

Diseño De Una Estación De Monitoreo De Variables Medioambientales Y Material
Particulado De Bajo Costo

Jair Fernando Trujillo Sanguino, Elian Calderón Quintero y Andrés Francisco Rojas
Sánchez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero electrónico

Director

Julián Gustavo Rodríguez Ferreira

Doctor en Física, especialidad Astrofísica

Codirector

Jaime Guillermo Barrero Pérez

Magister en Potencia Eléctrica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Físico-Mecánica

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Ingeniería Electrónica

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

Dedico este proyecto con profundo agradecimiento a Dios, quien ha sido nuestra guía y fortaleza a lo largo de esta importante etapa de nuestras vidas.

A mis padres, quienes han sido mi fuente constante de inspiración y apoyo, siempre alentándome a superar obstáculos y nunca rendirme. A mis queridos compañeros, cuya dedicación y trabajo en equipo han hecho posible este logro.

A Dayana, por su apoyo incondicional y sus palabras de aliento en los momentos más desafiantes. También quiero expresar mi gratitud a todos mis compañeros de clase, cuya compañía y colaboración han enriquecido mi experiencia académica. Este proyecto es el resultado de un esfuerzo colectivo y del amor y apoyo de quienes me rodean. ¡Gracias por ser parte de este logro!

Elian Calderón Quintero

Con humildad y agradecimiento en mi corazón, quiero dedicar mi trabajo de grado a las personas que han sido mi constante fuente de inspiración.

A Dios por permitirme estar con vida para poder disfrutar la culminación de los estudios de pregrado en la universidad que ha sido una guía espiritual y fortaleza frente a situaciones de gran complejidad en la cual me ha brindado los caminos correctos.

A mi familia, en especial a mi madre Yadira Sanchez, mi padre Expedito Rojas y mi hermano Ricardo Rojas, quienes me inculcaron amor por el aprendizaje y la perseverancia; como la paciencia durante todo el tiempo en la universidad, les dedico este trabajo. Sus sacrificios y esfuerzos han sido la base de mi educación, y sé que esta dedicación es un testimonio de su amor y compromiso.

A mis amigos, que me alentaron y me recordaron que el equilibrio entre el trabajo y el disfrute es esencial, les dedico este trabajo. Su amistad ha sido un faro de luz en los momentos más desafiantes.

A mis compañeros de trabajo de grado, Jair y Elian por su paciencia durante la ejecución del trabajo de grado, en la cual pudimos llegar a un acuerdo de manera profesional para la solución de los problemas presentados durante el desarrollo.

Andrés Francisco Rojas Sanchez

Dedicado principalmente a mi madre por haber luchado día a día por mi bienestar y formación como persona, por todo el apoyo que me ha dado para poder cumplir cada uno de mis sueños y proyectos personales.

A la familia Pinzón Moreno que desde siempre me han tratado como a un hijo más a pesar de no serlo, a ata por cada uno de los consejos de vida que me ha dado y que considero como una madre en mi vida, a rey que me ha tratado como un hijo más y a los hijos de ellos que me han apoyado siempre.

A la familia Gutiérrez Fuentes que me acogieron en momentos difíciles y me han apoyado y tratado como un hijo y siempre serán parte de mi vida.

Al grupo de robótica C.R.A.P.S que desde muy niño me enseñó lo que era la electrónica, la pasión por esta carrera y las competencias aprendidas durante su proceso.

A todos mis compañeros que he conocido durante el proceso académico de la universidad que han aportado algo significativo a mi formación.

Por último, a mis dos grandes amigas Angie y Karen que siempre creyeron en mí y me brindaron el apoyo necesario para poder lograr las metas que tengo y al Diego amigo de toda la vida y apoyo incondicional siempre que lo necesito.

Jair Fernando Trujillo Sanguino

Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad Industrial de Santander por brindarnos un valioso espacio académico. Agradecemos especialmente a nuestros dedicados docentes por su apoyo, confianza, sabiduría y experiencia. Su influencia fue fundamental para culminar con éxito esta fase académica que nos enorgullece.

