

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN DISPOSITIVO DE MEDICIÓN DE LA
CALIDAD DEL AIRE EN RECINTOS ABIERTOS Y CERRADOS PARA LA
DETECCIÓN Y MEDICIÓN DE GASES NOCIVOS PARA LA SALUD**

PRESENTADA POR

**JOHNATHAN GABRIEL CASELLES NUÑEZ
OSCAR ALEJANDRO CONTRERAS NEGRETTE**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL CARIBE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
BARRANQUILLA - COLOMBIA**

2023

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN DISPOSITIVO DE MEDICIÓN DE LA
CALIDAD DEL AIRE EN RECINTOS ABIERTOS Y CERRADOS PARA LA
DETECCIÓN Y MEDICIÓN DE GASES NOCIVOS PARA LA SALUD**

**JOHNATHAN GABRIEL CASELLES NUÑEZ
OSCAR ALEJANDRO CONTRERAS NEGRETTE**

**Trabajo de grado presentado para optar al título de
Ingeniero Mecatrónico**

**ASESORES DISCIPLINARES:
ING. KELVIN BELEÑO SÁENZ, PhD
ING. CARLOS GABRIEL DÍAZ SÁENZ, PhD**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL CARIBE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
BARRANQUILLA - COLOMBIA**

2023

Nota de aceptación

Firma del jurado 1

Firma del jurado 2

DEDICATORIA 1

Deseo dedicar esta tesis a las personas más importantes en mi vida: mi padre, John Jairo Caselles, mi madre, Nayalin Nuñez, y mi hermana, Nathaly Caselles. Agradezco su apoyo incondicional, su amor y su fe en mí, siempre me han inspirado a ser mi mejor versión. Sin ellos, este logro no hubiera sido posible.

También quiero expresar mi gratitud a mis dos mejores amigos, con quienes he compartido los altos y bajos de toda la carrera académica. Su amistad y apoyo han sido invaluableles en mi vida.

Por último, pero no menos importante, quiero agradecer a mis abuelas, tíos y primos por siempre creer en mí y por estar siempre presentes.

DEDICATORIA 2

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia en general, a mi padre Oscar Javier Contreras y mi madre Adelina Negrette, que me brindaron su apoyo incondicional desde el principio, creyendo en mis capacidades y decisiones, que fueron una gran ayuda tanto en el aspecto económico como emocional, lo cual fue mi importante para llegar al objetivo planteado durante el trabajo presentado. También quiero agradecer a mi mejor amigo y mi pareja por su constante motivación en cada paso de este largo camino que hoy culmina con la presentación de nuestra tesis.

Finalmente quiero dedicar esta tesis a cinco personas que son muy importante en mi vida quienes son mi Abuelo Carlos Arteaga, mi Abuela Elsy Negrette, mi tío Bartolo Negrette, mi tía Dolly Negrette por último mi Bisabuela Isolina Montesino que han sido una gran influencia en mi vida Desde que era pequeño, me han brindado un amor incondicional y una calidez familiar que siempre me han hecho sentir seguro y feliz. Pasando cada momento en la finca con ustedes, me han enseñado muchas cosas valiosas, desde el amor por la naturaleza hasta la importancia de trabajar duro y perseverar en la vida. Siempre he admirado su fortaleza y su sabiduría, y he sido inspirado por su ejemplo. Por todo lo que han hecho por mí, por su amor y por sus enseñanzas, quiero expresar mi más profundo agradecimiento. Espero que se sientan orgullosos de lo que he logrado y espero poder devolverles todo lo que han hecho por mí de alguna manera.

TABLA DE CONTENIDO

GLOSARIO	12
RESUMEN.....	13
ABSTRACT.....	13
1. INTRODUCCIÓN.....	14
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
2.1. PREGUNTA PROBLEMA	17
2.2. JUSTIFICACION Y ALCANCE.....	18
3. OBJETIVOS	19
3.1. OBJETIVO GENERAL.....	19
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
4. MARCO DE REFERENCIA	20
4.1. ESTADO DEL ARTE	20
5. MARCO TEÓRICO.....	26
5.1. CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA.....	26
5.2. CALIDAD AMBIENTAL.....	27
5.3. FUENTES DE CONTAMINACIÓN INTERIOR	27
5.4. FUENTES DE CONTAMINACIÓN EXTERIOR.....	30
5.5. ESTACIONES DE MONITOREOS FIJAS DE LA CALIDAD DEL AIRE	33
5.6. DISPOSITIVOS MÓVILES DE MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE.....	34
5.7. INTERNET DE LAS COSAS (IOT)	35
5.8. PROTOCOLO MQTT.....	36
5.9. ARDUINO IDE	38
5.10. SENSORES MQ	38
6. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO.....	39
6.1. METODLOGÍA.....	39
6.2. TIPO DE ESTUDIO	40
6.2.1. CUANTITATIVA EXPERIMENTAL	40
6.3. POBLACION Y MUESTRA	41
6.4. CRONOGRAMA – PLAN DE TRABAJO.....	42
7. PRESUPUESTO.....	43
7.1. PRESUPUESTO GENERAL.....	43
7.2. PERSONAL CIENTÍFICO Y DE APOYO	43
7.3. CONSULTORIA ESPECIALIZADA	44

7.4.	MATERIALES, INSUMOS Y EQUIPOS	45
8.	PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	46
8.1.	DISEÑO DEL PROTOTIPO	46
8.1.1.	DISEÑO CAD	46
8.1.2.	DISEÑO DE CIRCUITO IMPRESO (PCB).....	47
8.1.3.	CONSTRUCCIÓN Y ENSAMBLAJE.....	50
8.1.4.	FABRICACIÓN DEL DISPOSITIVO.....	51
8.2.	DISEÑO DE LA INTERFAZ DE VISUALIZACION DE DATOS.....	51
8.3.	DISEÑO DEL DISPOSITIVO FINAL	53
8.4.	CARACTERISTICAS DE LOS COMPONENTES	54
8.4.1.	ESP32	54
8.4.2.	MQ135.....	55
8.4.3.	MQ131.....	56
8.4.4.	MICS4514	57
8.4.5.	SPS30	58
8.4.6.	MODULO NEO 6M	59
8.4.7.	MODULO SIM800L.....	60
8.4.8.	MODULO USB-C TP4056	61
8.4.9.	MINI BOOST STEP UP	62
8.4.10.	DHT22 (AM2302).....	63
8.5.	CALCULO DE LA BATERÍA	64
8.6.	BATERIA POLIMERO DE LITIO 3.7V 2000mAh	65
8.7.	RESOLUCIÓN 2254 DE 2017	66
8.8.	INDICE DE LA CALIDAD DEL AIRE (ICA)	67
8.9.	RECOLECCIÓN DE DATOS	70
8.10.	ANALISIS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS POR EL DISPOSITIVO	73
8.11.	VISUALIZACIÓN DE DATOS AL SERVIDOR WEB BLYNK.....	86
8.12.	MANUAL DE USUARIOS.....	88
9.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	89
10.	BIBLIOGRAFIA	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Efectos de la contaminación del aire [21].	26
Figura 2. Fuentes de contaminación interior [25].	28
Figura 3. Contaminantes atmosféricos del exterior [26].	30
Figura 4. Material particulado o PM [28].	31
Figura 5. Estación fija de monitoreo de la calidad del aire [31].	33
Figura 6. Dispositivo móvil de monitoreo de la calidad del aire [32].	34
Figura 7. IoT [33].	35
Figura 8. Protocolo MQTT [34].	37
Figura 9. Diagrama de bloques del dispositivo Q-Air (Autoría propia).	39
Figura 10. Carcasa (Autoría Propia).	46
Figura 11. Tapa (Autoría Propia).	47
Figura 12. Conexiones de los sensores (Autoría Propia).	48
Figura 13. Capa 1 de PCB (Autoría Propia).	48
Figura 14. Capa 2 de PCB (Autoría Propia).	49
Figura 15. Diseño PCB (Autoría Propia).	49
Figura 16. Dispositivo Ensamblado (Autoría Propia).	50
Figura 17. Fabricación del dispositivo (Autoría Propia).	51
Figura 18. Diseño de la interfaz de visualización de datos (Autoría Propia).	52
Figura 19. Dispositivo Final (Autoría Propia).	53
Figura 20. ESP32 [35].	54
Figura 21. MQ-135 [37].	55
Figura 22. MQ-131 [38].	56
Figura 23. MICS4514 [39].	57
Figura 24. SPS30 [39].	58
Figura 25. MODULO NEO 6M [40].	59
Figura 26. MODULO SIM800L [41].	60
Figura 27. MODULO USB-C TP4056 [42].	61
Figura 28. MINI BOOST STEP UP [42].	62
Figura 29. Sensor DHT22 [43].	63
Figura 30. Batería Lipo de 3.7V y 2000mAh [44].	66
Figura 31. Localización Universidad del Norte (Autoría Propia).	70
Figura 32. Localización parque de la Electrificadora (Autoría Propia).	70
Figura 33. Salida de campo en los puntos de la Universidad del Norte y del parque de la Electrificadora (Autoría propia).	73
Figura 34. Visualización de las mediciones promediado en Blynk (Autoría Propia).	87
Figura 35. Manual de usuario Q-Air (Autoría Propia).	88

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Cronograma.	42
Tabla 2. Presupuesto general.	43
Tabla 3. Costo personal científico.	44
Tabla 4. Costo personal de apoyo.....	44
Tabla 5. Costo consultoría especializada.....	44
Tabla 6. Costo materiales e insumos.	45
Tabla 7. Costo trabajo de campo.	45
Tabla 8. Costo equipos usados.	45
Tabla 9. Características electrónicas del ESP32.....	54
Tabla 10. Características electrónicas del MQ-135.....	55
Tabla 11. Características electrónicas del MQ-131.....	56
Tabla 12. Características electrónicas del MICS4514.....	57
Tabla 13. Características electrónicas del SPS30.....	58
Tabla 14. Características electrónicas del Módulo NEO 6M.	59
Tabla 15. Características electrónicas del Módulo SIM800L.....	60
Tabla 16. Características electrónicas del Módulo USB-C TP4056.	61
Tabla 17. Características electrónicas del Mini Boost Step Up.	62
Tabla 18. Características electrónicas del DHT22.	63
Tabla 19. Características electrónicas de Batería Lipo de 3.7V y 2000mAh.	66
Tabla 20. Niveles máximos permisibles de criterio del aire [45].	67
Tabla 21. Descripción general del Índice de Calidad del Aire [45].	68
Tabla 22. Puntos de corte del Índice de Calidad del Aire [45].	69
Tabla 23. Segmento de datos obtenidos en la Universidad del Norte.....	71
Tabla 24. Segmento de datos obtenidos en el parque la Electrificadora.....	72
Tabla 25. Medición de porcentaje de error Universidad del Norte.....	84
Tabla 26. Medición de porcentaje de error parque de la Electrificadora.	84

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Medición de Dióxido de Nitrógeno (NO ₂) Universidad del norte.	74
Gráfica 2. Medición de Monóxido de Carbono (CO) Universidad del norte.	75
Gráfica 3. Medición de Ozono (O ₃) Universidad del norte.....	75
Gráfica 4. Medición de Materia Particulada PM10 Universidad del norte.....	76
Gráfica 5. Medición de Materia Particulada PM2.5 Universidad del norte.....	77
Gráfica 6. Medición de Humedad Universidad del norte.	77
Gráfica 7. Medición de Temperatura Universidad del norte.	78
Gráfica 8. Medición de Dióxido de Nitrógeno (NO ₂) parque de la Electrificadora.	79
Gráfica 9. Medición de Monóxido de Carbono (CO) parque de la Electrificadora.	79
Gráfica 10. Medición de Ozono (O ₃) parque de la Electrificadora.	80
Gráfica 11. Medición de Materia Particulada PM10 parque de la Electrificadora.	81
Gráfica 12. Medición de Materia Particulada PM2.5 parque de la Electrificadora.	81
Gráfica 13. Medición de Humedad parque de la Electrificadora.....	82
Gráfica 14. Medición de Temperatura parque de la Electrificadora.....	83

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Corriente total.....	64
Ecuación 2. Tiempo de duración.....	65
Ecuación 3. ICA.....	69

GLOSARIO

Contaminación Atmosférica: Es la presencia de agentes químicos, físicos o biológicos que alteran las características naturales de la atmósfera.

Contaminación del aire: Mezcla de partículas sólidas y gases en el aire que pueden implicar riesgo, daño o molestia para las personas, plantas y animales que se encuentran expuestas a dicho ambiente.

Gases: Conjunto de moléculas que pueden moverse libremente en el espacio y a una gran distancia unas de otras.

Polvo: Mezcla de materiales sólidos y gases diminutos que están suspendido en el aire.

Sensores: Herramientas que detectan y responden a algún tipo de información del entorno físico.

Estaciones de la calidad del aire: Son espacios adecuados con herramientas y equipos que tienen como función monitorear los niveles de concentraciones de gases y materias particuladas en el ambiente.

RESUMEN

Este documento presenta un paso a paso detallado del diseño y construcción de un dispositivo de monitoreo de la calidad del aire en recintos abiertos y cerrados, el cual se compone de sensores electrónicos capaces de medir gases como el Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Nitrógeno (NO₂), Ozono (O₃), además de medir la temperatura y humedad, así como las concentraciones de material particulado PM2.5 y PM10 que se encuentre suspendido en el ambiente. El dispositivo cuenta con la placa del microprocesador ESP32 que integra la conectividad inalámbrica IoT mediante Wi-Fi, la cual permite tener un mayor tiempo de procesamiento y una comunicación inalámbrica. Para evaluar la precisión del dispositivo Q-air se realizaron mediciones en sitios estratégicos de la ciudad de Barranquilla, los cuales fueron comparados con datos de estaciones fijas de monitoreo en la ciudad, los resultados obtenidos por Q-Air presentaron un margen de error inferior al 1.6%, demostrando precisión y eficiencia.

Palabras claves: Contaminación, Polvo, Ambiente, Microprocesador, Sensor, IoT.

ABSTRACT

This paper presents a detailed step-by-step design and construction of an indoor and outdoor air quality monitoring device, which is composed of electronic sensors capable of measuring gases such as Carbon Monoxide (CO), Nitrogen Dioxide (NO₂), Ozone (O₃), in addition to measuring temperature and humidity, as well as concentrations of PM2.5 and PM10 particulate matter suspended in the environment. The device features the ESP32 microprocessor board that integrates IoT wireless connectivity via Wi-Fi, which allows for longer processing time and wireless communication. To evaluate the accuracy of the Q-air device, measurements were taken at strategic sites in the city of Barranquilla, which were compared with data from fixed monitoring stations in the city, the results obtained by Q-Air showed a margin of error of less than 1.6%, demonstrating accuracy and efficiency.

Keywords: Pollution, Dust, Environment, Microprocessor, Sensor, IoT.

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica es uno de los factores que más afectan directamente en la salud de las personas a corto y largo plazo. Este es uno de los problemas ambientales de mayor preocupación para la población por los impactos generados tanto en la salud como en el ambiente, además, es el tercer factor generador de costos sociales después de la contaminación del agua y de los desastres naturales [1]. Estos problemas han surgido al alto crecimiento del sector secundario y del transporte privado, teniendo como consecuencias problemáticas ambientales debido al manejo de actividades industriales poco controladas, y producidos a partir de la generación de emisiones de gases y partículas de polvo. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS) se estima que 7 millones de personas mueren alrededor del mundo cada año a causa de contaminantes y gases de efecto invernadero en elevadas concentraciones, cabe mencionar que el 91% de los países no cumplen con los criterios permisibles establecidos por la Organización Mundial de la Salud [2].

La contaminación del aire representa un importante riesgo medioambiental para la salud, tanto en los países desarrollados como en los países en desarrollo debido a la a su alta productividad para la generación de ingresos económicos, trae como consecuencia estos países que tienen ciudades con los mayores contribuyentes a la contaminación por; Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Nitrógeno (NO₂), Ozono (O₃), Dióxido de Azufre SO₂, Hidrocarburos Totales (HTC), Material Particulado (PM2.5 y PM10). La exposición a una mala calidad del aire en espacios abiertos y cerrados conlleva al riesgo de infecciones respiratorias, enfermedades cardíacas, emitido por los gases y el material particulado todo esto se da por la acción humana es la principal culpable de la contaminación atmosférica.

La quema de combustibles fósiles, como el carbón o el petróleo, es una de las principales causas de este problema ambiental que pone en peligro no solo a nuestra naturaleza sino a nuestra propia salud [3]. Aunque a nivel mundial se han creado unas cuotas que no deben ser sobrepasadas por los países con la intención de incentivar la disminución de producción de gases contaminantes al medio ambiente, significando que los países deberían cumplir

con el estándar fijado por O.M.S, indicando que para la sustancia PM10 no se deben sobrepasar los 50 Microgramos/m³ en 24h y para PM2.5 los 25 microgramos/m³ en el mismo lapso [4].

La evaluación de la calidad del aire se lleva a cabo principalmente mediante estaciones de control cuyo alto costo limita su despliegue a unas pocas estaciones por ciudad. Estas estaciones de control, además, tienen unas tarifas de mantenimiento elevados y están situadas, en su mayoría, en zonas densas o en las inmediaciones del centro de las ciudades, lo que deja grandes zonas geográficas sin cubrir. En consecuencia, la información disponible sobre la calidad del aire es muy superficial. De hecho, las zonas alejadas de estas estaciones de control pueden sufrir una menor precisión de los valores notificados, ya que los datos se extrapolan a una zona geográfica más amplia. Por otro lado, el despliegue de sensores inalámbricos en transportes de servicio público para monitorear la calidad del aire [5], da lugar a una cobertura espacial más amplia. No obstante, la lectura de los sensores sigue limitada a las zonas en las que los vehículos se transportan, impidiendo que los individuos puedan tener una evaluación precisa del aire que respira en cualquier lugar que se encuentre.

A raíz de esta problemática, han surgido una considerable cantidad de métodos y dispositivos que apuntan a su solución, en este documento se presenta un dispositivo móvil de medición de la calidad de aire en recintos abiertos y cerrados, mediante el cual se monitorean las concentraciones de contaminantes atmosféricos como lo son: Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Nitrógeno (NO₂), Ozono (O₃), Material Particulado (PM2.5 y PM10), Temperatura y Humedad. Utilizando un microprocesador ESP32, con el que se busca brindarle al usuario una evaluación precisa de la calidad del aire en el lugar que se encuentre.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La calidad del aire se ha convertido recientemente en una de las afectaciones más importante en las actividades diarias de la ciudadanía, ya que se generan grandes cantidades de sustancias perjudiciales en el ambiente que modifican la composición natural del aire que respiramos tanto en el exterior como en interiores. La quema de combustibles fósiles para el transporte y la generación de energía, tanto a nivel industrial como doméstico, produce miles de toneladas de contaminantes que diariamente se quedan en la atmósfera. Los vehículos son la principal fuente de emisión de contaminantes del aire, le siguen la industria, los hogares y las emisiones de fuentes naturales [6].

El deterioro de la calidad de aire va relacionado con la contaminación atmosférica debido al incremento de altas composiciones físicas y químicas que se encuentran en la atmósfera, el cual tiene un efecto negativo en la salud humana y del medio ambiente. La exposición a altos niveles de gases contaminantes del aire puede causar una variedad de resultados adversos a la salud, como lo es el incremento de las infecciones respiratorias, enfermedades cardíacas, accidentes cerebrovasculares y cáncer de pulmón. Las personas que más se ven afectadas con el aumento de las partículas gaseosas del medio ambiente son los niños, adultos mayores y la población de escasos recursos que son los que mayormente viven en lugares de altos índices de contaminantes [7].

En Colombia, el monitoreo y control de la calidad de aire ha tomado día a día mayor relevancia, debido a que, según cifras de la Organización Mundial de la Salud, una de cada ocho muertes ocurridas a nivel mundial, es ocasionada por la contaminación del aire. A nivel nacional, el Departamento Nacional de Planeación estimó que, durante el año 2015, los efectos de este fenómeno estuvieron asociados a 10.527 muertes y 67,8 millones de síntomas y enfermedades. Adicionalmente, los costos ambientales asociados a la contaminación atmosférica en Colombia, durante los últimos años se incrementaron pasando de 1,1% del PIB de 2009 (\$5,7 billones de pesos) a 1,59% del PIB de 2014 (\$12 billones de pesos) y del 1,93% del PIB en 2015 (\$15.4 billones de pesos), lo cual pone en evidencia la necesidad de seguir implementando estrategias para controlar, evaluar y

monitorear estas sustancias. Según los últimos informes del estado de la calidad del aire, elaborados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) , el contaminante con mayor potencial de afectación en el territorio nacional es el Material Particulado Menor a 2,5 micras (PM2.5), el cual está constituido por partículas muy pequeñas, producidas principalmente por los vehículos pesados que utilizan diésel como combustible, y que pueden transportar material muy peligroso para el cuerpo como metales pesados, compuestos orgánicos y virus, afectando de este modo las vías respiratorias [8].

La mala calidad del aire ha llevado al empeoramiento de la salud pública en las grandes ciudades como Barranquilla que diariamente se emiten altas concentraciones de contaminantes atmosféricos, Por ejemplo: Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Nitrógeno (NO₂), Material particulado (PM2.5 y PM10), Ozono (O₃). El material particulado está catalogado como uno de los contaminantes más perjudicial para la salud, este aumenta significativamente la morbilidad y la mortalidad, ya que puede causar serios problemas respiratorios, reducción de la función pulmonar y una variedad de otras enfermedades, este contaminante es producido por los vehículos con motor Diesel que emiten una mayor proporción de contaminantes [9].

A raíz de esto, y en busca de una solución práctica y asequible, se optó por diseñar e implementar un dispositivo de medición de la calidad de aire en recintos abiertos y cerrados, mediante un microprocesador ESP32, con la finalidad de leer y monitorear los niveles de contaminación de los gases nocivos para la salud como lo son: El Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Carbono (CO₂), Dióxido de Nitrógeno (NO₂), Ozono (O₃), Material Particulado (PM2.5 y PM10), Temperatura y Humedad.

