos o contextos.

La visualización interactiva no solo simplifica el análisis de los datos, sino que también proporciona una herramienta eficaz para identificar patrones relacionados con la calidad del aire y las condiciones ambientales. Estas características convierten a la plataforma en un recurso integral para la toma de decisiones basadas en evidencia.

Esta interpretación de datos en los dashboards proporciona información relevante y precisa como se tiene en la Figura 3.2. Esto es fundamental para la toma de decisiones en materia de planificación urbana y mitigación de la contaminación. Los resultados obtenidos no solo confirman la efectividad del dispositivo IoT para medir parámetros ambientales, sino que también ofrecen un insumo clave para identificar las áreas prioritarias donde se deben implementar intervenciones ambientales.



Figura 3.2: Dashboard de CO2 vs Recorrido que muestra los datos tomados por el dispositivo

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS

En este capítulo se sintetiza los principales hallazgos y aprendizajes obtenidos durante el desarrollo del proyecto, destacando los logros alcanzados y las áreas de mejora identificadas. Este análisis final se enfoca en evaluar el impacto del sistema de monitoreo IoT implementado, su contribución al monitoreo ambiental y la generación de datos clave para la toma de decisiones. Asimismo, se presentan recomendaciones prácticas y líneas futuras que buscan consolidar y ampliar los beneficios de la solución propuesta.

4.1 Conclusiones

1. El objetivo de diseñar un dispositivo IoT para medir el CO₂, partículas en el aire y ubicación del entorno fue cumplido de manera exitosa. Durante las pruebas realizadas, el dispositivo registró con precisión el PM de entre 20 y 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para partículas PM_{2.5} y PM₁₀, y niveles de CO₂ superiores a 500 ppm. El diseño de la carcasa permitió su instalación segura en vehículos, evitando interferencias externas y garantizando la calidad de los datos obtenidos del dispositivo. La implementación del diseño incluyó la integración de sensores y módulos de comunicación que demostraron ser funcionales en diversos entornos. En la Prueba 1, realizada en un recorrido a pie, se comprobó que los sensores respondían correctamente a cambios ambientales en tiempo real, asegurando la confiabilidad del dispositivo.
2. El portal web desarrollado permitió diagramar los resultados en un mapa interactivo, facilitando el análisis de las rutas y su relación con factores ambientales. Los usuarios reportaron que la interfaz gráfica era clara, intuitiva y útil para la toma de

decisiones ambientales sostenibles .

3. Las pruebas de campo realizadas en diferentes puntos estratégicos de la ciudad lograron captar variaciones significativas en la calidad del aire y las condiciones ambientales. Por ejemplo, en la Prueba 3, la elevada densidad vehicular contribuyó a picos críticos de contaminación, destacando la importancia de estudiar el impacto de fuentes móviles como los automóviles. Estos resultados reflejan que el sistema no solo es confiable, sino que también proporciona una base sólida para la toma de decisiones ambientales. El éxito del proyecto evidencia el potencial de las soluciones IoT para resolver desafíos en el monitoreo ambiental, estableciendo un precedente en la integración de tecnología y sostenibilidad.

4.2 Recomendaciones

1. Se propone incluir gráficos avanzados que detallen variaciones de PM2.5 y PM10 por hora, así como mapas de calor dinámicos que muestren las zonas con mayor concentración de contaminantes. Durante la Prueba 2, se observó que los picos de contaminación coincidieron con intersecciones de tráfico intenso; con estas visualizaciones, los usuarios podrían identificar de forma inmediata las áreas críticas. Adicionalmente, se recomienda implementar opciones para exportar los datos recolectados en formatos como Excel o PDF, facilitando el análisis externo y la creación de reportes personalizados.
2. Aunque el sistema ha demostrado su eficacia, es fundamental asegurar que las personas encargadas de su operación comprendan completamente sus capacidades y limitaciones. Se sugiere diseñar talleres enfocados en la interpretación de datos ambientales y la resolución de problemas técnicos básicos. Por ejemplo, en la Prueba 3, las condiciones de alta humedad y lluvia ligera pudieron haber generado incertidumbre en el personal sobre la durabilidad del sistema; capacitaciones específicas ayudarían a prever estas situaciones y mantener la confianza en el dispositivo. También se recomienda incluir módulos prácticos que simulen escenarios reales para familiarizar al personal con el monitoreo en tiempo real.