Estamos felices por haber completado esta etapa y emocionados por la nueva aventura que se avecina. Gracias a nuestra universidad y a nuestros profesores por ser parte esencial de nuestro crecimiento y desarrollo.

Elían, Jair y Andrés

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	20
1. Objetivos	23
1.1. Objetivo General	23
1.2. Objetivos Específicos.....	23
2. Marco Conceptual	24
3. Introducción a las Variables Atmosféricas	24
3.1. Importancia de las Variables Atmosféricas y su Relación con la Salud.....	26
3.2. ¿Qué es una Estación Meteorológica?	29
4. Ciencia Ciudadana en Proyectos de Monitoreo Ambiental	30
4.1. Proyectos a Nivel Mundial.....	31
4.1.1. Air Quality Egg.....	31
4.1.2. Citizen Weather Observing Program (CWOP).....	31
4.1.3. Programa Mundial de Investigaciones Climáticas (PMIC o WCRP).....	32
4.2. Proyectos a Nivel Nacional.....	32
4.2.1. Observatorio Ambiental de Bogotá	32
4.2.2. SIATA (Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburra).....	32
4.3. Proyectos a Nivel Local	33
4.3.1. Sistema de vigilancia de Calidad del Aire (CDBM).....	33
4.3.2. Racimo	33
5. Descripción de las Variables Ambientales	34
5.1. Temperatura	34

5.1.1. Tipos de Temperatura	34
5.1.2. Métodos de Medición	35
5.1.3. Rangos de Alerta.....	36
5.2. Humedad	37
5.2.1. Tipos de Humedad	37
5.2.2. Métodos de Medición	38
5.2.3. Rangos de Alerta.....	38
5.3. Radiación Solar	39
5.3.1. Tipos de Radiación Solar	39
5.3.2. Métodos de Medición	40
5.3.3. Rangos de Alerta.....	40
5.4. Dióxido de Carbono (CO ₂).....	41
5.4.1. Métodos de Medición	41
5.4.2. Rangos de Alerta.....	42
5.5. Material Particulado.....	42
5.5.1. Tamaño de las Partículas	43
5.5.2. Métodos de Medición	43
5.5.3. Rangos de Alerta.....	44
6. Proceso de Diseño.....	46
6.1. Requerimientos del Sistema.....	46
6.1.1. Requerimientos de Costo	46
6.1.2. Restricción del Hardware.....	47
6.1.3. Restricciones del Software.....	47

6.1.4. Restricciones Estructurales	47
6.2. Arquitectura General del Sistema	48
6.3. Análisis y Método de Selección de Componentes	49
6.3.1. Estructura General y Aplicación de las Matrices de los Componentes	50
6.3.2. Base de Datos y Elementos Secundarios para la Interacción con el Sistema	55
6.4. Diseño del Circuito Integrado PCB	58
6.4.1. Diseño con Modulo ESP-32 WROOM.....	59
6.5. Diseño Estructural.....	60
6.5.1. Diseño para Interiores	61
6.5.2. Diseño para Exteriores	64
6.6. Diseño del Aplicativo Móvil e Interfaz de la Base de Datos IoT	66
6.6.1. Aplicativo Móvil.....	66
6.6.2. Interfaz de la Base de Datos IoT.....	67
6.7. Diseño Final del Prototipo	69
7. Implementación del Prototipo.....	70
7.1. Implementación del Montaje en Placa de Prueba (PROTOBOARD)	71
7.1.1. Implementación de la Comunicación de los Sensores	71
7.1.2. Implementación de la Comunicación a las Bases de Datos	74
7.1.3. Implementación de la Comunicación con la Pantalla OLED	76
7.1.4. Implementación del Aplicativo Móvil	77
7.2. Implementación en Placa Perforada Universal	77
7.3. Implementación en PCB	80
7.3.1. Implementación del Sistema de Carga de Batería	81