2.1. PREGUNTA PROBLEMA

¿Cómo medir y monitorear la calidad del aire para prevenir enfermedades derivadas de la inhalación de compuestos contaminantes?

2.2. JUSTIFICACION Y ALCANCE

La contaminación atmosférica es uno de los temas con más demanda en el mundo debido al impacto que está teniendo sobre el ecosistema y la población. El costo de tener un equipo medidor de la calidad del aire es muy elevado y suelen ser estaciones fijas. Además, debido a su naturaleza estática presentan limitaciones en su capacidad para cubrir todas las áreas de la ciudad trayendo como consecuencias puntos sin ser monitoreados, el desconocimiento de la calidad del aire en estas zonas, podría afectar la salud pública de las personas al tener que respirar aire contaminado lo cual puede acarrear enfermedades respiratorias y agravar el estado de pacientes con asma y tuberculosis debido a la exposición de gases contaminante y material particulado suspendido en el aire.

Este proyecto busca ser innovador al ser de tamaño compacto y con la finalidad de mantener informado al usuario que porte este dispositivo sobre los niveles de gases contaminantes como lo son: El Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Nitrógeno (NO₂), Ozono (O₃) y material particulado PM2.5 y PM10 al que se están enfrentando a diario obteniendo datos en tiempo real y con variables climatológicos buscando mitigar la contaminación por donde transitan grandes cantidades de personas en aquellas zonas donde no pueden ser alcanzadas por las estaciones fijas que contenga la ciudad con el propósito de mejorar de la calidad de vida de los habitantes y del medio ambiente mediante la tecnología, aportando así al desarrollo social de la ciudad.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un dispositivo móvil basado en el módulo ESP32 para la medición y monitoreo de la calidad del aire en recintos abiertos y cerrados.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Diseñar el dispositivo móvil utilizando una herramienta CAD para la integración de los componentes.
2. Implementar un software para la lectura y monitoreo constante de niveles de gases en el entorno.
3. Validar técnica y funcionalmente el correcto funcionamiento del dispositivo.

4. MARCO DE REFERENCIA

4.1. ESTADO DEL ARTE

En el artículo ***“Design and Implementation of Portable Outdoor Air Quality Measurement System using Arduino”*** elaborado por Teddy Surya, et al [10]. Implementaron un dispositivo portátil de detección de aire en el exterior mediante el uso del microcontrolador Arduino y la implementación de 4 sensores MQ-9, MQ-131 O₃ los cuales son sensores de detección de gases, el Shinyei PPD42NS PM2.5 sensor de polvo y GP2Y1010AUF PM10 sensor de partículas, sensores capaces de medir los valores del índice de contaminantes atmosféricos (API), el dispositivo que proponen Teddy Surya, Yasmin Mahira, Mira Kartiwi, Hasmanh Mansore. Es capaz de medir la concentración de monóxido de carbono (CO), ozono a nivel del suelo (O₃) y partículas (PM10 y PM2.5) en el aire y convertir las lecturas en valor API. Demostró ser un dispositivo fiable y eficaz a la hora de generar las mediciones del API en el exterior de su localidad.

En el artículo ***“AirSense: A Portable Context-sensing Device for Personal Air Quality Monitoring”*** elaborado por Yan Zhuang, et al [11]. Diseñaron un dispositivo de monitoreo personal contextual llamado “AirSense” para la medición de la calidad de aire en lugares externos e internos, usando la posición global GPS, se hace uso de los sensores de humedad, temperatura, polvo, acelerómetro y GPS. Airsense es un dispositivo capaz de recopilar información detallada sobre la calidad del aire mediante su ubicación geográfica. Para el diseño de AirSense hacen uso de los sensores de humedad y temperatura para la detección de aire ya que con estos muestran la información contextual desempeñando un papel importante con el fin de comprender los factores contaminantes del ambiente al momento de la exposición de las partículas individuales.

En el artículo ***“Development of low-cost indoor air quality monitoring devices: Recent advancements”*** elaborado por H. Chojer, et al [12]. Realizaron una

búsqueda de artículos relacionados sobre dispositivos de medición de la calidad de aire en diferentes bases de datos científicas las cuales son: ScienceDirect, IEEE y Scopus. Tras su ardua investigación encontraron un total de 891 títulos publicados desde el 2012 la cual analizaron cada relevancia de los artículos. Finalmente, revisaron 41 artículos de investigación consistentes en 35 proyectos únicos de desarrollo de dispositivos con especial énfasis en el desarrollo del dispositivo. El resultado obtenido de la investigación fue el hallazgo de la falta de estudio sobre el rendimiento de los sensores, ya que solo 16 de los 35 proyectos le realizaron la calibración/validación de los sensores. La recomendación que da los investigadores es que debemos realizar más estudios sobre la calibración de los sensores antes de implementarlos en los dispositivos a desarrollar.

En el artículo ***“A Cost-Effective Wireless Sensor Network System for Indoor Air Quality Monitoring Applications”*** elaborado por S. Abraham, X. L [13]. Desarrollaron una red de sensores inalámbricos para la de detección y mejora de la calidad de aire en los interiores de bajo coste. El proyecto propuesto fue desarrollado con Arduino, módulos XBee y microsensores de gas CO₂, COV y CO, el sistema implementado en el dispositivo es capaz de recoger seis parámetros de calidad de aire simultáneamente. El desarrollo de sistema de control de detección de la calidad de aire previene el riesgo de contaminación de las personas ya que se estima una media del 90% de las personas pasan mayor tiempo en interiores por lo que una mala calidad del aire interior (IAQ) supone un riesgo sustancial para la salud pública. La mala calidad del aire puede provocar un aumento de los problemas de salud a corto plazo, como la fatiga y las náuseas, así como enfermedades respiratorias crónicas, enfermedades cardíacas y cáncer de pulmón. El dispositivo creado por Sherin Abraham y xinrong Li, tuvo lecturas de temperatura del módulo del nodo sensor son más altas y las de humedad son más bajas que las lecturas del sistema profesional se determinan que esto se debe al calor desarrollado por los sensores de gas en el escudo¹⁵. También se observa que los sensores de gas son independientes de las ligeras variaciones de temperatura y humedad, el cual es

necesario invertir más tiempo de estudio en la calibración de los sensores para tener un mejor rendimiento.

En el artículo ***“An electronic nose based on solid state sensor arrays for low-cost indoor air quality monitoring applications”*** elaborado por S. Zampolli, et al [14]. Diseñaron una nariz electrónica basada en conjuntos de sensores de estado sólido para aplicaciones de monitorización de la calidad del aire. La aparición de enfermedades relacionadas con la mala ventilación ha hecho que se preste cada vez más atención al control de la calidad del aire interior, el dispositivo propuesto en este artículo se basa en procesos de lógica difusa dirigido a la cuantificación de monóxido de carbono y dióxido de nitrógeno en mezclas con humedad relativa y compuestos orgánicos volátiles utilizando sensores de gas de estado sólido, el sistema de la nariz electrónica ha sido diseñado para integrar subunidades adicionales capaces de monitorizar otros parámetros relevantes para la IAQ. El artículo se basa en la medición de dos gases CO, NO₂, VOC midiendo concentraciones consideradas para un control eficaz de la calidad del aire interior.

En el artículo ***“Air pollution exposure monitoring using portable low-cost air quality sensors”*** elaborado por K. Pranvera, et al [15]. Desarrollaron la implementación de un sensor de bajo costo basados en un sistema BMD-349 el cual se conecta a un dispositivo Android a través de bluetooth y este reporta las lecturas a los servidores. Un sensor Sensirion SPS30 es el encargado de medir las partículas (PM). Su costo inicial ronda los 250 USD la unidad, pero puede ser reducida hasta por debajo de 100 USD al producirse en grandes volúmenes. Cabe añadir que también se logra medir temperatura, humedad relativa, presión y altitud (con sensor BMB-260), PM_{2.5}, PM₁₀ (con sensor Sensirion SPS30) además de CO, NO₂ (con sensor MiCS-4514) y O₂ (con sensor MQ-131).

En el artículo ***“A portable air quality monitoring unit and a modular, flexible tool for on-field evaluation and calibration of low-cost gas sensors”*** elaborado por Domenico Suriano [16]. Crearon un dispositivo portátil con alto grado de flexibilidad

capaz de medir NO_2 , CO , SO_2 , H_2S , además de temperatura y humedad relativa. El dispositivo puede realizar la adquisición de datos mediante LCSSs y RIs como lo son IRC-A1, Multisensor board, PMS 3003, Environment VOC72M y 2B 405 nm. Proporciona una herramienta compacta que permita el uso de una amplia variedad de sensores, dispositivos o instrumentos, permitiendo a los usuarios no estar atados al uso de un tipo limitado de dispositivos producidos por un fabricante o proveedor específico. Otros de los componentes presentes en el dispositivo son: Una Raspberry 3B + tablero (el tablero principal del sistema), una tarjeta SD con un a memoria de mínimo 2 GB, una fuente de poder de 5V y máximo 3A y un adaptador de ac/dc.

En el artículo ***“Performance assessment of low-cost environmental monitors and single sensors under variable indoor air quality and thermal conditions”*** elaborado por I. Demanega, et al [17]. Plantearon un dispositivo de monitoreo ambiental para la medición de la calidad del aire en espacios cerrados y condiciones térmicas. Mediante el uso de ocho (8) monitores de multiparámetros y ocho(8) sensores individuales se logró detectar materia particulada, dióxido de carbono, componentes orgánicos volátiles, temperatura del aire y humedad relativa. Generaron ocho (8) fuentes de contaminación de aire, cada una con dos condiciones termodinámicas – Frío y Seco ($20 \pm 1^\circ C$, $30 \pm 5^\circ C$), y caliente y húmedo ($26 \pm 1^\circ C$, $70 \pm 5^\circ C$). La gran mayoría de los dispositivos testeados arrojaron unas mediciones aceptables. Los sensores implementados fueron : Sensirion SCD40, Sensirion SHT31-D, CO2meter K30, Littel fuse 11492, Sensirion SPS30, Alphasense OPC-N3, Alphasense OPC-R1 y NovaFitness SDS018.

En el artículo ***“Portable formaldehyde monitoring device using porous glass sensor and its applications in indoor air quality studies”*** elaborado por Y. Maruo, J. Nakamura [18]. Hablaron sobre la fuerte presencia del formaldehído en las fuentes de emisión de gases como en la fabricación de materiales de construcción y muebles. Además de ser la causante del síndrome del edificio enfermo (sick building syndrome). En 2006, este elemento fue considerado cancerígeno por la

International Agency for Research on Cáncer. Para esto se creó un dispositivo de monitoreo el cual detectaba el formaldehído mediante su reacción con el β -diketone.

En el artículo ***“Mobile air quality measurements using bicycle to obtain spatial distribution and high temporal resolution in and around the city center of Stuttgart”*** elaborado por A. Samad, U. Vogt [19]. Comentaron sobre la mala calidad de aire en la ciudad debido a las emisiones producidas por las fábricas y los autos, para lo cual se propone una estación de monitoreo móvil para obtener un monitoreo de la calidad de aire en la ciudad. La estación de monitoreo se encuentra fija a una bicicleta y cuenta con dispositivos que permiten la medición de materia particulada (PM), partículas ultrafinas (UFP), carbón negro (BC), óxidos de nitrógeno (NO, NO₂ y NOX) y ozono (O₃), además de parámetros meteorológicos como la temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento, dirección del viento, radiación solar y presión del aire.

Al realizar una revisión bibliográfica de los anteriores artículos relacionados con la implementación de dispositivos de monitoreo de la calidad del aire, se puede apreciar la variedad de perspectivas y enfoques de cómo se puede implementar un sistema eficiente de monitoreo de calidad. Se han desarrollado dispositivos portátiles y personales, así como sistemas inalámbricos de bajo costo, cada uno con diferentes conjuntos de sensores y microcontroladores para detectar diferentes tipos de contaminantes atmosféricos. Sin embargo, se ha identificado que el rendimiento de los sensores es un aspecto crítico que necesita más atención, ya que la mayoría de los proyectos no han realizado la calibración o validación adecuada de los sensores. Es fundamental realizar más estudios sobre la calibración de los sensores antes de implementarlos en dispositivos para garantizar mediciones precisas y confiables. Se puede concluir que estos equipos son herramientas esenciales para evaluar las condiciones del aire y tomar decisiones para proteger la salud pública y el medio ambiente.

El dispositivo Q-Air se diferencia de otros dispositivos existentes por la implementación de componentes y sensores en específicos, Entre estos componentes se encuentra el microcontrolador ESP32 es una placa que integra la conectividad inalámbrica IoT mediante Wi-Fi, lo que permite que el dispositivo tenga un mayor tiempo de procesamiento y una mejor comunicación inalámbrica. El uso de esta placa de desarrollo es novedoso ya que no suele usarse en este tipo de aplicaciones. Además, incorpora diversos sensores que permiten la detección de gases como el monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO₂), ozono (O₃), la medición de la temperatura y humedad, así como la detección de partículas suspendidas (PM2.5 y PM10). Por último se hace uso de la plataforma BLYNK, que ofrece una mayor flexibilidad y personalización en la forma en que se procesan y presentan los datos. Estos componentes y sensores hacen que el dispositivo Q-Air se diferencie de otros equipos de medición de la calidad del aire, convirtiéndolo en un dispositivo versátil para la medición y detección de diversos componentes del aire, a su vez ofrece la capacidad de comunicación inalámbrica permite que la información se pueda enviar y recibir de forma remota.

5. MARCO TEÓRICO

5.1. CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

La contaminación atmosférica está fuertemente relacionada con problemas de morbilidad y mortalidad disminuyendo notablemente la calidad de la población, en especial la más vulnerable que corresponde a los niños menores de cinco años y a los adultos mayores; esta problemática se ve reflejada en un aumento en la frecuencia de gravedad e infecciones respiratorias, enfermedades cardíacas, accidentes cerebrovasculares y cáncer de pulmón. Tanto la exposición a corto como a largo plazo a los contaminantes del aire se ha asociado con impactos adversos en la salud. Los impactos más severos afectan a las personas que ya están enfermas. Los contaminantes más nocivos para la salud, estrechamente asociados con la mortalidad prematura excesiva, son partículas finas PM 2.5 y PM 10 que penetran profundamente en los conductos pulmonares [20], algunos ejemplos de estas enfermedades se pueden observar en la figura 1.

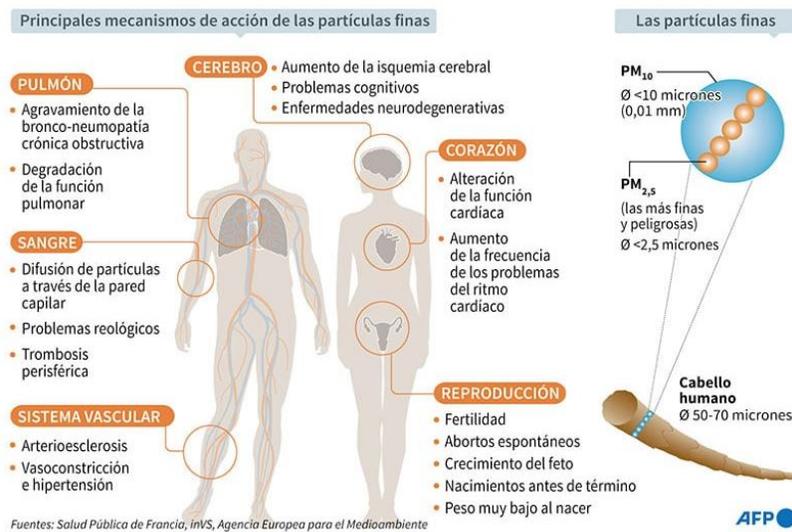


Figura 1. Efectos de la contaminación del aire [21].

5.2. CALIDAD AMBIENTAL

La calidad ambiental se define como la armonía de factores térmicos, acústicos, luminosos y del aire que se respira, que no ha de suponer peligro para la salud y ha de resultar fresco y agradable. El Aire de una vivienda o edificio no debe contener contaminantes en concentraciones superiores a aquellas que puedan perjudicar la salud o causar malestar a sus ocupantes. La composición química del AI puede comprender multitud de sustancias en bajas concentraciones [22]. Los niveles de contaminación medidos en estudios realizados en oficinas y en viviendas suelen estar muy por debajo de los límites permisibles para ambientes industriales, pero el análisis químico no permite predecir la percepción que los habitantes tienen del aire que respiran, ya que la mezcla de muchos contaminantes aun en bajas concentraciones y matizados por las condiciones de humedad y temperatura puede empeorar la percepción de su calidad; por ello el olor es un indicador útil para valorar la calidad del AI. En este sentido, la sociedad estadounidense de ingenieros en calefacción, refrigeración y aire acondicionado (ASHRAE) ha elaborado unas recomendaciones para valorar el AI, que se puede considerar de buena calidad cuando no hay contaminantes conocidos en concentraciones nocivas y una mayoría sustancial (80% o más) del personal expuesto no expresa molestias [23].

5.3. FUENTES DE CONTAMINACIÓN INTERIOR

Las fuentes de contaminación interior que liberan gases o partículas en el aire son la causa principal de los problemas de calidad del aire interior. Hay muchas fuentes de contaminación del aire interior, desde los materiales de construcción y los limpiadores domésticos hasta los contaminantes biológicos, como los ácaros del polvo y la caspa de las mascotas [24]. En la figura 2 se pueden observar algunos de los contaminantes más comunes en espacios cerrados:

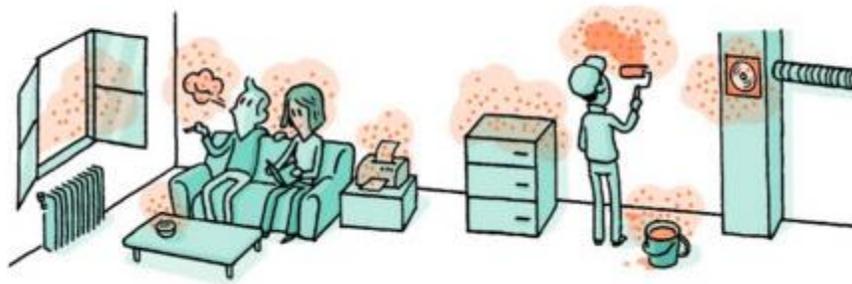


Figura 2. Fuentes de contaminación interior [25].

El humo del tabaco puede agravar los problemas respiratorios (por ejemplo, el asma), irritar los ojos, provocar dolores de cabeza, tos y dolores de garganta y causa cáncer de pulmón, tanto en fumadores como en fumadores pasivos. Es un poderoso potenciador del efecto cancerígeno de otras sustancias [25].

Productos químicos que utilizamos en el hogar Pueden contener distintas sustancias químicas nocivas que se incorporan al aire de edificios y hogares, alterando la calidad el aire interior, algunos de los productos químicos que podemos encontrar dentro de nuestros hogares son: Los insecticidas, limpiadores de todo tipo, desinfectantes, ambientadores, fragancias, detergentes, suavizantes, jabones, desodorantes, lociones, champús, cosméticos, tóner de impresora, aparatos eléctricos y electrónicos. Estos pueden producir irritaciones en los ojos, nariz, garganta, piel, pasando por alergénicas, sensibilizantes y alteradores endocrinos, hasta dañar sistemas vitales (pulmonar, hepático, renal, neurológico) y resultar cancerígenas [25].

Bacterias, hongos y mohos (con sus esporas) que pueden crecer en el interior cuando hay suficiente humedad disponible .

La exposición puede causar problemas respiratorios, alergias y asma, y afectar el sistema inmunológico. Los ácaros del polvo, el pelo y la caspa de las mascotas, las cucarachas y el polen de ciertas plantas contienen alérgenos que pueden agravar

los problemas respiratorios y causar también tos, opresión en el pecho, problemas respiratorios, asma, irritación de los ojos y erupciones en la piel [25].

Los COV (Compuestos Orgánicos Volátiles) están presentes en muchos productos del hogar: maderas aglomeradas, pinturas, disolventes, selladores, impermeabilizadores, aislantes, adhesivos... y aumentan su concentración en el aire interior en situaciones como la instalación de nuevo mobiliario, obras nuevas, reformas y rehabilitación, bricolaje y nueva decoración, en las que se utilizan esos productos. Entre los COV en edificios podemos destacar el formaldehído, el acetaldehído, el benceno, el naftaleno, el xileno, el tolueno, el estireno, los terpenos, el D-limoneno o el A-pineno. Pueden ser desde irritantes, pasando por dañar ciertos órganos, hasta ser cancerígenos [25].

El radón, gas radioactivo que se acumula en sótanos y bajos de casas en zonas graníticas, incrementa el riesgo de cáncer de pulmón [25].

Las temperaturas inadecuadas extremas en el hogar (picos de calor en olas de calor, frío y humedad en épocas frías) pueden incrementar las enfermedades y la mortalidad, especialmente de grupos vulnerables: ancianos, niños, enfermos crónicos [25].

Los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), entre los que destaca el benzopireno, se generan en la combustión inadecuada de combustibles fósiles y biomasa (leña, pellets, briquetas, etc.) en calderas, chimeneas, estufas y fuegos de cocina. Son sustancias potencialmente cancerígenas [25].

El monóxido de carbono (CO) se genera en las combustiones incompletas con poco oxígeno. Se une a la hemoglobina formando carboxihemoglobina e impidiendo el transporte de oxígeno en sangre. Causa dolores de cabeza, mareos, náuseas y somnolencia y en altas concentraciones puede llevar a la muerte rápidamente [25].

5.4. FUENTES DE CONTAMINACIÓN EXTERIOR

Contaminantes atmosféricos del exterior que pueden encontrarse en el interior, sobre todo en la cercanía de áreas de alta densidad de tráfico o zonas industriales contaminantes, algunos ejemplos de las fuentes que generan estos contaminantes son mencionados en la figura 3:



Figura 3. Contaminantes atmosféricos del exterior [26].