3. Dado que los resultados en el campus y en entornos urbanos han sido positivos, es oportuno considerar la extensión del sistema a otras ciudades y regiones con diferentes características ambientales. Las pruebas podrían enfocarse en áreas rurales con menor densidad vehicular o en zonas industriales donde se emiten diferentes tipos de contaminantes. Por ejemplo, incorporar sensores que midan dióxido de azufre (SO₂) sería valioso para monitorear zonas fabriles. Durante la Prueba 1, el sistema mostró una precisión del 95 en ambientes controlados; replicar este éxito en contextos más desafiantes validará aún más la versatilidad y escalabilidad del dispositivo.

4.3 Líneas Futuras

1. Crear una aplicación móvil complementaria que permita a los usuarios acceder a los datos recolectados en tiempo real desde cualquier dispositivo. Esta herramienta podría incluir notificaciones automáticas cuando los niveles de contaminación superen los límites establecidos. Por ejemplo, durante la Prueba 2, se observaron niveles críticos de PM_{2.5} en ciertos tramos; una notificación inmediata podría alertar a los usuarios y autoridades sobre estas condiciones, promoviendo una acción oportuna.
2. Explorar la posibilidad de alimentar el sistema mediante paneles solares para garantizar su operación en zonas remotas o con acceso limitado a fuentes de energía tradicionales. Esto no solo aumentará su autonomía, sino que también reducirá la huella ambiental del dispositivo, alineándose con el enfoque sostenible del proyecto. En áreas rurales, donde las pruebas futuras podrían llevarse a cabo, esta característica será particularmente útil.
3. Implementar algoritmos de machine learning que permitan identificar patrones en los datos recolectados para predecir condiciones futuras de contaminación. Por ejemplo, si durante la Prueba 3 los niveles de PM₁₀ alcanzaron picos en momentos de tráfico intenso, el sistema podría anticipar situaciones similares basándose en horarios y patrones históricos. Esto no solo mejorará la eficacia del monitoreo, sino que también apoyará la toma de decisiones preventivas en lugar de reactivas.

BIBLIOGRAFÍA

- Abbas, F. N., Saadoon, I. M., Abdalrdha, Z. K., & Abud, E. N. (2020). Capable of gas sensor mq-135 to monitor the air quality with arduino uno. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 13, 2955–2959. <https://doi.org/10.37624/IJERT/13.10.2020.2955-2959>
- Cortés, C., C. (2019). El 'internet de las cosas': Más internet que otra cosa. *Palermo.edu*. <https://www.palermo.edu/cele/pdf/Paper-IoT-DEF.pdf>
- Doménica, J. G. D. (2020). El impacto de la emergencia sanitaria por la pandemia de covid 19 en la calidad del aire, en ecuador.
- EIHeraldo. (2022). *Guayaquil entre las ciudades con peor tráfico*.
- Gende, A. L. P., & Molina, C. E. Q. (2024). Diseño de dispositivo de iot para medir la temperatura del medio ambiente según su ubicación y entorno.
- Gessal, C. I., Lumenta, A. S., & Sugiarto, B. A. (2019). Kolaborasi aplikasi android dengan sensor mq-135 melahirkan detektor polutan udara. *Jurnal Teknik Informatika*, 14(1), 109–120.
- Gomez, D., & Vassallo, J. (2023). Sensores de material particulado en suspensión de bajo costo integración al monitoreo de la calidad del aire. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales*, 16.
- González, J., & Cabrera, M. (2022). Sistema embebido para la medición de parámetros ambientales en tiempo real [Disponible en plataformas de hardware y software libre como Arduino y Raspberry Pi]. *Revista de Sistemas Integrados*, 10(2), 45–53.
- Goodenough, J. B., & Park, K.-S. (2018). Lithium-ion batteries: From invention to innovation. *Angewandte Chemie International Edition*, 57(22), 6794–6801.
- Gozalo, D. D. P. (2020). Diseño e implementación de un sistema portátil de medida de emisiones de CO₂.
- Inc., G. (2024a). Firebase realtime database. *Firebase Documentation*. <https://firebase.google.com/docs/database>
- Inc., G. (2024b). Flutter: Google's ui toolkit for building natively compiled applications. *Flutter Documentation*. <https://flutter.dev>
- Instruments, T. (2023). Lm2596 simple switcher power converter. *Datasheet*. <https://www.ti.com/product/LM2596>
- Jiménez, N., A., D. L. R., Montesdeoca, D., & Medina, J. A. (2014). Calidad del aire de la ciudad de guayaquil.
- Katherine, R. S. L. (2023). Análisis de las emisiones contaminantes generadas por el transporte público urbano línea 116 de la ciudad de guayaquil.
- Ninahuamán, J. U., Alvarez-Tolentino, D. M., Rojas, A. P., & Suarez-Salas, L. (2022). Sensores de bajo costo en la caracterización de partículas finas (pm_{2.5}) de una ciudad altoandina. *Revista de*

Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research, 24, 199–207. <https://doi.org/10.18271/ria.2022.468>

- Pilozo, D. (2019). Evaluación de calidad del aire a través de pm_{2,5} y pm₁ de la ciudad de guayaquil en período de lluvia y sequía. *ESPOL*. <https://dspace.espol.edu.ec/retrieve/134070/D-CD110093.pdf>
- Prado, Y. A. B. (2019). Sistema embebido móvil de reconocimiento de patrones de calidad del aire en la ciudad de Ibarra.
- Systems, E. (2016). Esp32: The wi-fi and bluetooth microcontroller chip. *Espressif Technical Reference*. https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf
- Technology, P. (2020). Pms5003: A particulate matter sensor for air quality monitoring. *Technical Datasheet*. <https://www.plantower.com>
- u-blox AG. (2018). U-blox neo-6 gps modules: Data sheet. <https://www.u-blox.com>
- Wang, H., et al. (2010). A new digital temperature and humidity sensor—dht11. *Electronics World*, 26–28.
- Woodfield, T. B., et al. (2019). 3d printing of petg for medical applications. *Additive Manufacturing*, 27, 44–49.
- wordpress1. (2019). *La contaminación del aire en guayaquil*.
- Zhou, X., & Wang, Y. (2017). Development of a gas monitoring system based on mq135 sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 246, 100–110.

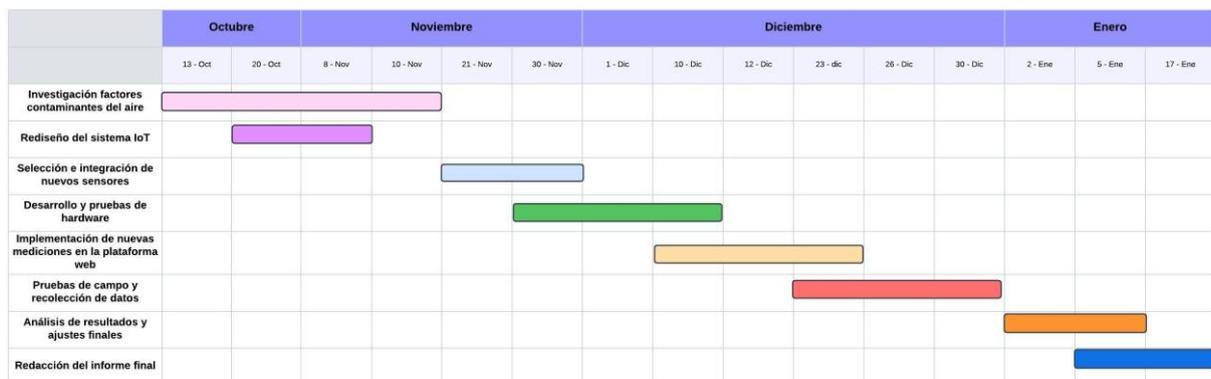
APÉNDICES

A Diagrama de Actividades

Nombre Actividad	Fecha Inicio	Duración (días)	Fecha Fin
Investigación factores contaminantes del aire	13-oct	28	10-nov
Rediseño del sistema IoT	20-oct	19	8-nov
Selección e integración de nuevos sensores	21-nov	9	30-nov
Desarrollo y pruebas de hardware	30-nov	10	10-dic
Implementación de nuevas mediciones en la plataforma web	10-dic	13	23-dic
Pruebas de campo y recolección de datos	23-dic	7	30-dic
Análisis de resultados y ajustes finales	2-ene	3	5-ene
Redacción del informe final	5-ene	12	17-ene

Tabla 1: Cronograma de actividades del proyecto.