7.3.2. Implementación del Sistema de Regulación del Voltaje	82
7.4. Implementación de Estructura	83
7.4.1. Implementación de la Estructura de Interiores	83
7.4.2. Implementación de la Estructura de Exteriores	85
7.5. Integración General del Sistema	86
8. Calibración de Sensores	88
8.1. Métodos de Calibración	88
8.2. Método de Calibración Usado	89
9. Validaciones.....	93
9.1. Verificación de los Componentes en Funcionamiento	94
9.2. Validación de la Recepción de Datos en Aplicación y la Base de Datos	101
9.3. Validación Estructural	102
10. Costo Total de la Estación	103
11. Conclusiones.....	105
12. Recomendaciones	107
Apéndices.....	117

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Niveles de temperatura</i>	37
Tabla 2. <i>Niveles de Humedad</i>	39
Tabla 3. <i>Niveles de radiación UV</i>	41
Tabla 4. <i>Niveles de dióxido de carbono</i>	42
Tabla 5. <i>Niveles de material Particulado</i>	44
Tabla 6. <i>Niveles de rango de los sensores</i>	45
Tabla 7. <i>Matriz de selección General</i>	50
Tabla 8. <i>Matriz de selección sensor de CO2</i>	51
Tabla 9. <i>Matriz de los sensores de Radiación Solar (UV)</i>	52
Tabla 10. <i>Matriz de los sensores de Temperatura y Humedad</i>	53
Tabla 11. <i>Matriz de los sensores de Material Particulado</i>	54
Tabla 12. <i>Matriz de los microcontroladores</i>	55

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 <i>Estación Meteorológica</i>	29
Figura 2 <i>Termómetro Analógico y Digital</i>	35
Figura 3 <i>Boyas de Deriva y Termómetro de suelo</i>	36
Figura 4 <i>Humedad Relativa y absoluta</i>	38
Figura 5 <i>Arquitectura general</i>	49
Figura 6 <i>Imagen de la pantalla OLED.</i>	56
Figura 7 <i>Subsistema de potencia y subsistema de sensores.</i>	57
Figura 8 <i>Subsistema de comunicación.</i>	58
Figura 9 <i>Diagrama de conexión de todos los elementos a usar.</i>	59
Figura 10 <i>Diseño final con ESP-32 WROOM</i>	60
Figura 11 <i>Diseño CAD de los sensores de material particulado y CO2</i>	61
Figura 12 <i>Diseño final de la ventilación en las paredes de la estación.</i>	62
Figura 13 <i>Vista isométrica del ensamblaje y ubicación de los sensores y la PCB</i>	62
Figura 14 <i>Plano estructura para interiores.</i>	63
Figura 15 <i>Rediseño de la recubierta.</i>	64
Figura 16 <i>Integración final de todos los componentes de la estructura para interiores.</i>	64
Figura 17 <i>Integración de la estación EMA con la recubierta para exteriores.</i>	65
Figura 18 <i>Aplicativo móvil versiones iniciales.</i>	66
Figura 19 <i>Pantalla de INICIO del aplicativo en la versión 2.1.</i>	67
Figura 20 <i>Histórico de las Variables en Adafruit IO</i>	68
Figura 21 <i>Diseño Final del dashboard en Adafruit IO.</i>	69