- Partículas en suspensión, tienen su origen principal en las actividades humanas y provocan trastornos respiratorios y cardiovasculares.
- Óxidos de nitrógeno, se forman durante los procesos de combustión y pueden causar irritación de ojos y garganta, dificultad para respirar y facilitar infecciones respiratorias.
- Ozono troposférico es un contaminante secundario, generado a partir de los NO_x, los compuestos orgánicos volátiles, el CO y en menor medida el metano, en presencia de radiación solar. Es un potente oxidante, que provoca irritación nasal y ocular, problemas respiratorios y cardíacos y agudiza los procesos asmáticos.
- Óxidos de azufre, están más ligados a procesos industriales, como la quema de carbón y pueden causar bronquitis y agravamiento del asma [25].

El ozono (O₃) es un gas incoloro e inestable de tres átomos de oxígeno, además, es un oxidante fuerte, muy fácil de producir, pero a la vez muy frágil y fácil de destruir. Este gas reacciona fácilmente con muchos compuestos químicos y es explosivo en pequeñas cantidades. El ozono es un gas de efecto invernadero (GEI) que absorbe y emite radiación infrarroja con lo cual contribuye al calentamiento de la tropósfera, mientras que, en la baja atmósfera y la superficie, el ozono se constituye en un contaminante nocivo para la salud. El ozono en la salud humana provoca tos, irritación en la garganta, empeoramiento de afecciones como asma, bronquitis y enfisema y hasta daños pulmonares permanentes, si la exposición a éste es habitual [27].

El material particulado o P.M. son un conjunto de partículas de diferentes componentes, los cuales deambulan libremente por el aire respirable una vez que han sido generados o emitidos mediante la quema de alguna clase de combustibles en los automóviles, centrales eléctricas o en las industrias, y el hecho de que tengan la capacidad de mantenerse en el aire podría generar riesgos para la salud humana.



Figura 4. Material particulado o PM [28].

En la figura 4 se abarcan los tamaños de los materiales particulados PM_{2.5} y PM₁₀, así como los principales emisores. El riesgo para la salud humana es que el diámetro de cada una de estas partículas ronda cifras inferiores a los 10 micrómetros, de allí depende que la partícula sea catalogada como PM₁₀, lo que infiere a que la partícula tiene un tamaño de 10 micrómetros o menos, y luego se

encuentra el PM2.5 que indica que el tamaño es de 2.5 o menos micrómetros, se podría hacer una idea del tamaño de estas partículas tomando como objeto de comparación el cabello humano, el cual tiene un diámetro en promedio de 70 micrómetro. En la imagen que se muestra a continuación se puede observar que las partículas de PM10 pueden darle la vuelta al cabello humano y a su vez un conjunto de PM2.5 podría darle la vuelta a las de PM10. Dichas partículas que representan un gran riesgo para la salud humana puesto que, al ser de tamaño tan diminuto, pueden llegar a colarse en el sistema respiratorio hasta llegar a las cavidades pulmonares, inclusive, al torrente sanguíneo, lo que se puede traducir como en riesgos de poseer enfermedades respiratorias y otras aún más graves como el cáncer [29].

El Dióxido de nitrógeno (NO₂) es un contaminante atmosférico, de origen principalmente antropogénico, cuyas fuentes fundamentales son el tráfico rodado, así como las emisiones de determinadas industrias y grandes instalaciones de combustión. Los niveles más altos se alcanzan en áreas urbanas, especialmente en las grandes ciudades y sus zonas metropolitanas, así como en la proximidad de las vías de comunicación con mayor intensidad de tráfico. En el medio urbano, se estima que más del 75% del NO₂ en aire ambiente se debe al tráfico rodado. Su presencia en el aire contribuye a la formación y modificación de otros contaminantes atmosféricos, tales como el ozono y las partículas en suspensión (PM10 y PM2,5). Los óxidos de nitrógeno, en contacto con compuestos orgánicos volátiles (COVs) presentes en la atmósfera y en presencia de radiación solar, generan ozono (O₃), contaminante secundario de la atmósfera.

Los niveles elevados de dióxido de nitrógeno pueden irritar los pulmones y disminuir su capacidad funcional. La irritación que provoca este contaminante se relaciona con una importante inflamación de las vías respiratorias y una mayor mucosidad, lo que supone un aumento de la reactividad bronquial favoreciendo la aparición de infecciones respiratorias, como bronquitis, especialmente en mayores e inmunodeprimidos, así como bronquiolitis en niños. Además, incrementa la

sensibilidad pulmonar a la broncoconstricción, reagudizando los síntomas de pacientes con enfermedades crónicas respiratorias, asmáticos y alérgicos [30].

5.5. ESTACIONES DE MONITOREOS FIJAS DE LA CALIDAD DEL AIRE

Las estaciones de monitoreo fijas del aire son dispositivos de medición que se ubican en lugares específicos para medir la calidad del aire en un área determinada. Estas estaciones pueden medir diferentes contaminantes atmosféricos, como dióxido de azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO₂), ozono (O₃), partículas en suspensión (PM10 y PM2.5), entre otros.



Figura 5. Estación fija de monitoreo de la calidad del aire [31].

Las estaciones de monitoreo fijas del aire, como el visto en la figura 5, generalmente están equipadas con sensores y equipos de medición que pueden detectar y medir la cantidad de contaminantes en el aire. Las mediciones se realizan de forma periódica o continua, y los datos se envían a una estación central o a una base de datos para su análisis. Estos datos son utilizados para monitorear la calidad del aire, identificar fuentes de contaminación y evaluar los efectos de las políticas y medidas de control de la contaminación.

Las estaciones de monitoreo fijas del aire son utilizadas por autoridades ambientales, empresas y organizaciones para monitorear la calidad del aire en ciudades, zonas industriales, áreas rurales y otros lugares donde se puedan presentar problemas de contaminación atmosférica. Estas estaciones son esenciales para el seguimiento y la gestión de la calidad del aire, y proporcionan información crítica para la toma de decisiones relacionadas con políticas públicas y estrategias de control de la contaminación [31].

5.6. DISPOSITIVOS MÓVILES DE MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE

Los dispositivos móviles para el monitoreo de la calidad del aire son equipos portátiles que pueden ser transportados por personas o vehículos y utilizados para medir la calidad del aire en diferentes ubicaciones. Estos dispositivos pueden medir los mismos contaminantes que las estaciones de monitoreo fijas, pero con la ventaja de poder obtener mediciones en diferentes lugares y momentos.



Figura 6. Dispositivo móvil de monitoreo de la calidad del aire [32].

Los dispositivos móviles para el monitoreo de la calidad del aire, como el visto en la figura 6, incluyen sensores portátiles, y suelen ser usados en vehículos equipados

con equipos de monitoreo, drones equipados con sensores, entre otros. Estos dispositivos pueden ser útiles para detectar fuentes de contaminación específicas, realizar mediciones en tiempo real en zonas de difícil acceso o para complementar las mediciones de las estaciones de monitoreo fijas. Sin embargo, es importante tener en cuenta que estos suelen estar destinados a un tipo específico de gas, además, estos dispositivos pueden ser menos precisos que las estaciones de monitoreo fijas y deben ser calibrados y validados regularmente para garantizar la calidad de las mediciones [32].

5.7. INTERNET DE LAS COSAS (IOT)

La Internet de las cosas (IoT) describe la red de objetos físicos ("cosas") que llevan incorporados sensores, software y otras tecnologías con el fin de conectarse e intercambiar datos con otros dispositivos y sistemas a través de Internet. Estos dispositivos van desde objetos domésticos comunes hasta herramientas industriales sofisticadas. Con más de 7 mil millones de dispositivos IoT conectados en la actualidad, los expertos prevén que este número aumentará a 10 mil millones para los 2020 y 22 mil millones para el 2025 [33]. En la figura 7 se puede apreciar de manera representativa el alcance y la aplicabilidad del IoT.



Figura 7. IoT [33].

Si bien la idea de IoT existe desde hace mucho tiempo, una colección de avances recientes en una serie de tecnologías diferentes la ha hecho práctica.

- Accede a la tecnología de sensores de bajo costo y potencia. Los sensores asequibles y fiables están haciendo posible la tecnología IoT para más fabricantes.
- Conectividad. Una gran cantidad de protocolos de red para Internet ha facilitado la conexión de sensores a la nube y a otras cosas para lograr una transferencia de datos eficiente
- Plataformas de informática en la nube. El aumento en la disponibilidad de plataformas en la nube permite a las empresas y a los consumidores acceder a la infraestructura que necesitan para escalar sin tener que administrarlo todo.
- Aprendizaje automático y analítica. Con los avances en aprendizaje automático y analítica, junto con el acceso a cantidades grandes y variadas de datos almacenados en la nube, las empresas pueden recopilar información de forma más rápida y fácil. Por un lado, el surgimiento de estas tecnologías aliadas sigue traspasando los límites de IoT; por otro, los datos producidos por IoT también alimentan estas tecnologías.
- Inteligencia artificial (IA) conversacional. Los avances en las redes neuronales han llevado el procesamiento del lenguaje natural (PLN) a los dispositivos IoT (como los asistentes personales digitales Alexa, Cortana y Siri) y los han hecho atractivos, asequibles y viables para uso doméstico [33].

5.8. PROTOCOLO MQTT

MQTT viene de las siglas de “Message Queuing Telemetry Transport” y en un principio, se creó para conectar dispositivos y enviar la información de un sensor a servidores remotos relacionados con el sector de la industria petrolífera. Mqtt es un protocolo de comunicación abierto que se distingue por su ligereza y sencillez, gracias a lo cual se puede utilizar con éxito en microcontroladores pequeños, con

5.9. ARDUINO IDE

El IDE de Arduino (Integrated Development Environment) es un entorno de programación que permite escribir, compilar y cargar código en las placas de Arduino. Es una herramienta gratuita y de código abierto que ofrece una interfaz gráfica de usuario intuitiva para programar dispositivos basados en microcontroladores de la plataforma Arduino. El IDE de Arduino se ejecuta en diferentes sistemas operativos, como Windows, macOS y Linux, y es compatible con una amplia variedad de placas de Arduino y otros microcontroladores compatibles. También proporciona una gran cantidad de bibliotecas de código abierto y ejemplos de código para ayudar a los usuarios a comenzar a programar sus proyectos de forma rápida y sencilla [35].

5.10. SENSORES MQ

Los sensores de gases MQ son una familia de dispositivos diseñados para detectar la presencia de distintos componentes químicos en el aire. Podemos conectar estos dispositivos a un autómata o procesador como Arduino. Existe una gran variedad de sensores MQ. Cada modelo está diseñado para detectar una o más sustancias, pensadas para un uso específico, como por ejemplo detección gases inflamables, calidad del aire o detección de alcohol en aire respirado. Los sensores de gases MQ suelen proporcionarse con una placa de medición estándar con el comparador LMC662 o similar, que permite obtener la lectura tanto como un valor analógico, como un valor digital cuando se supera un cierto umbral regulado a través de un potenciómetro ubicado en la placa [36].

6. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO

6.1. METODLOGÍA

En esta sección se planteará la metodología a seguir durante el desarrollo del proyecto, la cual se comprende de 4 fases que contemplan la lectura, procesamiento, almacenamiento y visualización, en la figura 9 se puede observar el diagrama de bloques del dispositivo Q-Air.

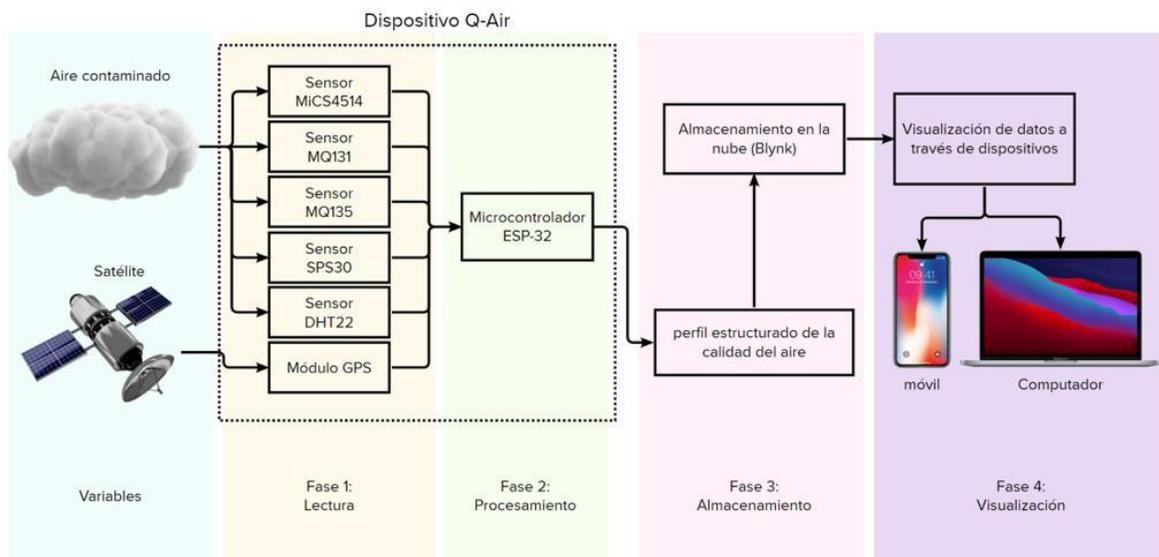


Figura 9. Diagrama de bloques del dispositivo Q-Air (Autoría propia).

Fase 1: Lectura

Los sensores integrados se encargan de, mediante intervalos de tiempos definidos, captan la localización y realizar mediciones simultáneas de las concentraciones materia particulada (PM10 y PM2.5) y de componentes específicos presentes en el aire que fluye a través del dispositivo (Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Nitrógeno (NO₂), Ozono (O₃)), así como características del ambiente como temperatura y humedad.

Fase 2: Procesamiento

Las lecturas anteriormente realizadas son recibidas por el microprocesador ESP32, el cual se encarga de analizar, procesar y caracterizar los datos para transformarlos a proporciones y unidades comprensibles, posteriormente, estos resultados son publicados en un servidor en la nube (Blynk) mediante un protocolo de comunicación MQTT.

Fase 3: Almacenamiento

Los datos publicados por el ESP32 son tabulados para crear un perfil de mediciones llamado "Perfil personal de la calidad del aire" en el que se generan estadísticas generales y específicas de cada una de las variables medidas.

Fase 4: Visualización

Mediante la aplicación del proveedor de servicios en la nube (Blynk), el usuario podrá ver las mediciones y estadística realizadas a través de cualquier dispositivo con conexión a internet, y sus respectivos análisis en los intervalos de tiempo que desee (hora, día, semana y mes).

6.2. TIPO DE ESTUDIO

6.2.1. Cuantitativa experimental

Este proyecto se basará en un tipo de estudio experimental debido a que se realizarán varias pruebas aleatorias en diferentes condiciones ambientales, lo que es necesario para poder llegar al resultado necesario; es normal que durante la investigación se presenten nuevos desafíos que hagan reconsiderar varias partes del prototipo final. Lo que puede significar un replanteamiento de los equipos y herramientas tales como lo son los sensores utilizados, se tendrán que calibrar varias veces con el propósito de obtener una medición exacta.

6.3. POBLACION Y MUESTRA

La presente investigación no requiere de población ya que en la propuesta planteada se desarrollará un prototipo para monitorear las condiciones del ambiente tanto en recintos abiertos y cerrados.

La muestra de esta investigación será extraída de la sustancia gaseosa “aire”, la cual contiene componentes tales como el nitrógeno, oxígeno, dióxido de carbono, neón, helio, etc. De la muestra de aire serán detectados por medio del dispositivo de la calidad del aire los siguientes gases y material particulado PM que contiene la composición del aire, tales como, Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Nitrógeno (NO₂), Ozono (O₃) y Material Particulado (PM2.5 y PM10).

6.4. CRONOGRAMA – PLAN DE TRABAJO

 Universidad Autónoma del Caribe Proyecto de Grado - Ingeniería Mecatrónica PLAN DE TRABAJO 					
Componentes	Descripción	Fecha Inicio	Fecha Final	Duración (Días)	Valores Presupuesto (COP)
OBJETIVO 1	Diseñar el dispositivo móvil utilizando una herramienta CAD para la integración de los componentes	05/08/2022	08/09/2022	34	\$ 6.000.000
Entregable # 1	Planos de la estructura del dispositivo usando SolidWorks	05/08/2022	08/09/2022	34	
Actividad 1	Identificar los gases más contaminantes y perjudiciales para la salud	05/08/2022	09/08/2022	4	
Actividad 2	Definir el funcionamiento y aplicaciones del dispositivo	09/08/2022	12/08/2022	3	
Actividad 3	Selecionar de los dispositivos, sensores y módulos para el desarrollo del sistema	12/08/2022	22/08/2022	10	
Actividad 4	Adquirir y dimensionar los componentes del sistema	22/08/2022	26/08/2022	4	
Actividad 5	Integrar los componentes en la SolidWorks	26/08/2022	03/09/2022	8	
Actividad 6	Simular el dispositivo con sus componentes	03/09/2022	08/09/2022	5	
OBJETIVO 2	Implementar un software para la lectura y monitoreo constante de niveles de gases en el entorno	09/09/2022	27/02/2023	171	\$ 620.000
Entregable # 2	Código en lenguaje de programación arduino para el procesamiento de las lecturas en tiempo real	09/09/2022	31/10/2022	52	
Actividad 7	Familiarizar con los datasheet de los componentes	09/09/2022	13/09/2022	4	
Actividad 8	Identificar y obtener las librerías de los componentes	13/09/2022	18/09/2022	5	
Actividad 9	Calibrar los sensores y módulos	18/09/2022	28/09/2022	10	
Actividad 10	Desarrollar un código para la caracterización de las lecturas de cada sensor y módulo de forma individual	28/09/2022	13/10/2022	15	
Actividad 11	Evaluar el desempeño de los componente desempeñándose individualmente	13/10/2022	17/10/2022	4	
Actividad 12	Unificar los códigos de las funciones individuales de cada componente	17/10/2022	21/10/2022	4	
Actividad 13	Evaluar el desempeño de los componente desempeñándose de manera conjunta	21/10/2022	23/10/2022	2	
Actividad 14	Simplificar y segmentar el código para mayor eficiencia y rendimiento.	23/10/2022	31/10/2022	8	
Entregable # 3	Código para el almacenamiento en la nube mediante protocolo de comunicación MQTT	01/11/2022	12/12/2022	41	\$ 620.000
Actividad 15	Seleccionar broker para el almacenamiento en la nube	01/11/2022	07/11/2022	6	
Actividad 16	Implementar librerías del broker	07/11/2022	11/11/2022	4	
Actividad 17	Desarrollar un código para la publicación y suscripción de los datos obtenidos	11/11/2022	03/01/2023	53	
Actividad 18	Evaluar funcionamiento del proceso de publicación y suscripción	03/01/2023	13/01/2023	10	
Entregable # 4	Software unificado del procesamiento de lecturas en tiempo real con almacenamiento en la nube	13/01/2023	27/02/2023	45	
Actividad 19	Unificar los códigos del procesamiento de lecturas en tiempo real y de almacenamiento en la nube	13/01/2023	30/01/2023	17	
Actividad 20	Evaluar el funcionamiento del software	30/01/2023	27/02/2023	28	
OBJETIVO 3	Validar técnica y funcionalmente el correcto funcionamiento del dispositivo	02/03/2023	10/04/2023	39	\$ 430.000
Entregable # 5	Dispositivo totalmente funcional	02/03/2023	10/04/2023	39	\$ 430.000
Actividad 21	Imprimir el dispositivo en 3D por partes	02/03/2023	04/03/2023	2	
Actividad 22	Ensamblar el dispositivo y sus componentes	04/03/2023	10/03/2023	6	
Actividad 23	Cargar el Software al microcontrolador	10/03/2023	11/03/2023	1	
Actividad 24	Someter el dispositivo a pruebas controladas	11/03/2023	07/04/2023	27	
Actividad 25	Evaluar el desempeño del dispositivo en condiciones reales	11/03/2023	07/04/2023	27	
Actividades Especiales	Actualización de la Líneas Base del Proyecto				
	Admon y Gerencia del Proyecto				
	Procesos de selección objetiva				
	Estudio de Resultados del proyecto				
TOTAL					\$ 8.100.000

Tabla 1. Cronograma.

En la tabla 1 se describe el cronograma en el que se llevó a cabo el proyecto, especificando cada uno de los objetivos y un desglose de las subactividades que se tuvieron que llevar a cabo para poder cumplir con dichos objetivos.

7. PRESUPUESTO

7.1. PRESUPUESTO GENERAL

En la tabla 2 se describe de manera general el presupuesto del proyecto segmentado por rubros, dichos gastos suman un total de \$ 4.051.380 COP.

 UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL CARIBE <small>Barranquilla - Atlántico</small>	PRESUPUESTO PARA PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN				GC-IV-PR-05-03
					Versión 4
					16/10/2018
PRESUPUESTO GENERAL DEL PROYECTO					
RUBROS	Fuentes de Financiamiento				Total
	Vicerrectoría de Investigación y Transferencia UAC	Facultad / Programa	Otras fuentes Externa s	Contrapartid a UAC	
1. Personal Científico	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 2.333.300	\$ 2.333.300
2. Personal de Apoyo	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 1.517.080	\$ 1.517.080
3. Consultoría Especializada y Servicios Técnicos	\$ 0	\$ 0	\$ 620.000	\$ 0	\$ 620.000
4. Materiales e Insumos	\$ 0	\$ 0	\$ 2.061.000	\$ 0	\$ 2.061.000
5. Salidas de Campo	\$ 0	\$ 0	\$ 320.000	\$ 0	\$ 320.000
6. Equipos	\$ 0	\$ 0	\$ 7.200.000	\$ 0	\$ 7.200.000
7. Bibliografía	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
8. Difusión de Resultados	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
9. Viajes	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
TOTAL, PRESUPUESTO DEL PROYECTO	\$ 0	\$ 0	\$ 10.201.000	\$ 3.850.380	\$ 14.051.380

Tabla 2. Presupuesto general.

7.2. PERSONAL CIENTÍFICO Y DE APOYO

En las tablas 3 y 4 se puede apreciar el presupuesto invertido en el tiempo empleado por el personal de investigación vinculados a este proyecto y el costo que estas

horas implican, en esta sección se incluyen a los directores y a los auxiliares de investigación.