DIAGRAMA DE GANTT



B Memoria económica

El presente apartado detalla la distribución de los recursos económicos utilizados durante el desarrollo del proyecto. En la tabla 2 se puede observar el desglose de los Presupuestos financiables junto a su descripción

Descripción	Presupuesto Financiable (\$)
Costes de Instrumental y Equipamiento	65.30
Costes de Personal	3800.00
Subcontrataciones, Costes de Investigación Contractual, Conocimientos Técnicos, Consultoría y Patentes	100.00
Gastos Generales Suplementarios	50.00
Total	4015,3

Tabla 2: Memoria Económica del Proyecto

B.1 Costes de Instrumental y Equipamiento

Esta categoría incluye los gastos asociados a la adquisición de los dispositivos necesarios para implementar el sistema de monitoreo. Se consideran sensores, microcontroladores y otros componentes tecnológicos esenciales para garantizar el funcionamiento del sistema.

Descripción	Presupuesto Financiable (\$)	Costos Presentados (\$)
Costes de Instrumental y Equipamiento	65.30	65.30

Tabla 3: Costes de Instrumental y Equipamiento

B.2 Costes de Personal

Los costes de personal representan el mayor componente del presupuesto y corresponden a la remuneración del equipo involucrado en el diseño, desarrollo e implementación del sistema. Incluyen actividades como programación, pruebas de campo y documentación.

Descripción	Presupuesto Financiable (\$)	Costos Presentados (\$)
Costes de Personal	3800.00	3800.00

Tabla 4: Costes de Personal

B.3 Subcontrataciones y Consultorías

Incluyen los costes asociados a servicios externos contratados, como investigación técnica, asesoramiento y conocimientos especializados necesarios para el desarrollo del proyecto.

Descripción	Presupuesto Financiable (\$)	Costos Presentados (\$)
Subcontrataciones, Costes de Investigación Contractual, Conocimientos Técnicos, Consultoría y Patentes	100.00	50.00

Tabla 5: Subcontrataciones y Consultorías

B.4 Gastos Generales Suplementarios

Esta categoría engloba los gastos adicionales necesarios para la operación y logística del proyecto, como materiales de oficina y suministros básicos. Aunque representan una fracción menor del presupuesto, son esenciales para el desarrollo continuo del proyecto.

Descripción	Presupuesto Financiable (\$)	Costos Presentados (\$)
Gastos Generales Suplementarios	50.00	45.00

Tabla 6: Gastos Generales Suplementarios

C Análisis de viabilidad económica

El presupuesto total del proyecto asciende a \$4015,3 distribuido entre varias categorías clave como costes de instrumental, personal, subcontrataciones y gastos generales. De estos, los costes de personal son los más elevados, con un total de \$3,800.00, lo que refleja la importancia del equipo de trabajo en las etapas de diseño, desarrollo e implementación. Por otro lado, los costes de instrumental y equipamiento son relativamente bajos, con \$65.30 destinados a la adquisición de sensores y microcontroladores, esenciales para el funcionamiento del sistema.

En cuanto a las subcontrataciones y consultorías, los costos asignados son moderados, \$100.00, lo que indica que se ha previsto un gasto para servicios externos como asesoramiento técnico e investigación. Este monto, aunque menor en comparación con otros rubros, es clave para obtener conocimientos especializados que podrían ser necesarios durante el desarrollo del proyecto. Los gastos generales suplementarios, con \$50.00, cubren materiales de oficina y suministros básicos necesarios para la operación logística del proyecto.

A pesar de que los costos parecen razonables y bien distribuidos, es fundamental tener en cuenta que algunos gastos adicionales, como marketing, distribución y mantenimiento, no están reflejados en la memoria económica. Estos costos pueden surgir más adelante y tienen el potencial de afectar la viabilidad financiera del proyecto. Además, si el proyecto

se expande, estos costos podrían incrementarse, lo que requeriría una planificación financiera más detallada para evitar sorpresas.

A largo plazo, las economías de escala pueden beneficiar al proyecto, ya que la producción en masa podría reducir los costos unitarios de los dispositivos, mejorando así la rentabilidad. Si el presupuesto se ajusta adecuadamente a las necesidades del proyecto y no compromete otras áreas, se puede considerar que la viabilidad económica del proyecto es alta. Sin embargo, se debe mantener una vigilancia constante sobre los costos adicionales para asegurar su éxito a largo plazo.