Figura 22	<i>Vista 3D del diseño final de la placa PCB.</i>	70
Figura 23	<i>Implementación del sensor de CO2 MH-Z1311A</i>	72
Figura 24	<i>Implementación del sensor ZH03B.</i>	73
Figura 25	<i>Implementación de los sensores HTU11 y VEML6075</i>	74
Figura 26	<i>Prueba de comunicación ESP32 y Adafruit IO.</i>	75
Figura 27	<i>Prueba de comunicación entre ESP32 y Firebase.</i>	75
Figura 28	<i>Implementación de la Pantalla OLED.</i>	76
Figura 29	<i>Implementación entre AppInventor y FireBase.</i>	77
Figura 30	<i>Prueba de conexiones y comunicación en placa perforada universal</i>	78
Figura 31	<i>Datos obtenidos en las pruebas realizadas el día 20 de julio de 2023.</i>	79
Figura 32	<i>Datos del material particulado obtenidos el día 20 de julio de 2023.</i>	80
Figura 33	<i>Implementación en placa PCB</i>	81
Figura 34	<i>Verificación del circuito de carga para baterías de una celda de litio.</i>	82
Figura 35	<i>Implementación de los circuitos de regulación de voltaje.</i>	82
Figura 36	<i>Herramientas usadas en la construcción de las estructuras de la estación EMA.</i>	83
Figura 37	<i>Ensamblaje de la estructura cortada a laser.</i>	84
Figura 38	<i>Recubierta de protección para la estación impresa en 3D.</i>	84
Figura 39	<i>Ensamble de las paredes de ventilación con la recubierta de protección.</i>	85
Figura 40	<i>Recubierta para exteriores impresa en 3D.</i>	86
Figura 41	<i>Integración de los componentes internos con la estructura para interiores.</i>	87
Figura 42	<i>Ensamblaje de las dos estructuras para toma de datos en exteriores.</i>	88
Figura 43	<i>Calibración del sensor PMS5003.</i>	90
Figura 44	<i>Calibración del sensor de temperatura</i>	92

Figura 45	<i>Calibración del sensor de humedad.</i>	92
Figura 46	<i>Verificación de los datos del sensor VEML-6075</i>	93
Figura 47	<i>Verificación del consumo del sistema.</i>	94
Figura 48	<i>Datos obtenidos durante la prueba en Berlín Santander.</i>	95
Figura 49	<i>Validación de los datos de temperatura en el corregimiento de Berlín Santander.</i>	96
Figura 50	<i>Validación del tiempo de duración de la batería</i>	97
Figura 51	<i>Datos obtenidos durante la prueba de larga duración.</i>	98
Figura 52	<i>Toma de datos en exteriores.</i>	99
Figura 53	<i>Validación en interiores del sensor de material particulado PMS5003.</i>	100
Figura 54	<i>Toma de ubicación y datos durante el recorrido a Berlín.</i>	101
Figura 55	<i>Visualización de la ubicación en la interface online</i>	102
Figura 56	<i>Prueba de protección contra el agua de lluvia.</i>	103

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A. Repositorio del proyecto – GitHub.....	117
Apéndice B. Primeros diseños de placa PCB.	117
Apéndice C. Página web del trabajo de investigación.....	119
Apéndice D. Tabla de costos por componente.....	120
Apéndice E. Esquemático final usado para la elaboración de la PCB.....	121
Apéndice F. Reporte de inspección del sensor MH-Z1311A	122

Glosario

APP (Aplicación Móvil): Una aplicación móvil, o app, es un programa diseñado para funcionar en dispositivos móviles como teléfonos inteligentes y tabletas, ofreciendo diversas funcionalidades y servicios.

ATMÓSFERA: La atmósfera es la capa de gases que envuelve la Tierra, desempeñando un papel esencial en la protección de la vida al proporcionar oxígeno, regular la temperatura y actuar como filtro de radiaciones nocivas.

CAD (Diseño Asistido por Computadora): CAD se refiere al uso de software especializado para crear modelos digitales en 2D y 3D, facilitando el diseño y desarrollo de productos y sistemas.

CALIBRACIÓN: La calibración implica el proceso de ajustar instrumentos de medición para asegurar mediciones precisas y confiables, comparando sus resultados con estándares conocidos.

CNC (Control Numérico por Computadora): CNC se emplea en máquinas y dispositivos para automatizar operaciones de mecanizado mediante programación digital y control preciso.