1. PERSONAL CIENTIFICO										
Nombres y Apellidos	Función dentro del Proyecto	Tipo de Contrato	Valor Hora (\$)	Dedicación Horas/semana	No. de Semanas	Fuentes de Financiamiento				
						Vicerrectoría de Investigación y Transferencia	Facultad / Programa	Otras Fuentes Externas	Contrapartida UAC	SUB-TOTAL
1. Kelvin Beleño	Invest. Principal	Titular	\$ 46.666	1	25		X		\$ 1.166.650	\$ 1.166.650
2. Carlos Diaz	Co-Investigador	Titular	\$ 46.666	1	25		X		\$ 1.166.650	\$ 1.166.650
3.			FALSO						\$ 0	\$ 0
4.			FALSO						\$ 0	\$ 0
5.			FALSO						\$ 0	\$ 0
6.			FALSO						\$ 0	\$ 0
SUB-TOTAL						\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 2.333.300	\$ 2.333.300

Tabla 3. Costo personal científico.

2. PERSONAL DE APOYO										
Nombres y Apellidos	Función dentro del Proyecto	Tipo de Vinculación	Valor Hora (\$)	Dedicación Horas/semana	No. de Semanas	Fuentes de Financiamiento				
						Vicerrectoría de Investigación y Transferencia	Facultad / Programa	Otras Fuentes Externas	Contrapartida UAC	SUB-TOTAL
1. Johnathan Caselles	Aux. Investigación	Semillero	\$ 2.231	10	34		X		\$ 758.540	\$ 758.540
2. Oscar Contreras	Aux. Investigación	Semillero	\$ 2.231	10	34		X		\$ 758.540	\$ 758.540
3.			FALSO						\$ 0	\$ 0
4.			FALSO						\$ 0	\$ 0
5.			FALSO						\$ 0	\$ 0
SUB-TOTAL						\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 1.517.080	\$ 1.517.080

Tabla 4. Costo personal de apoyo.

7.3. CONSULTORIA ESPECIALIZADA

En la tabla 5 se describe el presupuesto invertido en servicios técnicos externos, en este caso, hace referencia a los servicios de comunicación y almacenamiento en la nube de Blynk.

3. CONSULTORIA ESPECIALIZADA Y SERVICIOS TECNICOS EXTERNOS						
Descripción	Justificación	Fuentes de Financiamiento				SUB-TOTAL
		Vicerrectoría de Investigación y Transferencia	Facultad / Programa	Otras Fuentes Externas	Contrapartida UAC	
1. Comunicación y almacenamiento en la nube	Suscripción anual a Blynk por servicios de almacenamiento en la nube y visualización de datos en múltiples dispositivos			\$ 620.000		\$ 620.000
2.						\$ 0
3.						\$ 0
SUB-TOTAL		\$ 0	\$ 0	\$ 620.000	\$ 0	\$ 620.000

Tabla 5. Costo consultoría especializada.

7.4. MATERIALES, INSUMOS Y EQUIPOS

En esta sección, las tablas de 6 a 8 describen el presupuesto dedicado a materiales e insumos, los cuales incluye materiales, dispositivos electrónicos, batería, Placa PCB, impresiones 3D, etc.

4. MATERIALES E INSUMOS						
Descripción	Justificación	Fuentes de Financiamiento				SUB-TOTAL
		Vicerrectoría de Investigación y Transferencia	Facultad / Programa	Otras Fuentes Externas	Contrapartida UAC	
1. Impresora 3D Creality Ender-3	Utilizada para la materialización en PLA del prototipo diseñado en SolidWorks			\$ 1.380.000		\$ 1.380.000
2. Sensores	conjunto de sensores (MICS 4514, MQ131, MQ135, DHT22, SPS20) utilizados para la medición de compuestos presentes en el aire			\$ 490.000		\$ 490.000
3. Módulos y accesorios	Demás componentes (Microprocesador ESP32, Módulo SIM800L, Módulo GPS, Batería de litio, Módulo de carga USB-C) utilizados para el procesamiento de datos, comunicación y alimentación del dispositivo.			\$ 191.000		\$ 191.000
4. Circuito impreso (PCB)	Utilizado para permitir la fijación de los componentes y responsable de la comunicación entre los mismos.			\$ 200.000		\$ 200.000
SUB-TOTAL		\$ 0	\$ 0	\$ 2.061.000	\$ 0	\$ 2.261.000

Tabla 6. Costo materiales e insumos.

5. SALIDAS DE CAMPO									
Descripción	Lugar	No. de Días	No. de Personas	Costo/día por persona	Fuentes de Financiamiento				SUB-TOTAL
					Vicerrectoría de Investigación y Transferencia	Facultad / Programa	Otras Fuentes Externas	Contrapartida UAC	
1. Pruebas en campo del dispositivo	Barranquilla, Colombia	4	2	\$ 50.000,00			\$ 320.000		\$ 320.000
2.									\$ 0
3.									\$ 0
4.									\$ 0
SUB-TOTAL					\$ 0	\$ 0	\$ 320.000	\$ 0	\$ 320.000

Tabla 7. Costo trabajo de campo.

6. EQUIPOS							
Descripción	Justificación	Cantidad	Fuentes de Financiamiento				SUB-TOTAL
			Vicerrectoría de Investigación y Transferencia	Facultad / Programa	Otras Fuentes Externas	Contrapartida UAC	
1. Computador portátil ASUS Zenbook Flip 15	Utilizado para el diseño en SolidWorks, la programación del dispositivo, la caracterización de los sensores y análisis de los datos en periodos de prueba.	1			\$ 7.200.000		\$ 7.200.000
2.							\$ 0
3.							\$ 0
4.							\$ 0
SUB-TOTAL			\$ 0	\$ 0	\$ 7.200.000	\$ 0	\$ 7.200.000

Tabla 8. Costo equipos usados.

8. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

8.1. DISEÑO DEL PROTOTIPO

8.1.1. Diseño CAD

El diseño del dispositivo Q-Air fue realizado con el software SolidWorks. Primero se hizo un diseño CAD de cada componente del sistema y posteriormente del contenedor en el que los componentes estarán. Por último, se integraron los elementos del sistema mediante el apartado de ensamblaje, para finalmente realizar una simulación del dispositivo completo.

La carcasa del dispositivo Q-Air (figura 10), posee una serie de orificios con el fin de permitir el flujo de aire en el dispositivo, para leer y monitorear las concentraciones de los gases y material particulado del ambiente, cuenta con agarre en la parte exterior para poder ser anclado a llaveros.



Figura 10. Carcasa (Autoría Propia).

La tapa del dispositivo Q-Air (figura 11), posee un vacío y dos orificios para integrar los componentes electrónicos para la carga del dispositivo y su encendido/apagado.

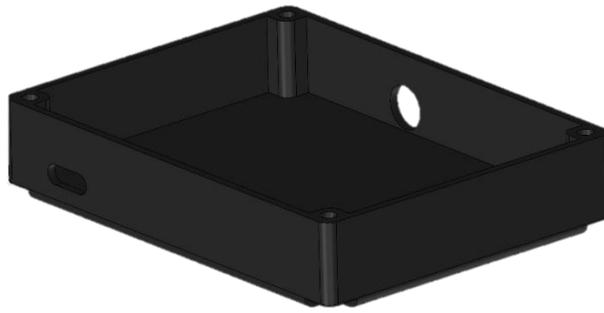


Figura 11. Tapa (Autoría Propia).

8.1.2. Diseño de circuito impreso (PCB)

El diseño de la PCB del dispositivo Q-Air fue realizado con el software EasyEDA el cual nos permite importar, diseñar placas de circuito impreso y simular circuitos analógicos y digitales, opcionalmente nos ofrece la alternativa de fabricación de los circuitos impresos. La placa PCB del sistema (figura 14), integra los sensores MQ135, MQ131, SPS30, MICS4514, NEO 6M, DHT22, Microprocesador ESP32, Modulo SIM800L, Leds y alimentación.

Se optó por utilizar un circuito impreso en este proyecto debido a la practicidad que ofrece. La fabricación y el uso de PCB eliminan el riesgo de fallos en el circuito causados por desconexiones repentinas de jumpers en la protoboard. Además, garantiza una apariencia más limpia y profesional del proyecto.

Primeramente, se identificaron los sensores a utilizar y se seleccionaron en el software EasyEDA, posterior a esto, se procedió a realizar el cableado entre los componentes del sistema con sus respectivas resistencias, alimentación y conexión a tierra, como se muestra en la (figura 12).

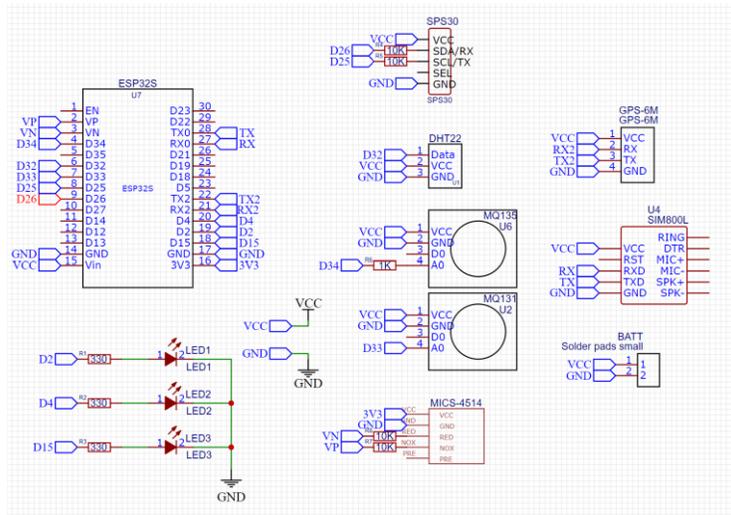


Figura 12. Conexiones de los sensores (Autoría Propia).

Tras completar las conexiones entre los componentes y el microprocesador, se realizaron la ubicación de los sensores en el rectángulo de la PCB, donde a continuación se definieron las pistas de conexión entre pines, para permitir un diseño óptimo y simple, se definieron 2 capas (Figura 13 y Figura 14), también se utilizaron el diámetro de pistas de 3mm, esto por conveniencia de fabricación.

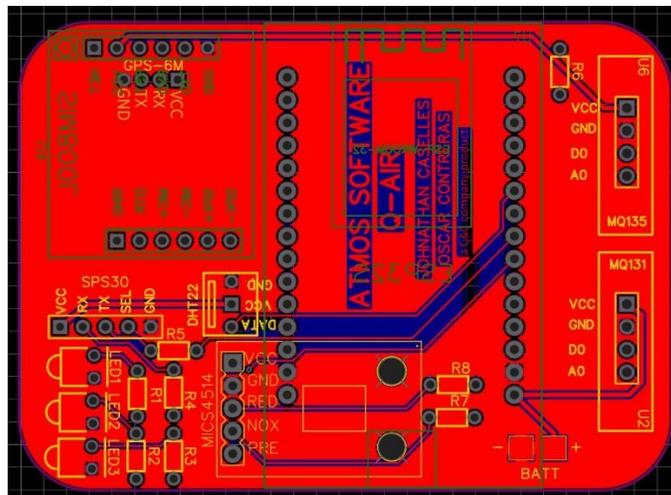


Figura 13. Capa 1 de PCB (Autoría Propia).

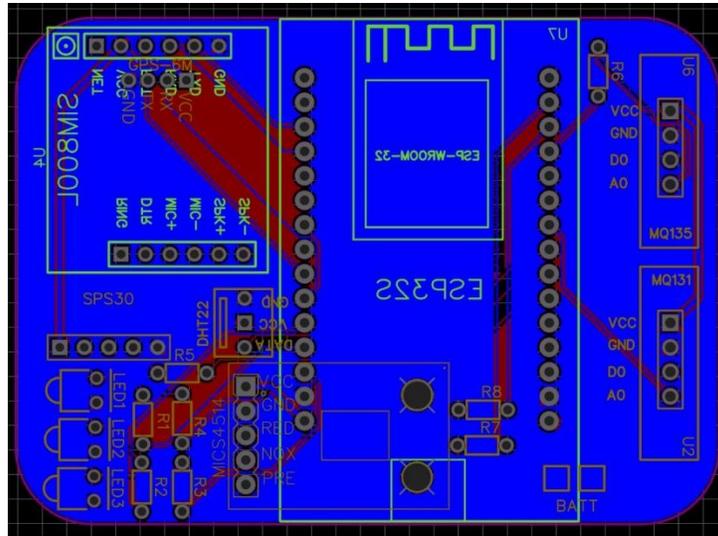


Figura 14. Capa 2 de PCB (Autoría Propia).

Finalmente, se compiló el diseño y se procedió a la fabricación, en la figura 12 se muestra la vista frontal de la PCB generada por el software Easy EDA.

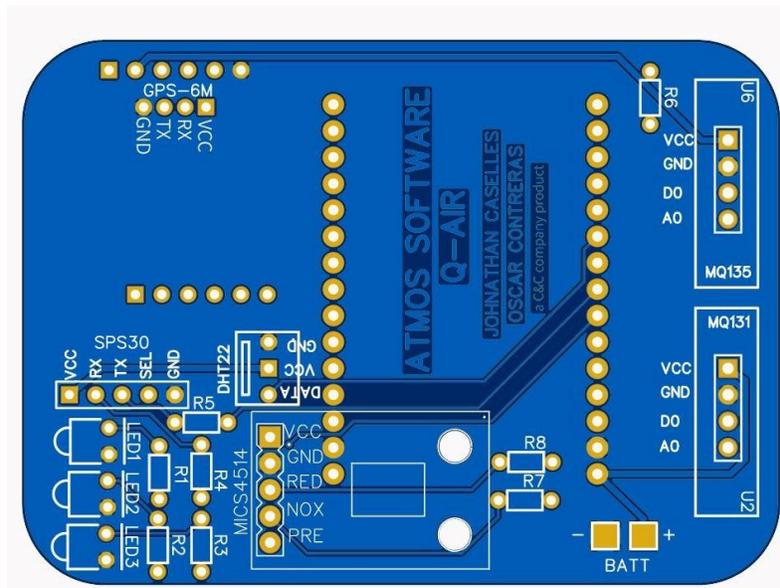


Figura 15. Diseño PCB (Autoría Propia).

8.1.3. Construcción y ensamblaje

Después de diseñar cada componente del sistema, se procede a realizar el ensamblaje en el software SolidWorks (figura 16), para proceder luego con la implementación del prototipo real mediante la selección de componentes asociados a esta etapa del diseño.

El dispositivo consta de 6 sensores, 2 módulos, un microprocesador, una batería de litio, un elevador de potencia, un circuito impreso y un cuerpo en el que se integrarán todos los componentes. El cuerpo del dispositivo consta de 2 partes, y posee una secuencia de franjas para permitir el adecuado flujo del aire. Sus dimensiones son 6cm x 6cm x 8cm.

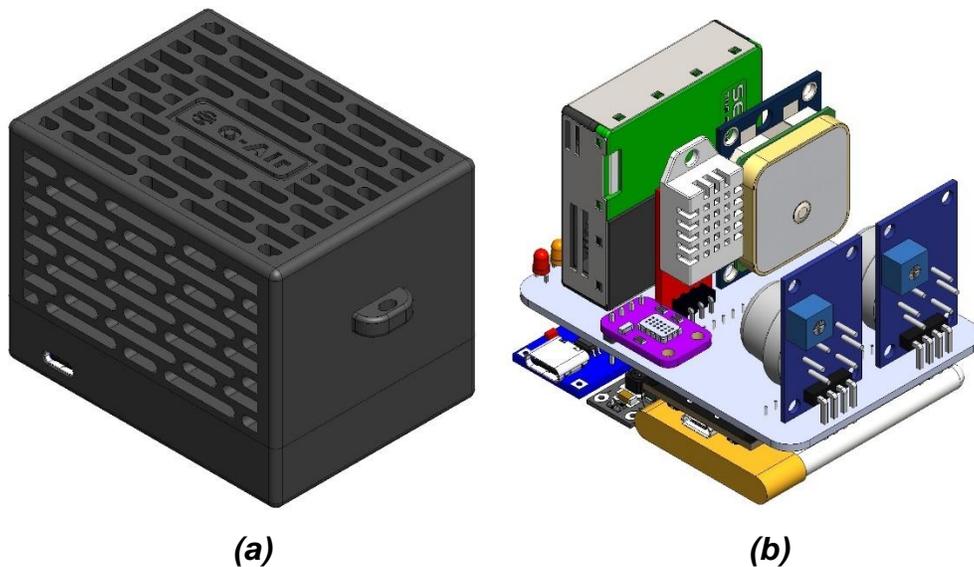


Figura 16. Dispositivo Ensamblado (Autoría Propia).

En la figura 16, la imagen (a) corresponde a una vista isométrica del cuerpo del dispositivo simulado en el software SolidWorks, por otro lado, la imagen (b) muestra una simulación de los componentes internos de Q-Air simulado en el mismo software y su respectiva posición en el circuito impreso, la cual garantiza que todas las piezas encajen perfectamente en la carcasa.

8.1.4. Fabricación del dispositivo

La fabricación del dispositivo Q-air fue realizada en impresión 3D (figura 17). Utilizando el material PLA, este proceso llamado fabricación aditiva es en el cual se crea un objeto a partir de un modelo digital tridimensional agregando capas de material una encima de la otra hasta crear la forma deseada. La impresión 3D permitió la creación de una carcasa y tapa personalizada para albergar los diferentes componentes del sistema portátil de monitoreo de la calidad del aire. Esto hizo posible que el dispositivo tuviera un diseño portátil y útil, facilitando su uso.

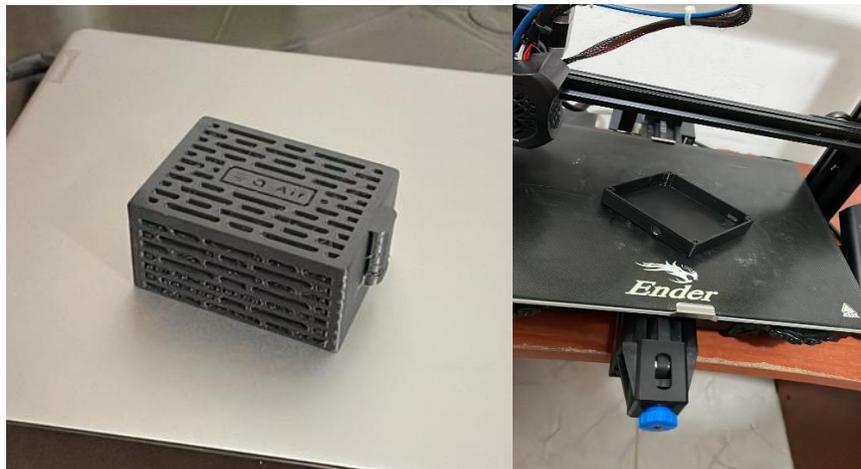


Figura 17. Fabricación del dispositivo (Autoría Propia).

8.2. DISEÑO DE LA INTERFAZ DE VISUALIZACION DE DATOS

Se realizó una revisión bibliográfica de diferentes softwares de visualización de datos en tiempo real con el propósito de diseñar una estrategia de visualización, evaluando varios enfoques e implementaciones disponibles. Se eligió el software BLYNK debido a que este tiene los componentes necesarios para modelar el sistema de monitoreo de la calidad del aire de una manera más rápida e intuitiva.

Una vez seleccionado Blynk, se diseñó una estrategia de interfaz de visualización de datos en tiempo real. Para ello, se determinaron los diferentes tipos de datos de monitoreo de la calidad del aire que se quieren mostrar en esta, como la concentración del monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO₂) y ozono (O₃), así como la temperatura, la humedad del ambiente y la presencia de material particulado PM2.5 y PM10.

En base a esta información, se seleccionaron los widgets necesarios en Blynk para visualizar los datos de manera clara y organizada. Se utilizan gráficos para representar la evolución de las concentraciones de gases, tablas para mostrar los valores medidos de cada sensor, indicadores para señalar los valores actuales de temperatura y humedad, y barras de progreso para indicar el grado de contaminación del aire, como se puede apreciar en la figura 18.

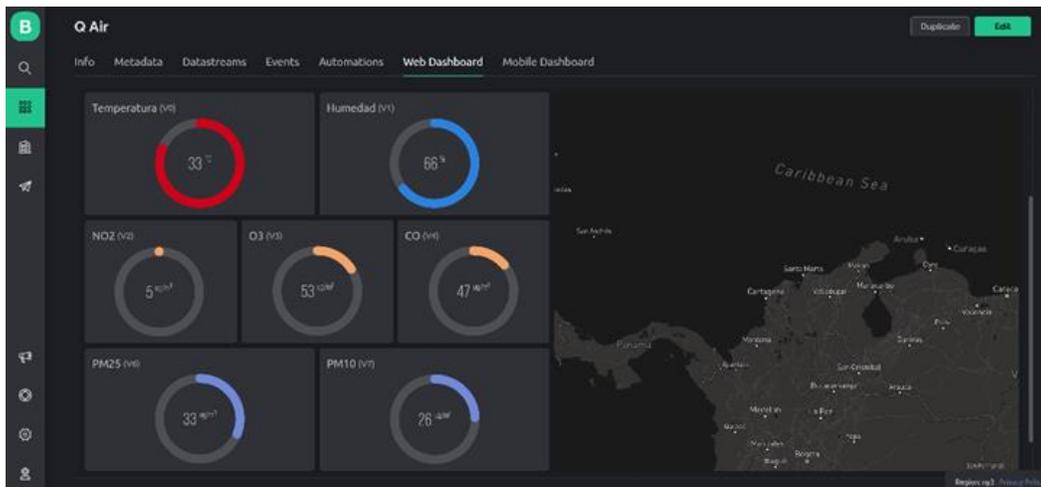


Figura 18. Diseño de la interfaz de visualización de datos (Autoría Propia).

Se organizaron los widgets de manera que la interfaz de usuario fuera fácil de entender y utilizar. Los widgets se agrupan según su función o tipo de datos y usan etiquetas descriptivas para que los usuarios puedan identificarlos fácilmente. Se utilizan colores y leyendas apropiados para cada widget para así identificar fácilmente los datos y comprender su significado. Se agregaron opciones de interacción para permitir a los usuarios controlar y manipular los datos mostrados, y

la escala del gráfico se puede cambiar para visualizar datos en diferentes niveles de detalle. De esta manera se logró diseñar una interfaz de usuario efectiva y fácil de utilizar para visualizar los datos del sistema portátil de monitoreo de la calidad del aire.

8.3. DISEÑO DEL DISPOSITIVO FINAL

Una vez que todos los componentes están integrados, el sistema se convierte en un dispositivo portátil de monitoreo de la calidad del aire, como se muestra en la (figura 19). El dispositivo se puede usar para medir y monitorear la calidad del aire en espacios abiertos y cerrados. El uso del microprocesador ESP32 hace que el dispositivo sea rápido en la captación y procesamiento de datos, así como altamente configurable, lo que significa que se pueden agregar nuevas funciones y ajustar las medidas de monitoreo de acuerdo con las necesidades específicas del usuario. Además, el uso del módulo SIM800L y la tarjeta SIM permite que el dispositivo se conecte a la red celular y publique datos a la plataforma en línea para el monitoreo en tiempo real de la calidad del aire.



Figura 19. Dispositivo Final (Autoría Propia).

8.4. CARACTERÍSTICAS DE LOS COMPONENTES

8.4.1. ESP32

El microprocesador ESP32 DEVKITV1 (figura 20), es una placa de desarrollo basado en el microcontrolador ESP32 está diseñada para desarrollar aplicaciones con conectividad wifi y bluetooth. La placa ESP32 será utilizada para procesar la información suministrada por los sensores de gas, material particulado y las variables climatológicas, para enviarlos a través de wifi a un servidor o aplicación móvil para su visualización y análisis.

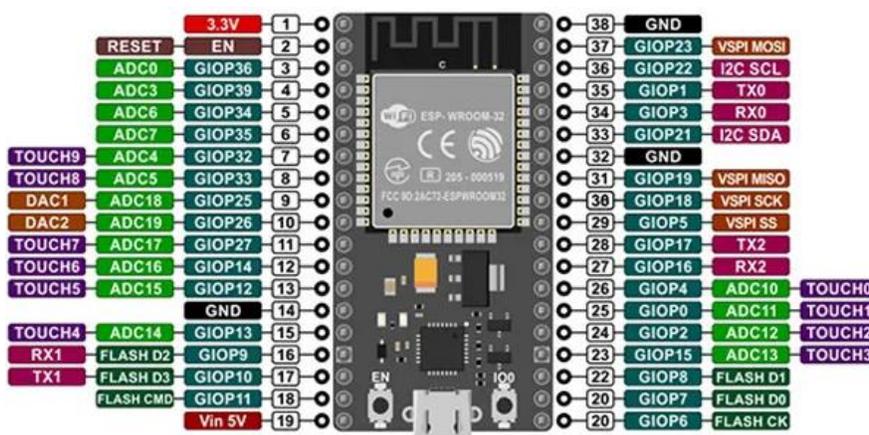


Figura 20. ESP32 [35].

Voltaje	5 V mediante USB o 3,3 V mediante pin VIN
Corriente	80mA
Microcontrolador	ESP32-D0WDQ6 con dos núcleos Xtensa LX6 de 32
Conectividad inalámbrica	Wi-Fi 802.11 b/g/n y Bluetooth v4.2 BR/EDR y BLE
Memoria	4 MB de memoria flas y 520 KB de memoria SRAM
Temperatura de funcionamiento	-40°C a 125°C
Pines	30 pines GPIO (General Purpose Input/Output)
Interfaces	USB-UART, micro-USB, SPI, I2C, I2S, PWM y ADC
Dimensiones	52 mm x 27 mm x 17 mm

Tabla 9. Características electrónicas del ESP32.

8.4.2. MQ135

El sensor MQ135 (figura 21), posee una alta sensibilidad cambiando su resistencia al momento de detectar la calidad del aire. Este sensor es capaz de detectar varios gases como el dióxido de carbono, benceno, vapores de alcohol, monóxido de nitrógeno, entre otros. El MQ135 será utilizado para detectar los niveles de dióxido de carbono (CO₂) que se encuentre en el ambiente. El sensor se calienta y luego se expone al aire, la resistencia del elemento es sensible al gas el cual cambia en función de la concentración de gas en el aire. Esta resistencia cambiante se mide y se convierte en una señal eléctrica que se puede procesar y leer por el microcontrolador ESP32.



Figura 21. MQ-135 [37].

Voltaje	5V
Corriente	150mA
Salida analógica	Valor analógico de detecta tensión
Sensibilidad	Ajustable con el potenciómetro
Tiempo de respuesta	Menos de 60 segundos
Temperatura de funcionamiento	-10°C a 50°C
Técnica de detección	Resistencia
Dimensiones	32mm x 20mm x 18mm
Concentración de detección	
Dióxido de carbono (CO₂)	10 a 10.000 ppm
Monóxido de carbono (CO)	1 a 1000 ppm

Tabla 10. Características electrónicas del MQ-135.

8.4.3. MQ131

El sensor MQ131 (figura 22), está diseñado para detectar la concentración de ozono (O_3) en el aire. Este sensor será utilizado para detectar los niveles de ozono que se encuentren en el ambiente, su función se basa mediante la absorción de luz en una longitud de onda específica, lo que produce una corriente eléctrica que es proporcional a la concentración de ozono en el aire. La señal eléctrica que produce el sensor MQ131 es procesada por el microcontrolador ESP32.



Figura 22. MQ-131 [38].

Voltaje	5V
Corriente	150mA
Salida analógica	Valor analógico de detecta tensión
Sensibilidad	Ajustable con el potenciómetro
Tiempo de respuesta	Menos de 60 segundos
Temperatura de funcionamiento	-10°C a 50°C
Técnica de detección	Resistencia
Dimensiones	32mm x 20mm x 18mm
Concentración de detección	
Ozono (O_3)	10 a 1000ppm

Tabla 11. Características electrónicas del MQ-131.

8.4.4. MICS4514

El MICS4514 (figura 23), es un sensor compacto que puede detectar la concentración de monóxido de carbono (CO) y óxidos de nitrógeno (NOx) en el aire. El MICS4514 será utilizado para detectar los niveles de monóxido de carbono y dióxido de nitrógeno que se encuentren en el ambiente. Este sensor utiliza una técnica de detección electroquímica que convierte la concentración de gases en una señal eléctrica que puede ser procesado por el microcontrolador ESP32.

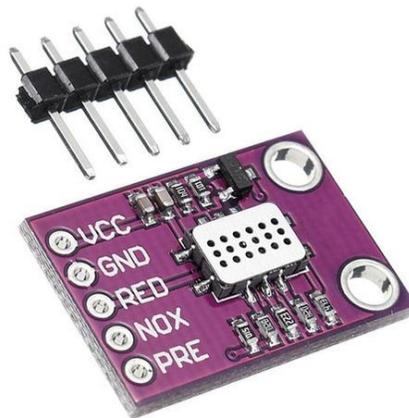


Figura 23. MICS4514 [39].

Voltaje	5V
Corriente	20mA
Salida analógica	Valor analógico de detecta tensión
Sensibilidad	CO: 1 ppm. NOx: 0.05 ppm.
Tiempo de respuesta	Menos de 15 segundos
Temperatura de funcionamiento	-10°C a 50°C
Técnica de detección	Electroquímica
Dimensiones	32mm x 20mm x 22mm
Concentración de detección	
Monóxido de carbono (CO)	1 a 1000 ppm
Óxidos de nitrógeno (NOx)	0.05 a 10 ppm

Tabla 12. Características electrónicas del MICS4514.

8.4.5. SPS30

El SPS30 (figura 24), es un sensor de partículas finas que puede detectar la concentración de partículas en el aire. Este sensor utiliza una técnica de detección de luz láser que convierte la concentración de partículas en una señal eléctrica que puede medirse y utilizarse para determinar la calidad del aire y la presencia de contaminantes. El SPS30 será utilizado para detectar las partículas PM2.5 y PM10 que se encuentren en el ambiente.



Figura 24. SPS30 [39].

Voltaje	5V
Corriente	60mA
Salida analógica	Valor analógico de detecta tensión
Sensibilidad	0.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Tiempo de respuesta	Menos de 1 segundo
Temperatura de funcionamiento	-10°C a 60°C
Técnica de detección	Tecnología láser de dispersión de luz
Dimensiones	41mm x 41mm x 12mm
Concentración de detección	
Partículas finas	0 a 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Tabla 13. Características electrónicas del SPS30.

8.4.6. Módulo NEO 6M

El NEO 6M (figura 25), es un módulo GPS (Sistema de Posicionamiento Global) compacto que puede proporcionar información precisa de la ubicación y la hora. Este módulo cuenta con una antena integrada que utiliza una tecnología de posicionamiento por satélite para determinar la ubicación. Además, el NEO 6M es compatible con varios protocolos de comunicación, lo que permite la integración fácil con diferentes tipos de dispositivos electrónicos. El módulo NEO 6M será utilizado para brindar la ubicación en tiempo real del dispositivo Q-AIR, para detectar cuales son las zonas con mayor concentración de gases y partículas de polvo en el ambiente, se puede conectar a una placa electrónica a través del puerto serie.

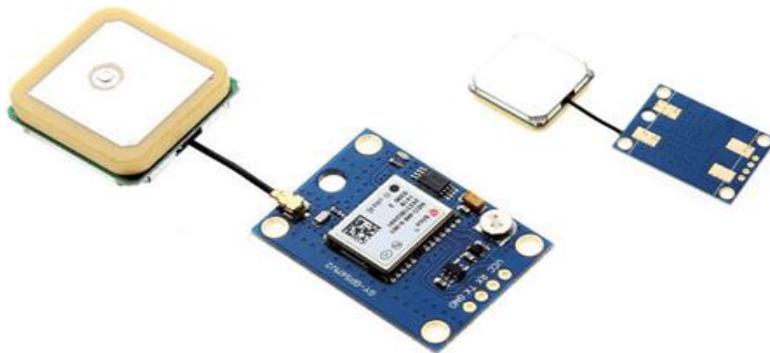


Figura 25. MODULO NEO 6M [40].

Voltaje	5V
Corriente	25mA
Salida analógica	Valor analógico de detecta tensión
Frecuencia de actualización de posición	10 Hz
Tiempo de respuesta	Menos de 1 minuto en frio y menos de 10 segundos en caliente
Temperatura de funcionamiento	-40°C a +85°C
Dimensiones	23.5 mm x 25 mm x 7 mm
Dimensión de antena	22mm x 22mm

Tabla 14. Características electrónicas del Módulo NEO 6M.

8.4.7. Módulo SIM800L

El módulo SIM800L (figura 26), es un dispositivo electrónico que permite la comunicación GSM/GPRS (2G) a través de una red celular, se compone de una antena, un conector de tarjeta SIM y una interfaz de comunicación UART. Requiere de una tarjeta SIM activa y una suscripción a un plan de datos para enviar o recibir datos a través de la red celular. Este módulo es ideal para proyectos de Internet de las cosas (IoT), dispositivos de seguimiento, sistemas de control remoto, entre otros. El módulo SIM800L será utilizado para acceder a Internet una vez conectado al microcontrolador ESP32 lo que permitiría la comunicación y transmisión de datos a través de la red celular.



Figura 26. MODULO SIM800L [41].

Voltaje	de 3.4V a 4.4V
Corriente	200mA
Salida analógica	Valor analógico de detecta tensión
Frecuencia de transmisión	850/900/1800/1900 MHz
Velocidad de comunicación	1200 bps a 115200 bps
Temperatura de funcionamiento	-40 °C a +85 °C
Protocolos de comunicación	TCP/UDP/HTTP/FTP/SMTP/MMS
Tarjeta SIM	Soporta tarjetas SIM de 1.8V y 3V
Dimensiones	24mm x 24mm x 3mm

Tabla 15. Características electrónicas del Módulo SIM800L.

8.4.8. Módulo USB-C TP4056

El módulo TP4056 (figura 27), es un dispositivo electrónico que permite cargar baterías de litio mediante una conexión USB. Estos módulos cuentan con un chip controlador de carga TP4056, que supervisa la corriente y la tensión de entrada para garantizar que la batería se cargue de manera segura y eficiente. También incluyen un indicador LED que muestra el estado de carga de la batería. Este tipo de puerto ofrece varias ventajas, como una mayor velocidad de transferencia de datos y la capacidad de proporcionar energía a dispositivos más grandes y potentes. El módulo USB-C será utilizado para la carga de baterías y el suministro de energía a los componentes del sistema

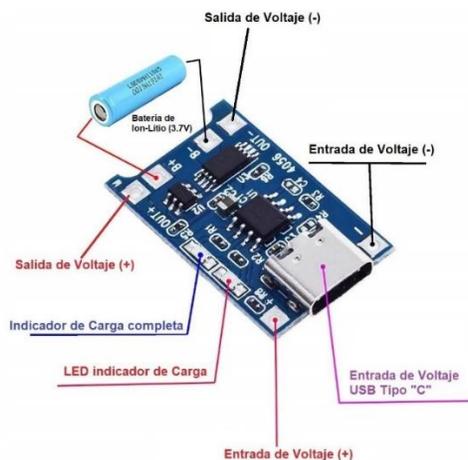


Figura 27. MODULO USB-C TP4056 [42].

Voltaje	4.5 V - 5.5 V
Corriente	20mA
Corriente de carga ajustable	100 mA - 1000 mA
Voltaje de carga	4.2 V
Protección	Contra polaridad inversa y cortocircuitos
Temperatura de funcionamiento	-40°C a +85°C
Indicadores LED para el estado de carga	Rojo para carga, verde para carga completa
Dimensiones	26mm x 17mm x 2.5mm

Tabla 16. Características electrónicas del Módulo USB-C TP4056.

8.4.9. MINI BOOST STEP UP

El Mini Boost Step Up (figura 28), es un módulo electrónico que se utiliza para aumentar la tensión de entrada a un nivel mayor y constante. El Mini Boost Step Up será utilizado para alimentar dispositivos electrónicos con baterías de menor voltaje, como una batería de 3.7V y obtener una tensión de salida de 5V o más.

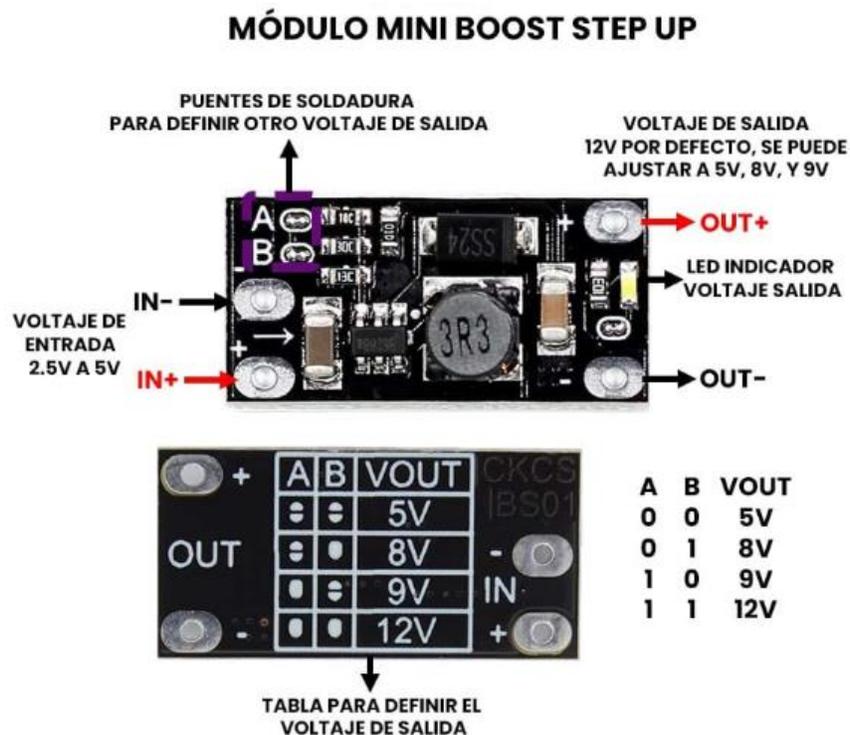


Figura 28. MINI BOOST STEP UP [42].

Voltaje de entrada	0.9V - 5V
Voltaje de salida	5V - 28V (ajustable)
Corriente	50mA
Corriente de salida máxima	2A
Eficiencia de conversión	Hasta 93%
Temperatura de funcionamiento	-40°C a +85°C
Protección	Contra cortocircuitos y sobrecalentamiento
Dimensiones	25mm x 18mm x 2.5mm

Tabla 17. Características electrónicas del Mini Boost Step Up.

8.4.10. DHT22 (AM2302)

El DHT22 (figura 29), es un sensor de temperatura y humedad que puede ser utilizado en una variedad de aplicaciones electrónicas. Este sensor es capaz de medir la temperatura ambiente con una precisión de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ y la humedad relativa con una precisión de $\pm 2-5\%$, dependiendo de la temperatura. Además, se comunica mediante un solo pin de datos y puede ser alimentado con un voltaje de entre 3V y 5V. El sensor DHT22 será utilizado para el monitoreo de temperatura y humedad como el monitoreo de la calidad del aire interior y exterior.

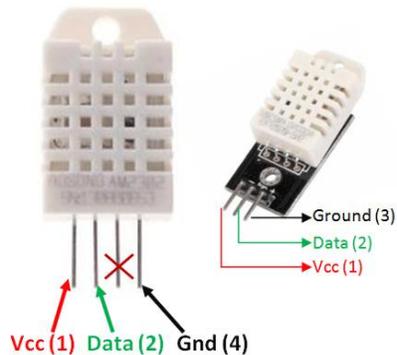


Figura 29. Sensor DHT22 [43].

Voltaje	3.3V - 5.5V
Corriente	2.5mA
Salida digital	señal digital de 1 bit (bus de datos)
Sensibilidad	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa
Tiempo de respuesta	2 segundos
Técnica de detección	Humedad Capacitiva y Temperatura por resistencia
Temperatura de funcionamiento	-40°C a $+85^{\circ}\text{C}$
Rango de medición de temperatura	-40°C a 80°C
Rango de medición de humedad	0% a 100% HR
Dimensiones	15.1mm x 25mm x 7.7mm

Tabla 18. Características electrónicas del DHT22.

8.5. CÁLCULO DE LA BATERÍA

Para calcular la capacidad de la batería del dispositivo Q-AIR, debemos sumar el consumo de corriente de todos los componentes del sistema. Para hacerlo, debemos utilizar las especificaciones de cada componente para determinar la corriente que consumen.

Tenemos las especificaciones del consumo de corriente de cada uno de los componentes del sistema.

- ESP32: 50mA
- SPS30: 50mA
- MQ131: 150mA
- MQ135: 150mA
- MICS4514: 20mA
- Modulo SIM800L: 7mA
- NEO 6M: 25mA
- DHT22: 2.5mA
- Mini Boost Step Up: 20mA
- Módulo TP4056: 50mA

Si todos los componentes funcionan al mismo tiempo, entonces la corriente total que consumen es de:

$$C_T = 50mA + 50mA + 150mA + 150mA + 20mA + 7mA + 25mA + 2.5mA + 20mA$$

Ecuación 1. Corriente total.

$$C_T = 524.5 mA$$

La capacidad total de la batería es de 2000 mAh y la corriente total del dispositivo es de 747.5 mA.

$$T_D = \frac{2000 \text{ mAh}}{524.5 \text{ mA}} \approx 4 \text{ horas}$$

Ecuación 2. Tiempo de duración.

Es importante tener en cuenta que estos cálculos son una estimación y que los consumos reales pueden variar dependiendo de las condiciones de uso de los componentes y la carga de trabajo del microcontrolador. Por lo tanto, es recomendable utilizar una batería con una capacidad mayor a la calculada para asegurarse de tener una autonomía suficiente.

8.6. BATERIA POLIMERO DE LITIO 3.7V 2000mAh

La batería de polímero de litio (LiPo) de 3.7V y 2000mAh (figura 30), es un tipo de batería recargable, que puede suministrar una corriente de 2000mA durante 4 horas. Estas baterías tienen una densidad de energía alta en comparación con otros tipos de baterías recargables, lo que significa que pueden almacenar más energía en menos espacio y peso.



Figura 30. Batería Lipo de 3.7V y 2000mAh [44].

Voltaje	3.7V
Capacidad nominal	2000mAh
Corriente de carga máxima	2A
Corriente de descarga máxima continua	5C (10A)
Corriente de descarga máxima de pulso	10C (20A)
Ciclos de vida útil	300-500 ciclos de carga/descarga
Temperatura de carga	0-45°C
Temperatura de descarga	-20-60°C
Dimensiones	50 mm x 50mm x 34mm

Tabla 19. Características electrónicas de Batería Lipo de 3.7V y 2000mAh.

8.7. RESOLUCIÓN 2254 DE 2017

La resolución 2254 de 2017 es una norma emitida por el ministerio de ambiente y desarrollo sostenible de Colombia en la cual establece los requisitos técnicos para la implementación de estaciones de monitoreo de la calidad del aire en espacios públicos y privados abiertos al público en el país. Esta resolución establece medidas de seguridad, privacidad y protección de datos personales para garantizar la legalidad y transparencia en la instalación y uso de estos sistemas de vigilancia.

Además, establece los procedimientos y parámetros técnicos para la medición y el reporte de los contaminantes atmosféricos, así como los requisitos de ubicación y la periodicidad de las mediciones.

En la tabla (20) se establecen los niveles máximos permisibles de los gases contaminantes y material particulado que rige la resolución 2254 de 2017.

Contaminante	Nivel máximo Permissible ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Tiempo de Exposición
PM10	50	Anual
	100	24 horas
PM2.5	25	Anual
	50	24 horas
NO ₂	60	Anual
	200	1 hora
O ₃	100	8 horas
CO	5.000	8 horas
	35.000	1 hora

Tabla 20. Niveles máximos permisibles de criterio del aire [45].