CO₂ (Dióxido de Carbono): El dióxido de carbono es un gas de efecto invernadero presente en la atmósfera, cuyo aumento debido a la actividad humana contribuye al cambio climático.

CONECTOR: Un conector es un dispositivo que permite la unión y conexión de cables y componentes eléctricos, facilitando la transmisión de señales y datos.

DASHBOARD (Panel de Control o Visualización de Datos): Un dashboard es una interfaz gráfica que muestra información de manera visual y comprensible, utilizada para el monitoreo y control de datos.

DC (Corriente Continua): La corriente continua, o DC, es un flujo constante de electrones en una dirección, utilizada en baterías y dispositivos electrónicos para proporcionar energía de manera estable.

GPS (Sistema de Posicionamiento Global): El Sistema de Posicionamiento Global es un sistema de navegación que utiliza señales de satélites para determinar la ubicación precisa en cualquier lugar de la Tierra.

I2C (Inter-Integrated Circuit): I2C es un protocolo de comunicación electrónico que permite la interconexión de dispositivos, facilitando la transmisión de datos entre componentes.

IR (Infrarrojo): El infrarrojo es un tipo de radiación electromagnética con longitudes de onda más largas que la luz visible, utilizado en controles remotos y aplicaciones de imágenes térmicas.

IOT (Internet de las Cosas): El Internet de las Cosas se refiere a la interconexión de dispositivos y objetos cotidianos a través de Internet, permitiendo la recopilación y transmisión de datos para automatizar tareas y mejorar la eficiencia.

MICROCONTROLADOR: Un microcontrolador es un dispositivo electrónico integrado que contiene una CPU, memoria y periféricos, utilizado para controlar sistemas y dispositivos en aplicaciones electrónicas.

OMS (Organización Mundial de la Salud): La Organización Mundial de la Salud es una agencia de las Naciones Unidas dedicada a promover la salud, prevenir enfermedades y mejorar la atención médica en todo el mundo.

PCB (Placa de Circuito Impreso): Una placa de circuito impreso es una base plana que contiene circuitos electrónicos impresos en ella, utilizada para conectar componentes electrónicos en dispositivos.

PM (Material Particulado): Las partículas suspendidas en el aire son pequeñas partículas sólidas o líquidas en la atmósfera que pueden afectar la calidad del aire y la salud humana.

PLA (Ácido Poliláctico, Material Plástico Biodegradable): El PLA es un material plástico biodegradable utilizado en la fabricación de productos respetuosos con el medio ambiente.

PLACA UNIVERSAL (Placa de Circuito para Prototipos): Una placa universal es una placa de circuito impreso diseñada para crear prototipos electrónicos y realizar pruebas antes de la fabricación final.

PROTOBOARD (Placa de Prototipo para Electrónica): Un protoboard es una placa con orificios utilizada para construir prototipos de circuitos electrónicos sin necesidad de soldadura.

RADIACIÓN SOLAR UVA UVB (Tipos de Radiación Ultravioleta del Sol): La radiación solar UVA y UVB son dos tipos de radiación ultravioleta emitida por el sol, que pueden afectar la piel y la salud.

SCL (Serial Clock Line): SCL es una línea utilizada en la comunicación I2C para sincronizar la transferencia de datos entre dispositivos.

SDA (Serial Data Line): SDA es una línea utilizada en la comunicación I2C para transmitir datos entre dispositivos.

TTL (Transistor-Transistor Logic): TTL es un estándar de lógica digital que utiliza transistores para representar señales lógicas, comúnmente utilizado en la electrónica.

UVI (Índice de Radiación Ultravioleta): El índice de radiación ultravioleta es una medida que indica la intensidad de la radiación ultravioleta del sol y su impacto en la piel humana.

USB (Universal Serial Bus, Interfaz de Conexión): USB es un estándar de interfaz de conexión ampliamente utilizado para conectar dispositivos electrónicos a computadoras y otros dispositivos.