Materia Particulada (PM10 y PM2.5), Dióxido de Azufre (SO₂), Dióxido de Nitrógeno (NO₂), Ozono (O₃), Monóxido de Carbono (CO).

8.8. INDICE DE LA CALIDAD DEL AIRE (ICA)

El Índice de la Calidad del Aire (ICA) es un indicador que se utiliza para medir la calidad del aire en una determinada área geográfica, y está basado en la concentración de contaminantes atmosféricos. El ICA es un valor numérico que se calcula a partir de la medición de diferentes contaminantes como el dióxido de nitrógeno (NO₂), ozono (O₃), monóxido de carbono (CO) y partículas PM10 y PM2.5, que pueden afectar la salud de las personas y el medio ambiente. El ICA se expresa en una escala numérica que va de 0 a 500, donde 0 representa una calidad del aire

excelente y 500 indica una calidad del aire muy mala, por lo que es un riesgo para la salud humana y el medio ambiente. Este índice es utilizado por las autoridades ambientales para informar a la población sobre el estado de la calidad del aire y tomar medidas preventivas en caso de superar ciertos umbrales de contaminación. Además, el ICA puede ser utilizado por la población en general para tomar decisiones informadas sobre la exposición al aire contaminado.

En la tabla (21) establecen cada valor del Índice de la Calidad del Aire (ICA) la cual tiene una clasificación asociada por un código de colores que describe la calidad del aire en términos de los efectos que puede tener en la salud de la población.

Rango	Color	Estado	Efectos
0 – 50 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Verde	Buena	La contaminación atmosférica supone un riesgo bajo para la salud.
51 – 100 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Amarillo	Aceptable	Posibles síntomas respiratorios en grupos poblacionales sensibles.
101 – 150 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Naranja	Dañina a la salud de grupos sensibles	Los grupos poblacionales sensibles pueden presentar efectos sobre la salud. 1) Ozono Troposférico: las personas con enfermedades pulmonares, niños, adultos mayores y las que constantemente realizan actividad física al aire libre, debe reducir su exposición a los contaminantes del aire. 2) Material particulado: Las personas con enfermedad cardiaca o pulmonar, los adultos mayores y los niños se consideran sensibles y por lo tanto en mayor riesgo
151 – 200 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Rojo	Dañina para la salud	Todos los individuos pueden comenzar a experimentar efectos sobre la salud. Los grupos sensibles pueden experimentar efectos más graves para la salud
201 – 300 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Púrpura	Muy dañina para la salud	Estado de alerta que significa que todos pueden experimentar efectos más graves para la salud
301 – 500 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Marrón	Peligrosa	Advertencia sanitaria. Toda la población puede presentar efectos adversos graves en la salud humana y están propensos a verse afectados por graves efectos sobre la salud

Tabla 21. Descripción general del Índice de Calidad del Aire [45].

En la tabla (22) establecen los puntos de corte del índice de calidad del aire.

Índice de Calidad del Aire		Puntos de corte ICA						
Rango ICA	Categoría	PM10 µg/m ³ 24 horas	PM2.5 µg/m ³ 24 horas	CO µg/m ³ 8 hora	SO ₂ µg/m ³ 1 hora	NO ₂ µg/m ³ 1 hora	O ₃ µg/m ³ 8 horas	O ₃ µg/m ³ 1 hora
0 - 50	Verde	0 - 54	0 - 12	0 - 5094	0 - 93	0 - 100	0 - 106	---
51 - 100	Amarillo	55 - 154	13 - 37	5095 - 10819	94 - 197	101 - 189	107 - 138	---
101 - 150	Naranja	155 - 254	38 - 55	10820 - 14254	198 - 486	190 - 677	139 - 167	245 - 323
151 - 200	Rojo	255 - 354	56 - 150	14255 - 17688	487 - 797	678 - 1221	168 - 207	324 - 401
201 - 300	Púrpura	355 - 424	151 - 250	17689 - 34862	798 - 1583	1222 - 2349	208 - 393	402 - 794
301 - 500	Marrón	425 - 604	251 - 500	34863 - 57703	1584 - 2629	2350 - 3853	394	795 - 1185

Tabla 22. Puntos de corte del Índice de Calidad del Aire [45].

Fórmula de cálculo del índice de la Calidad del Aire (ICA) se efectúa a partir de la siguiente ecuación:

$$ICA_p = \frac{I_{alto} - I_{bajo}}{PC_{alto} - PC_{bajo}} * (C_p - PC_{bajo}) + I_{bajo} \quad \text{Ecuación 3. ICA.}$$

Donde.

ICA_p = Índice de calidad del aire para el contaminante p

C_p = Concentración media para contaminante p

PC_{alto} = Punto de corte mayor o igual a C_p

PC_{bajo} = Punto de corte menor o igual a C_p

I_{alto} = Valor del Ica correspondiente al PC_{alto}

I_{bajo} = Valor del Ica correspondiente al PC_{bajo}

8.9. RECOLECCIÓN DE DATOS

Con el fin de validar la veracidad de los datos obtenidos mediante Q-Air, se debía compararlos con fuentes confiables de información, por esta razón, se establecieron como referencia los datos publicados por las 2 estaciones fijas de monitoreo activas en la ciudad de Barranquilla, ubicadas en la Universidad del Norte y en el parque de la electrificadora.

Para la recolección de los datos se realizaron 8 salidas de campo a locaciones ubicadas aproximadamente a 20 m de distancia de las estaciones de calidad del aire de la ciudad mencionadas anteriormente.



Figura 31. Localización Universidad del Norte (Autoría Propia).

En la (figura 31), se puede observar la ubicación de la Universidad del Norte en el mapa, además del punto aproximado en el que se ubicó el dispositivo Q-Air para realizar la toma de datos.



Figura 32. Localización parque de la Electrificadora (Autoría Propia).

En la (figura 32) se puede observar la segunda ubicación aproximada en la que se situó el dispositivo Q-Air para realizar las mediciones cerca a la estación del parque de la electrificadora.

En total, se tomaron 4 mediciones diferentes en cada uno de estos lugares. En las cuales, los sensores estaban programados para realizar una lectura cada 30 segundos, esta lectura era enviada a una hoja de Excel durante media hora, dándonos un total de 60 lecturas por medición. A pesar de las lecturas estar situadas en locaciones cercanas a las estaciones de monitoreo, los 60 valores obtenidos debían ser promediados para poder compararlos con la lectura publicada por las estaciones, debido a que estas actualizan sus lecturas cada 30 minutos, estos valores son publicados en dos páginas diferentes, Iqair.com, que publica los valores de temperatura y humedad, y weather.com, que publica los valores de los contaminantes atmosféricos. Esta comparación nos permitió así, realizar una calibración más precisa de cada uno de los sensores, para poder asegurarnos de que cada uno de ellos realizaba las lecturas de cada contaminante atmosférico.

Tiempo (s)	Temperatura (°C)	Humedad (%)	NO ₂ (ppm)	O ₃ (µg/m ³)	CO(µg/m ³)	PM2.5(µg/m ³)	PM10(µg/m ³)
0	32.01	58.9	4.96	20,54	89,22	13,91	26,44
30	32.01	58.4	4.96	18,89	89,22	13,89	26,4
60	32.01	59	4.83	20,85	86,04	13,89	26,39
90	32.01	59.1	4.96	21,49	89,04	13,89	26,39
120	32.02	59.3	5.09	20,08	92,52	13,88	26,38
150	32.02	59	5.19	20,54	94,97	13,89	26,4
180	32.1	59.3	5.09	18,75	92,34	13,92	26,46
210	32	59	4.85	18,84	86,39	13,93	26,48
240	32.05	58.7	5.01	20,13	90,49	13,92	26,45
270	32.04	58.3	5.14	22,97	93,65	13,93	26,49
300	32.04	58.9	4.76	19,79	84,15	13,94	26,51
330	32	58.6	4.88	18,39	87,09	13,94	26,51
360	31.9	58.6	5.14	21,6	93,65	13,95	26,51
390	32	58.4	4.98	20,33	89,59	13,96	26,55
420	31.95	58.8	4.78	19,64	84,66	13,97	26,56

Tabla 23. Segmento de datos obtenidos en la Universidad del Norte.

Tiempo (s)	Temperatura (°C)	Humedad (%)	NO ₂ (ppm)	O ₃ (µg/m ³)	CO(µg/m ³)	PM2.5(µg/m ³)	PM10(µg/m ³)
0	27,6	74,5	3,6	56	125,14	14,73	28,2
30	27,6	74,5	3,72	60,92	130,63	14,74	28,22
60	27,7	74,3	3,66	56	127,99	14,74	28,22
90	27,6	74,8	3,45	58,94	117,92	14,73	28,2
120	27,7	74,6	3,71	63,04	130,36	14,73	28,2
150	27,7	74,5	3,93	66,18	140,85	14,72	28,18
180	27,7	74,5	3,79	65,54	134,14	14,71	28,15
210	27,6	74,7	3,59	64,5	124,63	14,7	28,13
240	27,7	74,7	3,71	62,46	130,1	14,7	28,14
270	27,7	74,2	3,79	60,24	133,87	14,71	28,17
300	27,7	74,5	3,64	57,92	126,69	14,72	28,18
330	27,8	74,4	3,86	64,16	137,46	14,74	28,22
360	27,8	74,4	3,67	60,38	128,25	14,74	28,22
390	27,8	74,6	3,56	57,06	123,11	14,75	28,24
420	27,8	74,2	3,46	59,84	118,4	14,75	28,24

Tabla 24. Segmento de datos obtenidos en el parque la Electrificadora.

Las tablas 23 y 24, corresponden una muestra de las lecturas obtenidas por los sensores cada 30 segundos en los respectivos puntos de medición. Para el almacenamiento de estos resultados, las mediciones de los 5 contaminantes y las variables atmosféricas obtenidas por los sensores se iban siendo publicados mediante puerto serial del computador e iban siendo agregados línea por línea a un archivo de extensión.csv, el cual se utilizó posteriormente para el análisis de los datos.

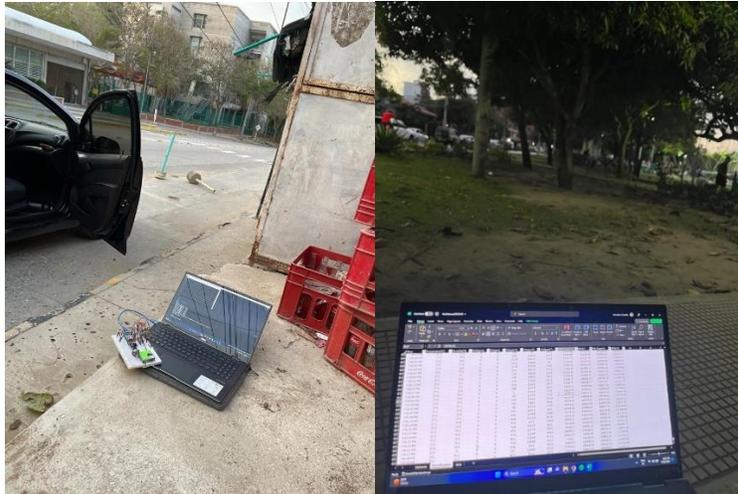


Figura 33. Salida de campo en los puntos de la Universidad del Norte y del parque de la Electrificadora (Autoría propia).

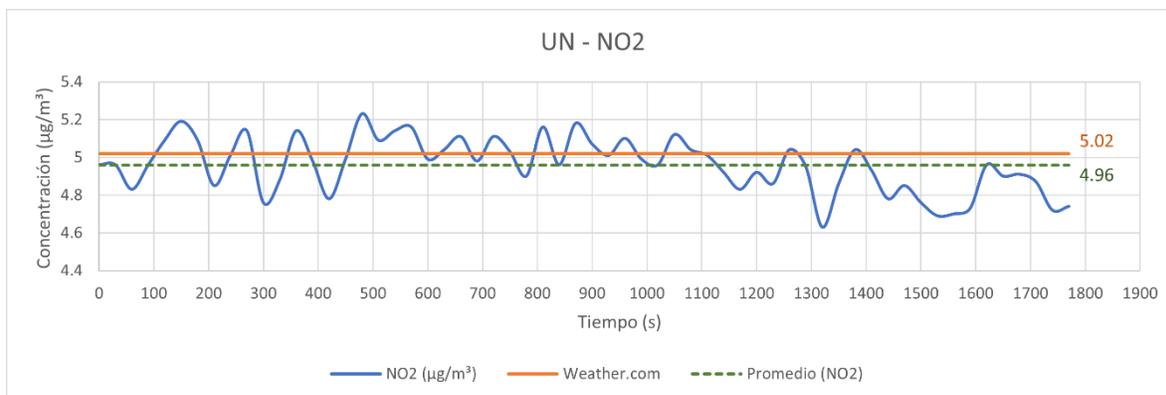
En la (figura 33), se puede observar cómo se realizaron las primeras mediciones del dispositivo, en las que confirmamos que las lecturas se realizaran de una forma correcta y no se tuvieron fallas en los resultados ni en las conexiones del circuito.

8.10. ANALISIS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS POR EL DISPOSITIVO

Para el análisis de los resultados obtenidos durante estas mediciones, se tomó como referencia el índice de corte de cada uno de los contaminantes atmosféricos indicados por el ICA, para evaluar la calidad del aire en diferentes localizaciones de la ciudad. El ICA clasifica la calidad del aire por medio de una escala numérica que va en aumento por cada $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, comenzando $0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y teniendo un valor máximo de $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El ICA también clasifica estas escalas por colores, siendo el verde un bajo contaminación y marrón que la concentración del contaminante es peligrosa en el espacio de la medición.

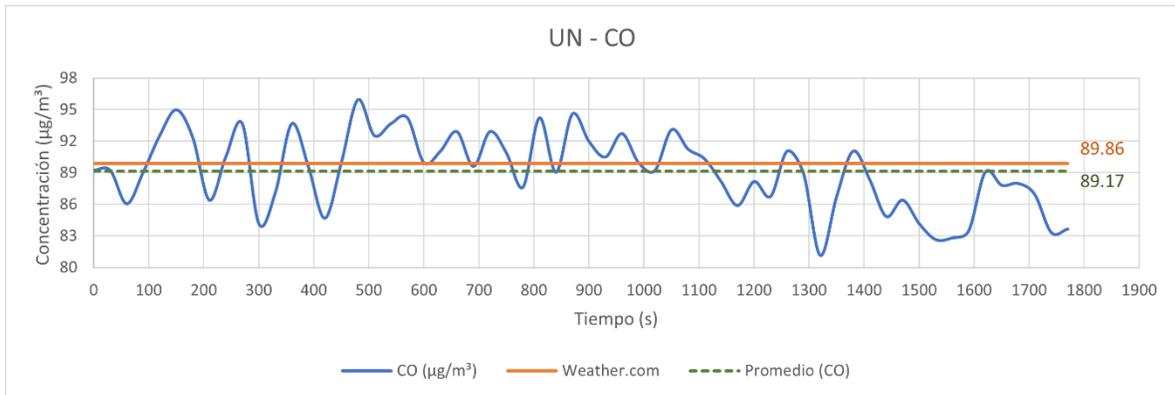
De igual forma, es importante destacar, que los valores obtenidos por el dispositivo de la calidad del aire Q-air, fueron comparados con los valores que son publicados

por estaciones de la calidad del aire que se encuentran dentro de la ciudad, las cuales cuentan con el certificado a UL-867, que verifica que los purificadores de aire cumplen con los estándares de seguridad eléctrica de los Estados Unidos. Esta comparación nos ayuda a rectificar que las mediciones obtenidas por Q-air sean correctas y nos ayuda a saber que ajustes se le deben realizar a cada sensor para que sus lecturas sean más precisas.



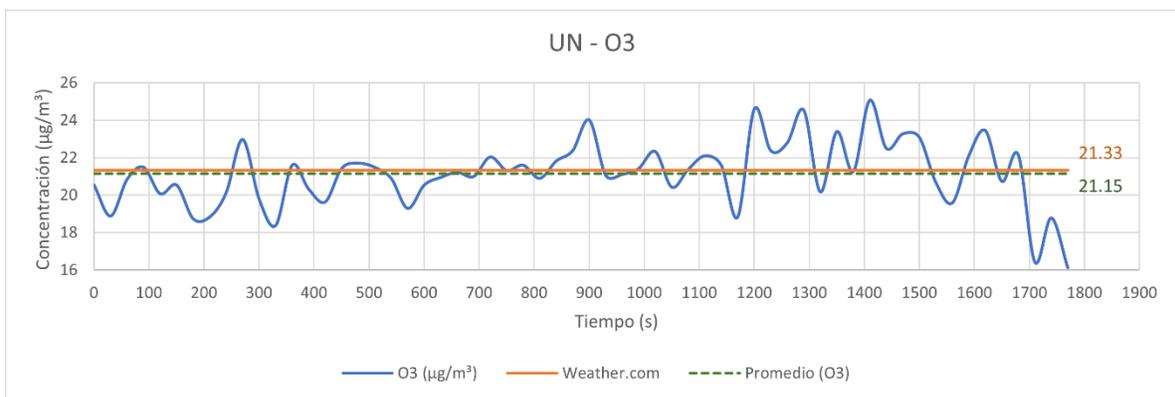
Gráfica 1. Medición de Dióxido de Nitrógeno (NO_2) Universidad del norte.

En la (gráfica 1), la línea de color azul representa las lecturas de dióxido de nitrógeno obtenidas por el sensor MiCS4514 en intervalos de 30 segundo durante un tiempo de media hora. Se puede apreciar las lecturas oscilan entre 4.62 y 5.25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La línea interlineada verde es el promedio de dichos datos, dando un resultado de 4.96 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, y la línea de color anaranjado es el valor reportado por la estación fija de monitoreo en ese intervalo de tiempo, que corresponde a 5.02 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, con lo que nos podemos dar cuenta de que los datos obtenidos estuvieron bastante cercanos a los datos publicados por la estación de monitoreo de la Universidad del Norte.



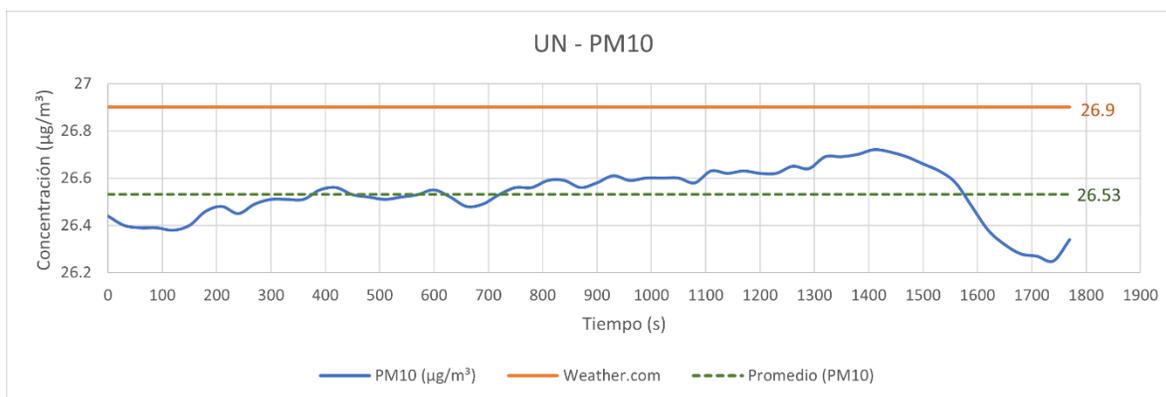
Gráfica 2. Medición de Monóxido de Carbono (CO) Universidad del norte.

En la (gráfica 2), la línea de color azul representa las lecturas de monóxido de carbono obtenidas por el sensor MQ-135 en intervalos de 30 segundo durante un periodo de media hora, Se puede apreciar que las lecturas oscilan entre 81 y 96 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La línea interlineada verde es el promedio de dichos datos, dando un resultado de 89.17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, y la línea de color anaranjado es el valor reportado por la estación fija de monitoreo en ese intervalo de tiempo, que corresponde a 89.86 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, con lo que nos podemos dar cuenta de que los datos obtenidos estuvieron bastante cercanos a los datos publicados por la estación de monitoreo de la Universidad del Norte.



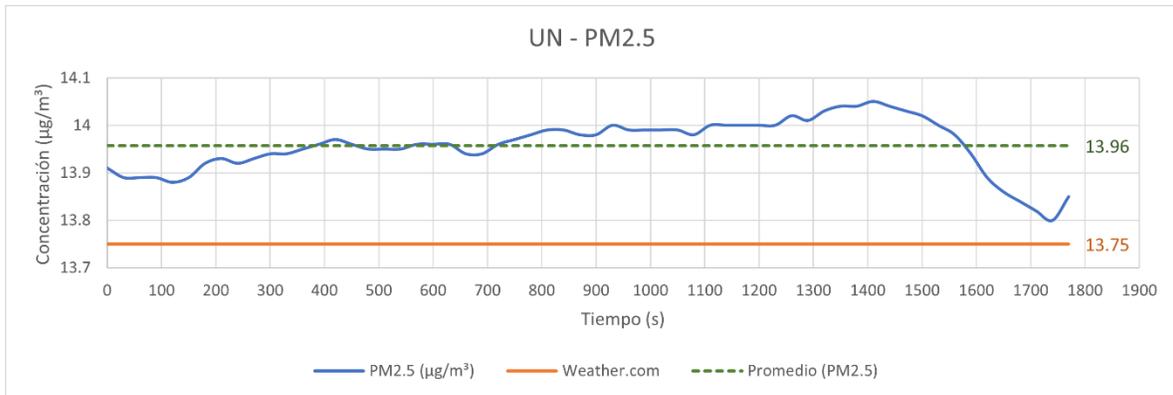
Gráfica 3. Medición de Ozono (O_3) Universidad del norte.

En la (gráfica 3), la línea de color azul representa las lecturas de ozono obtenidas por el sensor MQ-131 en intervalos de 30 segundo durante un periodo de media hora, Se puede apreciar que las lecturas oscilan entre 17 y 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La línea interlineada verde representa un valor de 21.15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, siendo este el promedio de los datos obtenidos y la línea de color anaranjado es el valor reportado por la estación fija de monitoreo en ese intervalo de tiempo, que corresponde a 21.33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, con lo que nos podemos dar cuenta de que los datos obtenidos estuvieron bastante cercanos a los datos publicados por la estación de monitoreo de la Universidad del Norte.



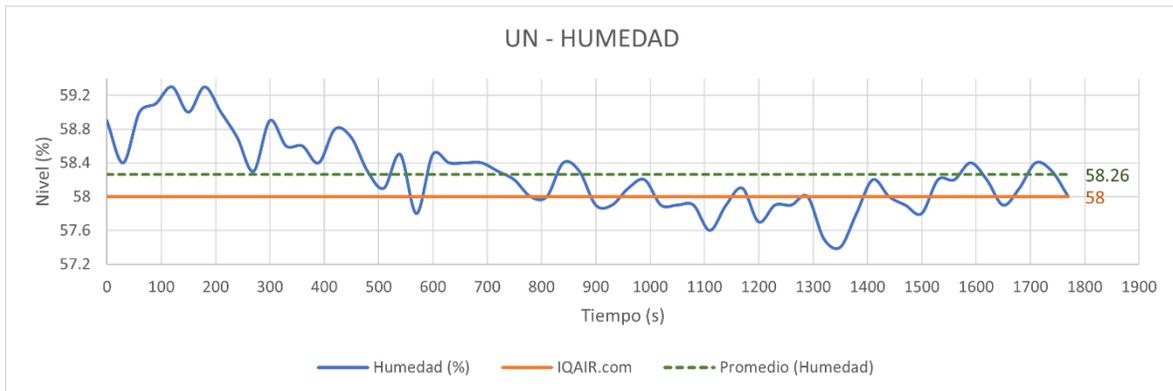
Gráfica 4. Medición de Materia Particulada PM10 Universidad del norte.

En la (gráfica 4), la línea de color azul representa las lecturas de materia particulada PM10 obtenidas por el sensor SPS30 en intervalos de 30 segundo durante un periodo de media hora, Se puede apreciar que las lecturas oscilan entre 26.3 y 26.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La línea interlineada verde representa un valor de 26.53 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, siendo este el promedio de los datos obtenidos y la línea de color anaranjado es el valor reportado por la estación fija de monitoreo en ese intervalo de tiempo, que corresponde a 26.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, con lo que nos podemos dar cuenta de que los datos obtenidos estuvieron bastante cercanos a los datos publicados por la estación de monitoreo de la Universidad del Norte.



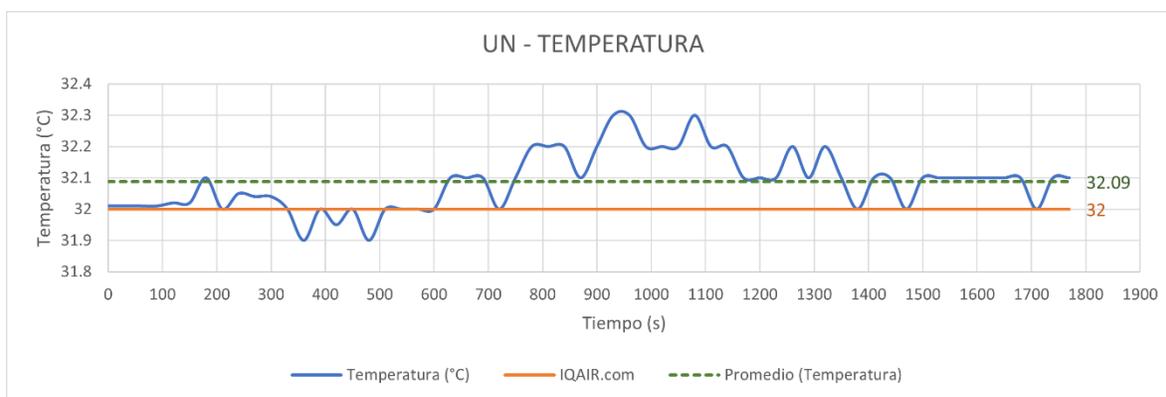
Gráfica 5. Medición de Materia Particulada PM2.5 Universidad del norte.

En la (gráfica 5), la línea de color azul representa las lecturas de materia particulada PM2.5 obtenidas por el sensor SPS30 en intervalos de 30 segundo durante un periodo de media hora, Se puede apreciar que las lecturas oscilan entre 13.8 y 14.05 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La línea interlineada verde representa un valor de 13.96 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, siendo este el promedio de los datos obtenidos y la línea de color anaranjado es el valor reportado por la estación fija de monitoreo en ese intervalo de tiempo, que corresponde a 13.75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, con lo que nos podemos dar cuenta de que los datos obtenidos estuvieron bastante cercanos a los datos publicados por la estación de monitoreo de la Universidad del Norte.



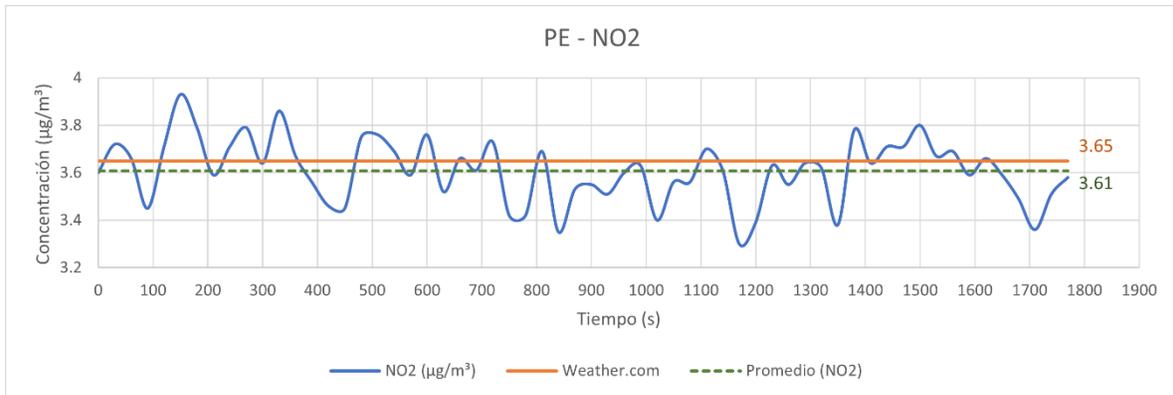
Gráfica 6. Medición de Humedad Universidad del norte.

En la (gráfica 6), la línea de color azul representa las lecturas de humedad obtenidas por el sensor DHT22 en intervalos de 30 segundo durante un periodo de media hora, Se puede apreciar que las lecturas oscilan entre 57.25 y 59.25%. La línea interlineada verde representa un valor de 58.26%, siendo este el promedio de los datos obtenidos y la línea de color anaranjado es el valor reportado por la estación fija de monitoreo en ese intervalo de tiempo, que corresponde a 58%, con lo que nos podemos dar cuenta de que los datos obtenidos estuvieron bastante cercanos a los datos publicados por la estación de monitoreo de la Universidad del Norte.



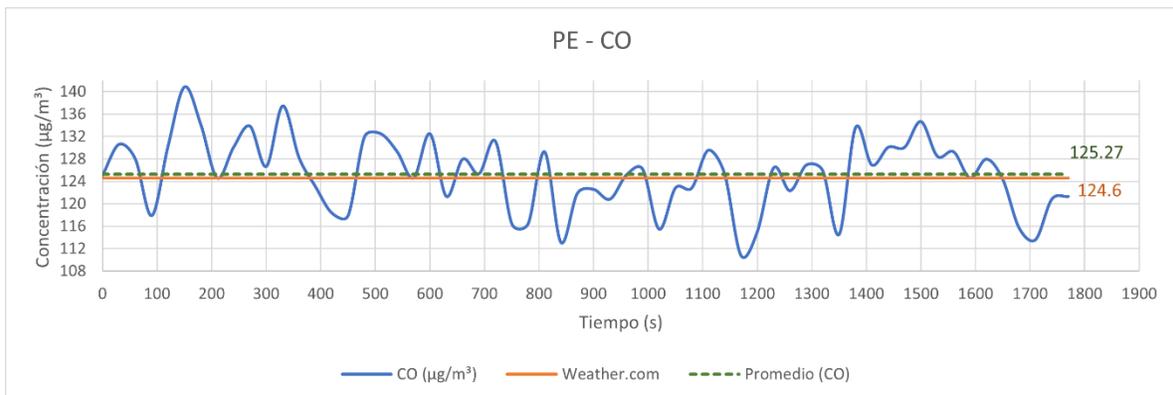
Gráfica 7. Medición de Temperatura *Universidad del norte*.

En la (gráfica 7), la línea de color azul representa las lecturas de temperatura obtenidas por el sensor DHT22 en intervalos de 30 segundo durante un periodo de media hora, Se puede apreciar que las lecturas oscilan entre 31.9 y 32.3 °C. La línea interlineada verde representa un valor de 58.26 °C, siendo este el promedio de los datos obtenidos y la línea de color anaranjado es el valor reportado por la estación fija de monitoreo en ese intervalo de tiempo, que corresponde a 58 °C, con lo que nos podemos dar cuenta de que los datos obtenidos estuvieron bastante cercanos a los datos publicados por la estación de monitoreo de la Universidad del Norte.



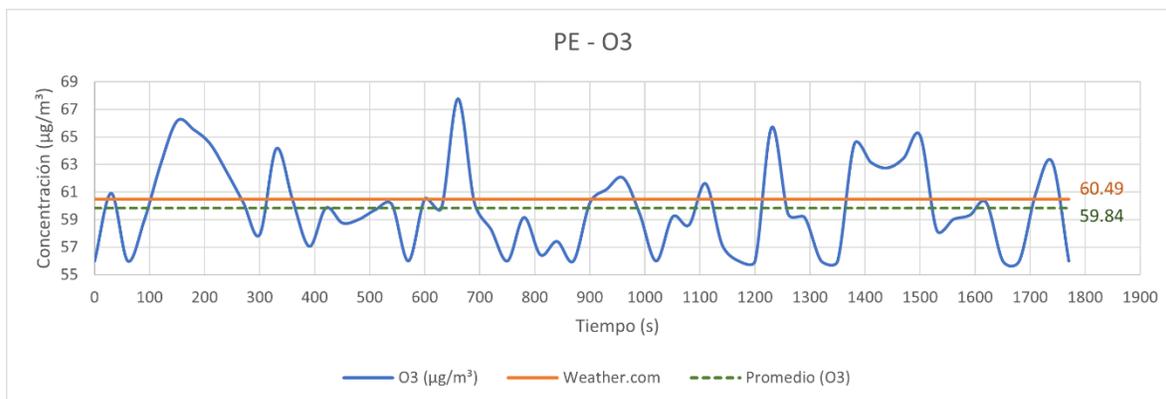
Gráfica 8. Medición de Dióxido de Nitrógeno (NO_2) parque de la Electrificadora.

En la (gráfica 8), la línea de color azul representa las lecturas de dióxido de nitrógeno obtenidas por el sensor MiCS4514 en intervalos de 30 segundo durante un tiempo de media hora, esta vez en la segunda localización. Se puede apreciar las lecturas oscilan entre 3.3 y 3.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La línea interlineada verde es el promedio de dichos datos, dando un resultado de 3.61 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, y la línea de color anaranjado es el valor reportado por la estación fija de monitoreo en ese intervalo de tiempo, que corresponde a 3.65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, con lo que nos podemos dar cuenta de que los datos obtenidos estuvieron bastante cercanos a los datos publicados por la estación de monitoreo del parque de la electrificadora.



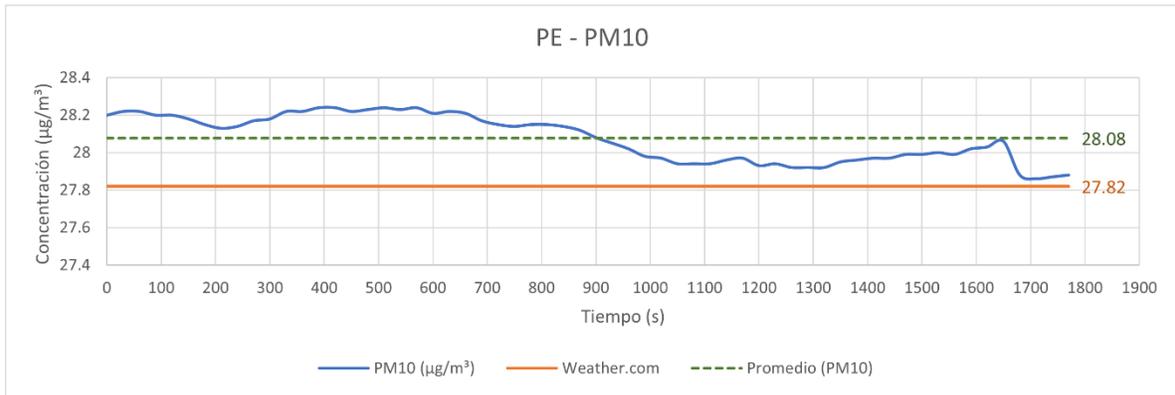
Gráfica 9. Medición de Monóxido de Carbono (CO) parque de la Electrificadora.

En la (gráfica 9), la línea de color azul representa las lecturas de monóxido de carbono obtenidas por el sensor MQ-135 en intervalos de 30 segundo durante un periodo de media hora en la segunda ubicación de toma de parámetros. Se puede apreciar que las lecturas oscilan entre 110 y 140 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La línea interlineada verde es el promedio de dichos datos, dando un resultado de 125.27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, y la línea de color anaranjado es el valor reportado por la estación fija de monitoreo en ese intervalo de tiempo, que corresponde a 124.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, con lo que nos podemos dar cuenta de que los datos obtenidos estuvieron bastante cercanos a los datos publicados por la estación de monitoreo del parque de la electrificadora.



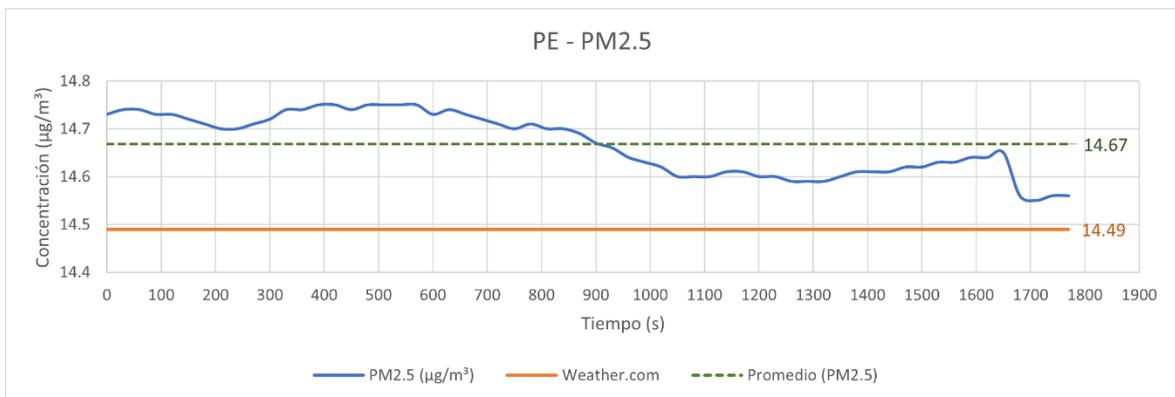
Gráfica 10. Medición de Ozono (O_3) parque de la Electrificadora.

En la (gráfica 10), la línea de color azul representa las lecturas de ozono obtenidas por el sensor MQ-131 en intervalos de 30 segundo durante un periodo de media hora en la segunda ubicación de toma de parámetros. Se puede apreciar que las lecturas oscilan entre 56 y 67 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La línea interlineada verde representa un valor de 59.84 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, siendo este el promedio de los datos obtenidos y la línea de color anaranjado es el valor reportado por la estación fija de monitoreo en ese intervalo de tiempo, que corresponde a 60.49 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, con lo que nos podemos dar cuenta de que los datos obtenidos estuvieron bastante cercanos a los datos publicados por la estación de monitoreo del parque de la electrificadora.



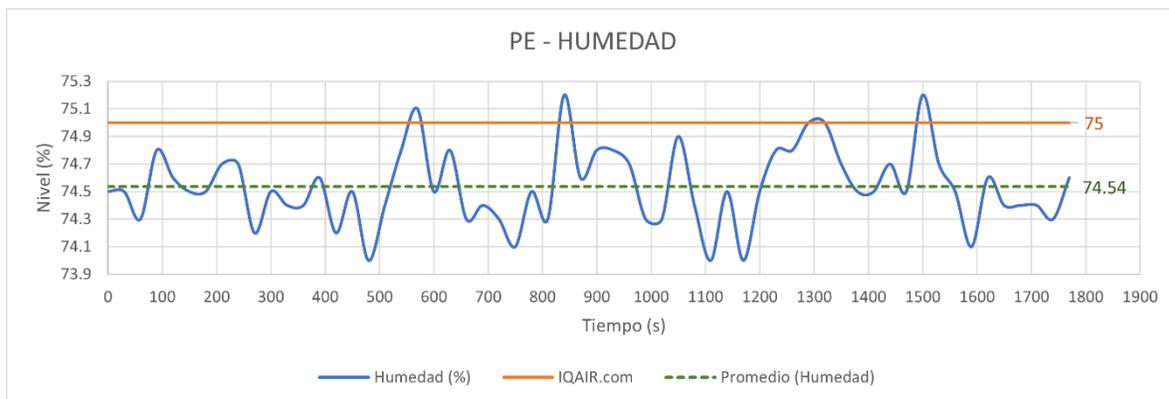
Gráfica 11. Medición de Materia Particulada PM10 parque de la Electrificadora.

En la (gráfica 11), la línea de color azul representa las lecturas de materia particulada PM10 obtenidas por el sensor SPS30 en intervalos de 30 segundos durante un periodo de media hora en la segunda ubicación de toma de parámetros. Se puede apreciar que las lecturas oscilan entre 27.9 y 28.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La línea interlineada verde representa un valor de 28.08 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, siendo este el promedio de los datos obtenidos y la línea de color anaranjado es el valor reportado por la estación fija de monitoreo en ese intervalo de tiempo, que corresponde a 27.82 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, con lo que nos podemos dar cuenta de que los datos obtenidos estuvieron bastante cercanos a los datos publicados por la estación de monitoreo del parque de la electrificadora.



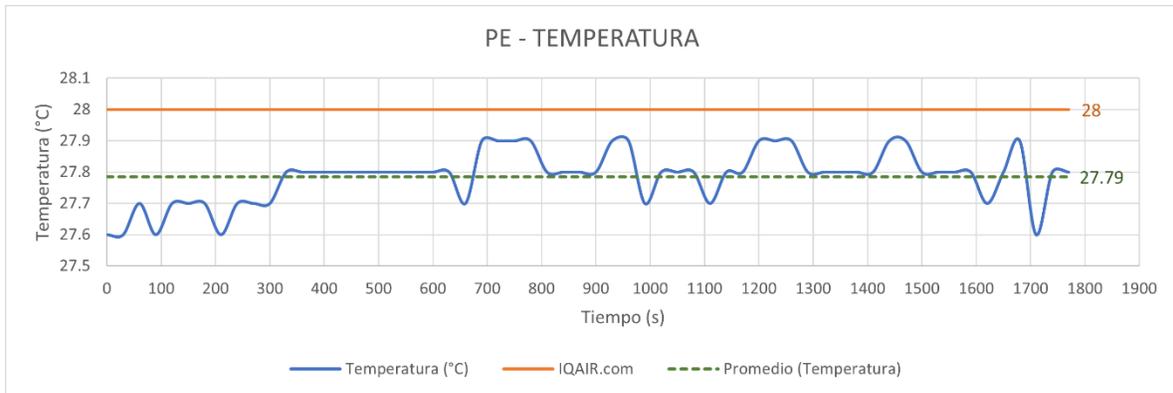
Gráfica 12. Medición de Materia Particulada PM2.5 parque de la Electrificadora.

En la (gráfica 12), la línea de color azul representa las lecturas de materia particulada PM2.5 obtenidas por el sensor SPS30 en intervalos de 30 segundo durante un periodo de media hora en la segunda ubicación de toma de parámetros. Se puede apreciar que las lecturas oscilan entre 14.55 y 14.75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La línea interlineada verde representa un valor de 14.67 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, siendo este el promedio de los datos obtenidos y la línea de color anaranjado es el valor reportado por la estación fija de monitoreo en ese intervalo de tiempo, que corresponde a 14.49 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, con lo que nos podemos dar cuenta de que los datos obtenidos estuvieron bastante cercanos a los datos publicados por la estación de monitoreo del parque de la electrificadora.



Gráfica 13. Medición de Humedad parque de la Electrificadora.

En la (gráfica 13), la línea de color azul representa las lecturas de humedad obtenidas por el sensor DHT22 en intervalos de 30 segundo durante un periodo de media hora en la segunda ubicación de toma de parámetros. Se puede apreciar que las lecturas oscilan entre 74 y 75.2%. La línea interlineada verde representa un valor de 74.54%, siendo este el promedio de los datos obtenidos y la línea de color anaranjado es el valor reportado por la estación fija de monitoreo en ese intervalo de tiempo, que corresponde a 75%, con lo que nos podemos dar cuenta de que los datos obtenidos estuvieron bastante cercanos a los datos publicados por la estación de monitoreo del parque de la electrificadora.



Gráfica 14. Medición de Temperatura parque de la Electrificadora.

En la (gráfica 14), la línea de color azul representa las lecturas de temperatura obtenidas por el sensor DHT22 en intervalos de 30 segundo durante un periodo de media hora en la segunda ubicación de toma de parámetros. Se puede apreciar que las lecturas oscilan entre 27.6 y 27.9 °C. La línea interlineada verde representa un valor de 27.79 °C, siendo este el promedio de los datos obtenidos y la línea de color anaranjado es el valor reportado por la estación fija de monitoreo en ese intervalo de tiempo, que corresponde a 28 °C, con lo que nos podemos dar cuenta de que los datos obtenidos estuvieron bastante cercanos a los datos publicados por la estación de monitoreo del parque de la electrificadora.

En las gráficas (1-14) podemos observar los valores de las lecturas realizadas por los sensores para cada contaminante atmosférico en la Universidad del Norte y el parque de la Electrificadora. Podemos apreciar que en cada grafica se encuentran representados 3 valores diferentes siendo, la línea azul el valor de las lecturas realizadas por cada sensor durante 30 minutos, la línea naranja siendo el valor publicado por la estación de monitoreo la Universidad del Norte o del parque de la electrificadora, respectivamente y la línea interlineada verde el promedio de las mediciones que se realizaron durante 30 minutos.

El dispositivo para la calidad del aire Q-air realiza lecturas de la calidad del aire cada 30 segundos, sin embargo, estos valores no podían ser comparados con las lecturas

mostradas por las estaciones de monitoreo de la ciudad, debido a que estas publican una lectura cada 30 minutos, por esto, fue necesario realizar un promedio de todas las lecturas obtenidas durante los 30 minutos que el dispositivo estuvo activo, para poder realizar la comparación con el valor publicado por la estación de calidad del aire.

Para evaluarla la veracidad de las lecturas producidas por cada sensor de Q-air, se realizó la tabla (25) y la tabla (26), las cuales muestran el margen de error de cada sensor a partir de la comparación del valor del promedio con el publicado en las páginas de las estaciones de monitoreo.

Variable	Promedio de lecturas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	lectura de referencia ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	porcentaje de error (%)
Temperatura	32,09	32	0,281
Humedad	58,26	58	0,448
NO ₂	4,96	5,02	1,195
O ₃	21,15	21,33	0,844
CO	89,17	89,86	0,768
PM2.5	13,96	13,75	1,527
PM10	26,53	26,9	1,375

Tabla 25. Medición de porcentaje de error Universidad del Norte.

Variable	Promedio de lecturas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	lectura de referencia ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	porcentaje de error (%)
Temperatura	27,79	28	0,750
Humedad	74,54	75	0,613
NO ₂	3,61	3,65	1,096
O ₃	59,84	60,49	1,075
CO	125,27	124,6	0,538
PM2.5	14,67	14,49	1,242
PM10	28,08	27,82	0,935

Tabla 26. Medición de porcentaje de error parque de la Electrificadora.

En las tablas 25 y 26, podemos apreciar como los márgenes de error de cada sensor son bastante bajos, apreciando el mayor margen de error en ambas mediciones es de 1.527%, estando un 3.5% por debajo del del porcentaje de error máximo permisible. Luego de analizar las tablas de los márgenes de error de ambas ubicaciones, podemos concluir que los valores de las lecturas realizadas por Q-air son correctas, ayudándonos a demostrar la efectividad del dispositivo, debido a que a pesar de ser probado en diferentes ubicaciones y con diferentes condiciones ambientales, muestra márgenes de error muy bajos, y al realizar la comparación de cada margen de error en las dos ubicaciones diferentes, estos tienen valores similares.

Según los parámetros de clasificación definidos en la resolución 2254 del 2017, como se observó anteriormente en la tabla 22, los niveles de concentración de gases contaminantes son categorizados en 6 niveles, dichos niveles son representados por colores según qué tan perjudicial sea, donde el color verde representa un estado “Bueno”, el amarillo un estado “Aceptable”, el color naranja un estado “Dañino para la salud de grupos sensibles”, el color rojo un estado “Dañino para la salud”, el color morado un estado “muy dañino para la salud” y por último, el color marrón, que representa un estado “Peligroso”.

En los promedios de lecturas obtenidos en la Universidad del Norte , las concentraciones de 4 de los 5 contaminantes medidos se encuentran dentro del rango de 0 - 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, este rango es representado por el color verde, el cual corresponde a un estado “Bueno”, el contaminante faltante (CO) se encuentra en la categoría de color amarillo, por estar dentro del rango de 51 - 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, y representa un estado “Aceptable”.

Por otro lado, en los promedios de lectura obtenidos en el parque la electricadora, las concentraciones de NO_2 , $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10} se encuentran en niveles menores a 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, lo que los posiciona en un nivel de concentración “Bueno”, según lo establecido por la resolución 2254 del 2017, el nivel de O_3 fue de 59.84 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, lo cual lo clasifica en un estado “Aceptable”, y por último, la concentración promedio

del CO fue de $125.27 \mu\text{g}/\text{m}^3$, la cual entra en estado de “Dañino para la salud de grupos sensibles”, representada por el color naranja.

Tras esta clasificación, se puede apreciar gran parte de los contaminantes monitoreados en los puntos de toma de datos, se encontraban en un rango de concentración “Buena”, significando que no eran perjudiciales para ningún tipo de población, y tan solo un tipo de contaminante (CO), se encontraba en un rango “Aceptable” en ambos puntos, pudiendo generar posibles síntomas respiratorios a grupos sensibles de la población.

8.11. VISUALIZACIÓN DE DATOS AL SERVIDOR WEB BLYNK

Una vez las lecturas son tomadas por cada uno de los sensores, los valores son procesados por el microcontrolador ESP32, después, el microcontrolador utiliza el módulo SIM800L para conectarse a la red móvil. Donde posteriormente mediante el ID único asignado al dispositivo, este establece una conexión, los datos de las lecturas realizadas por los sensores de Q-air se envían al servidor en tiempo real utilizando el protocolo MQTT. Esto permite que los datos se envíen de manera eficiente y se visualicen en tiempo real en el servidor. Además, el servidor Blynk ofrece una plataforma de desarrollo de aplicaciones móviles y web que permite personalizar y controlar los datos de los sensores a través de una interfaz gráfica fácil de usar. Lo que facilita la monitorización y el control de los datos de los sensores a través de una interfaz gráfica intuitiva.

Q-Air realiza tomas de datos cada 30 segundos, estas lecturas son agrupadas en grupos de 4 y posteriormente promediadas, dicho promedio es publicado cada 2 minutos en el servidor Blynk. Estos valores se sobrescriben en la esta interfaz, de forma que el usuario visualizará el ultimo valor publicado.

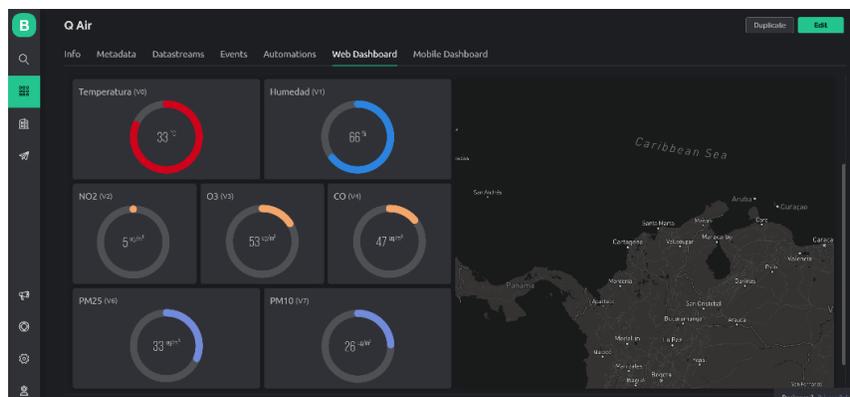


Figura 34. Visualización de las mediciones promediado en Blynk (Autoría Propia).

En la (figura 34), se puede observar la interfaz diseñada en el software Blynk, la cual nos muestra los niveles de $\mu\text{g}/\text{m}^3$ medidos por el dispositivo Q-air, de igual forma, esta interfaz nos muestra la ubicación del dispositivo. Esta también diseñada para enviar notificaciones de alerta a los usuarios cada vez que el valor de la concentración de un contaminante supere su valor permisible, estas alertas utilizan las escalas colores establecidas por el ICA.

Para poder visualizar los valores medidos por el dispositivo Q-air en esta interfaz, es necesario ingresar en la página web o la aplicación móvil de Blynk, dar clic en la pestaña dispositivo y luego a la pestaña web dashboard, aquí podrá ver los datos publicados y personalizar la manera en que se desea visualizarlos.

8.12. MANUAL DE USUARIOS

Se realizó un manual de usuarios para el dispositivo Q-Air, con el propósito que los usuarios que contengan el dispositivo reciban la información correspondiente, así como detalles cruciales sobre cómo operarlo y mantenerlo. Este manual puede contener instrucciones sobre cómo configurar el dispositivo, los niveles correspondientes del índice de la calidad del aire, cómo analizar los resultados y cómo solucionar problemas típicos. También incluye detalles críticos sobre correcto uso del dispositivo y medidas de seguridad a tener en cuenta para garantizar un funcionamiento adecuado. En la figura 32 se detalla la portada de este manual.



Figura 35. Manual de usuario Q-Air (Autoría Propia).

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El objetivo de este trabajo fue desarrollar un dispositivo compacto y portable capaz de medir y monitorear características ambientales y los principales compuestos contaminantes nocivos para la salud presentes en el aire. Esto con la finalidad de permitirle a los usuarios del dispositivo conocer la calidad de aire que está inhalando y notificarle en caso de que haya altas concentraciones de compuestos que puedan atender con su salud.

Para ello fue necesario identificar los contaminantes del aire más comunes a nivel mundial y una serie de sensores capaces de medir las concentraciones de dichos compuestos.

Tras la selección y calibración de los componentes se realizaron toma de datos en puntos estratégicos de la ciudad de Barranquilla, estas localizaciones se encontraban a menos de 20m de las estaciones fijas funcionales de la ciudad.

Se realizaron 4 salidas de campo a cada uno de los lugares en los que se tomaron mediciones de las condiciones ambientales cada 30 segundos por periodos de 30 minutos, esto con el fin de compararlos con las mediciones de las estaciones las cuales actualizaban las concentraciones de componentes cada media hora.

El análisis de los datos recopilados en las tablas 1-14 se puede apreciar cómo nuestras mediciones de las concentraciones oscilaban significativamente, para poder tener una comparación más precisa, se promediaron dichos valores tomados por nuestros dispositivos, el resultado de esos promedios se acercó muy cercanas a los datos publicados por las estaciones de monitoreo fijas, los porcentajes de error se encuentran entre 0.2% y 1.5%, lo cual nos indica que las mediciones realizadas tienen una alta precisión y confiabilidad.

Para mejorar el desempeño del dispositivo y prolongar queremos se resaltan las recomendaciones. Reemplazar los sensores MQ131 y MQ1335 por otros sensores más desarrollados y destinados a gases específicos, la familia de sensores MQ a pesar de realizar una toma de medidas con un margen de error muy bajo y

garantizar una estabilidad durante tiempo en medición, estos tipos de sensores son genéricos y están destinados para la medición de una amplia gama de gases y con el tiempo van perdiendo la sensibilidad para la detección de dichos componentes lo cual puede perjudicar el desempeño del dispositivo a mediano o largo plazo. Por otro lado, se recomienda también cambiar la batería de litio por una con más mAh, esto con el fin de prolongar el tiempo de uso del dispositivo. Por último, consideramos factible actualizar el módulo SIM800L por una versión que soporte redes 3G y 4G, ya que la versión utilizada en este proyecto sólo soporta 2G, esta red es escasamente utilizada y está quedando obsoleta por lo que los proveedores de red están desmontando las antenas que brindan cobertura 2G.

10. BIBLIOGRAFIA

- [1] Minambiente. [En línea]. Available: <https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/contaminacion-atmosferica/#:~:text=La%20contaminaci%C3%B3n%20atmosf%C3%A9rica%20en%20Colombia,y%20de%20los%20desastres%20naturales..>
- [2] OMS. [En línea]. Available: <https://www.who.int/data/gho/data/themes/air-pollution?lang=en>.
- [3] fundacionaquae, «Aquae Fundacion,» [En línea]. Available: <https://www.fundacionaquae.org/wiki/causas-y-tipos-de-la-contaminacion-del-aire/>. [Último acceso: 31 Mayo 2022].
- [4] O. M. d. I. salud, «Organizacion Mundial de la salud,» 22 Septiembre 2021. [En línea]. Available: [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health). [Último acceso: 31 Mayo 2022].
- [5] N. Motlagh y e. a. , «Transit pollution exposure monitoring using low-cost wearable sensors,» vol. 98, 2021.
- [6] S. d. M. Atmosférico, «rowenta,» [En línea]. Available: <http://airepuro.rowenta.com.mx/importancia-de-la-calidad-del-aire-para-las-personas/>. [Último acceso: 24 Agosto 2022].
- [7] O. p. d. I. salud, «OPS,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.paho.org/es/temas/calidad-aire-salud/contaminacion-aire-ambiental-externo-vivienda-preguntas-frecuentes#:~:text=La%20exposici%C3%B3n%20a%20altos%20niveles,cebrebrovasculares%20y%20c%C3%A1ncer%20de%20pulm%C3%B3n..> [Último acceso: 24 Agosto 2022].
- [8] IDEAM, «IDEAM,» [En línea]. Available: <http://www.ideam.gov.co/web/contaminacion-y-calidad-ambiental/calidad-del-aire>. [Último acceso: 24 Agosto 2022].
- [9] EPA, 2019. [En línea]. Available: <https://espanol.epa.gov/espanol/efectos-del-material-particulado-pm-sobre-la-salud-y-el-medioambiente>. [Último acceso: 31 Mayo 2022].

- [10] T. Surya Gunawan, Y. M. Saiful Munir, M. Kartiwi y H. Mansor, «Design and Implementation of Portable Outdoor Air Quality,» *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 2018.
- [11] Y. Zhuang, F. Lin, E. H. Yoo y W. Xu, «AirSense: A Portable Context-sensing Device for Personal,» *ACM DIGITAL LIBRARY*, 2015.
- [12] P. B. F. M. M. A.-F. S. S. H. Chojer, «Development of low-cost indoor air quality monitoring devices,» *sciencedirect*, 2020.
- [13] e. d. q. e. s. d. a. c. d. p. l. s. d. gas, «A Cost-Effective Wireless Sensor Network System for Indoor Air,» *ScienceDirect*, 2014.
- [14] I. E. F. A. M. P. G. C. S. N. L. D. S. Zampolli, «An electronic nose based on solid state sensor arrays for low-cost indoor air quality monitoring applications,» *ScienceDirect*, 2004.
- [15] K. Pranvera , H. M. Nasser, M. A. Zaidan, P. L. Fung, S. Varjonen, A. Robeiro-Hargrave, J. V. Niemi, P. Nurmi, T. Hussein, T. Petaja, M. Kulmala y S. Torkama, «Air pollution exposure monitoring using portable low-cost air quality sensors,» vol. 23, pp. 1-12, 2021.
- [16] D. Suriano, «A portable air quality monitoring unit and a modular, flexible tool for On-field evaluation and calibration of low-cost gas sensors,» vol. 9, pp. 1-32, 2021.
- [17] I. Demanega, I. Mujan, B. C. Singer, A. S. Andekovic, F. Babich y D. Licina, «Performance assessment of low-cost environmental monitors and single sensors under variable indoor air quality and thermal conditions,» vol. 187, pp. 1-14, 2021.
- [18] Y. Yamada Maruo y J. Nakurama, «Portable formaldehyde monitoring device using porous glass sensor and its applications in indoor air quality studies,» vol. 702, pp. 1-7, 2011.
- [19] A. Samad y U. Vogt, «Mobile air quality measurements using bicycle to obtain spatial distribution and high temporal resolution in and around the city center of Stuttgart,» vol. 244, pp. 1-9, 2021.
- [20] OPS, «OPS,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.paho.org/es/temas/calidad-aire-salud/contaminacion-aire-ambiental-externo-vivienda-preguntas-frecuentes#:~:text=La%20contaminaci%C3%B3n%20del%20aire%20puede,impactos%20adversos%20en%20la%20salud..> [Último acceso: 22 Mayo 2022].

- [21] responsabilidadsocial, «responsabilidadsocial,» [En línea]. Available: <https://responsabilidadsocial.net/contaminacion-del-aire-que-es-causas-consecuencias-soluciones-y-ejemplos/>. [Último acceso: 21 Octubre 2022].
- [22] A. S. o. Heating, «ASHRAE,» 2002. [En línea]. Available: <https://www.ashrae.org/>. [Último acceso: 5 Mayo 2022].
- [23] G. S. X, «Calidad del aire interior,» de *ENCICLOPEDIA DE SALUD Y SEGURIDAD EN EL TRABAJO*, 1998, p. 44.
- [24] EPA, «EPA,» [En línea]. Available: <https://espanol.epa.gov/cai/acerca-de-los-contaminantes-del-aire-en-interiores-y-sus-fuentes>. [Último acceso: 05 Mayo 2022].
- [25] higieneambiental, «higieneambiental,» 07 Enero 2016. [En línea]. Available: <https://higieneambiental.com/aire-agua-legionela/cuales-son-los-principales-contaminantes-del-aire-interior-en-edificios-y-hogares>. [Último acceso: 05 Mayo 2022].
- [26] O. GUATEMALA, «OPS/OMS GUATEMALA,» 2 Noviembre 2018. [En línea]. Available: <https://www.paho.org/es/guatemala>. [Último acceso: 21 Octubre 2022].
- [27] ideam. [En línea]. Available: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/generalidades-del-ozono>. [Último acceso: 22 Mayo 2022].
- [28] senamhi, «senamhi,» 11 Diciembre 2017. [En línea]. Available: <https://www.senamhi.gob.pe/?p=pronostico-meteorologico>. [Último acceso: 21 Octubre 2022].
- [29] EPA, «EPA (Agencia de proteccion ambiental de estados unidos),» [En línea]. Available: <https://espanol.epa.gov/espanol/conceptos-basicos-sobre-el-material-particulado-pm-por-sus-siglas-en-ingles>. [Último acceso: 22 Mayo 2022].
- [30] M. Salud, «Madrid Salud,» 15 Diciembre 2022. [En línea]. Available: <https://madridsalud.es/dioxido-de-nitrogeno-y-salud/>. [Último acceso: 23 Febrero 2013].
- [31] eitmedia, «eitmedia,» 21 Octubre 2018. [En línea]. Available: <https://eitmedia.mx/index.php/local/item/26375-revisan-cumplimiento-de-estaciones-de-monitoreo-del-aire-en-nl>. [Último acceso: 23 Febrero 2023].

- [32] sintoxicos, «sintoxicos,» 27 Febrero 2023. [En línea]. Available: <https://www.sintoxicos.info/medidor-calidad-aire/>. [Último acceso: 23 Febrero 2023].
- [33] oracle, «oracle,» [En línea]. Available: <https://www.oracle.com/mx/internet-of-things/what-is-iot/>. [Último acceso: 21 Octubre 2022].
- [34] soelectroshop, «soelectroshop,» 1 Abril 2022. [En línea]. Available: <https://soelectroshop.com/es/blog/que-es-mqtt-el-protocolo-de-comunicacion-para-iot-n117>. [Último acceso: 21 Octubre 2022].
- [35] suconel, «sucsonel,» [En línea]. Available: <https://sucsonel.com/product/tarjeta-de-desarrollo-con-wifi-bluetooth-esp32/>. [Último acceso: 21 Octubre 2022].
- [36] L. Llamas, «luisllamas,» 21 Octubre 2016. [En línea]. Available: <https://www.luisllamas.es/arduino-detector-gas-mq/>. [Último acceso: 05 Mayo 2022].
- [37] uelectronics, «uelectronics,» [En línea]. Available: <https://uelectronics.com/producto/mq-135-modulo-detector-de-calidad-de-aire/>. [Último acceso: 21 Octubre 2022].
- [38] electronicaplugandplay, «electronicaplugandplay,» [En línea]. Available: <https://www.electronicaplugandplay.com/sensores-y-transductores/product/833-module-mq-131-ozone>. [Último acceso: 21 Octubre 2022].
- [39] J. ryan, «hackster,» 29 Diciembre 2018. [En línea]. Available: <https://www.hackster.io/rpj/atmospheric-particulate-matter-environmental-sensing-fb31a1>. [Último acceso: 21 Octubre 2022].
- [40] L. LLAMAS, 27 Septiembre 2016. [En línea]. Available: <https://www.luisllamas.es/localizacion-gps-con-arduino-y-los-modulos-gps-neo-6/#:~:text=El%20GPS%20NEO%2D6%20tiene,un%20sistema%20de%20posicionamiento%20GPS..> [Último acceso: 23 Febrero 2023].
- [41] descubrearduino. [En línea]. Available: <https://descubrearduino.com/sim800l-gsm/>. [Último acceso: 23 Febrero 2023].
- [42] Isaac, «Hardware,» 6 Septiembre 2021. [En línea]. Available: <https://www.hwlibre.com/tp4056/>. [Último acceso: 23 Febrero 2023].

- [43] naylampmechatronics, «naylampmechatronics,» [En línea]. Available: <https://naylampmechatronics.com/sensores-temperatura-y-humedad/58-sensor-de-temperatura-y-humedad-relativa-dht22-am2302.html>. [Último acceso: 21 Octubre 2022].
- [44] Eduardo, «Vermabaterias,» [En línea]. Available: <https://vermabaterias.com/baterias-lipo-que-son/>. [Último acceso: 24 Febrero 2023].
- [45] M. D. A. Y. D. SOSTENIBLE, «ideam,» 1 Noviembre 2017. [En línea]. Available: <http://www.ideam.gov.co/documents/51310/527391/2.+Resoluci%C3%B3n+2254+de+2017+++Niveles+Calidad+del+Aire..pdf/c22a285e-058e-42b6-aa88-2745fafad39f>. [Último acceso: 23 Febrero 2023].
- [46] breeze, «breeze,» 4 Febrero 2022. [En línea]. Available: <https://www.breezetechnologies.de/blog/nitrogen-monoxide-no/>. [Último acceso: 23 Febrero 2023].
- [47] saludgeoambiental, «saludgeoambiental,» [En línea]. Available: <https://www.saludgeoambiental.org/dioxido-carbono-co2/>. [Último acceso: 23 Febrero 2023].