Resumen

Título: Diseño De Una Estación De Monitoreo De Variables Medioambientales Y Material Particulado De Bajo Costo.*

Autor: Jair Fernando Trujillo Sanguino, Elian Calderón Quintero, Andrés Francisco Rojas Sanchez**

Palabras Clave: Monitoreo, Sensores, IOT, Bajo costo, Material particulado.

Descripción: Las preocupaciones por la salud humana han generado que los ingenieros, médicos e investigadores estén creando nuevas herramientas que permitan obtener datos sobre la calidad del medio ambiente, estén diseñando instrumentos de medición como sensores para obtener datos en diferentes entornos ambientales; por lo cual la combinación de varios sensores puede contribuir a la creación de una estación de monitoreo de variables medioambientales. La investigación se realizó a partir del estudio de las variables en el ámbito local que afectan en gran medida la salud humana, como son: el material particulado, la temperatura, la humedad, la radiación solar y el dióxido de carbono; se hizo el ajuste de los requerimientos en el mercado de los sensores a implementar de acuerdo con su alta precisión y bajo costo, por lo cual el proyecto se desarrolló teniendo en cuenta 3 sistemas importantes: hardware, software y estructura. Para cada sistema se llevó un proceso de selección que cumplió con los requerimientos de lectura adecuada y el funcionamiento del sistema con el menor margen de error posible; adicionalmente, se realizaron pruebas de cada uno de los sensores para la obtención de datos que permitieron lecturas coherentes para su correcto análisis.

Finalmente, se realizó el proceso de la integración de los 3 sistemas para un diseño final comprobando el funcionamiento en diferentes zonas de la ciudad de Bucaramanga y Páramo de Berlín que permitieron la validación y lectura final de la información para su lectura comprensible y adecuada para la comunidad.

* Trabajo de Grado

**Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Electronic Engineering. Director: Julián Gustavo Rodríguez Ferrería. Doctorate in Physics, specialty Astrophysics. Co-director: Jaime Guillermo Barrero Pérez. Master in Electrical Power..

Abstract

Title: Design of a Low-Cost Monitoring Station for Environmental Variables and Particulate*

Autor(s): Jair Fernando Trujillo Sanguino, Elian Calderón Quintero, Andrés Francisco Rojas Sanchez**

Key Words: Monitoring, Sensors, IOT, Low cost, Particulate matter.

Description: Concerns about human health have caused engineers, doctors and researchers to create new tools to obtain data on the quality of the environment; they are designing measurement instruments such as sensors to obtain data in different environmental environments; Therefore, the combination of several sensors can contribute to the creation of a monitoring station for environmental variables. The research was carried out from the study of variables at the local level that greatly affect human health, such as: particulate matter, temperature, humidity, solar radiation and carbon dioxide; The requirements in the market for the sensors to be implemented were adjusted according to their high precision and low cost, which is why the project was developed taking into account 3 important systems: hardware, software and structure. For each system, a selection process was carried out that met the requirements for adequate reading and the operation of the system with the smallest possible margin of error; Additionally, tests were carried out on each of the sensors to obtain data that allowed coherent readings for correct analysis.

Finally, the process of integrating the 3 systems was carried out for a final design, checking the operation in different areas of the city of Bucaramanga and Páramo de Berlin that allowed the validation and final reading of the information for its understandable and appropriate reading for the community.

* Degree Work

**School of Physical and Mechanical Engineering. School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Electronic Engineering. Director: Julián Gustavo Rodríguez Ferrería. Full academic degree of higher rank. Co-director: Jaime Guillermo Barrero Pérez. Full academic degree of higher rank

Introducción

. Los avances tecnológicos han permitido a la humanidad obtener beneficios económicos e intelectuales, un gran hito fue la revolución industrial (Chaves Palacios, 2004) que permitió el ingreso de máquinas industrializadas reduciendo los tiempos en la fabricación de materia prima que implicó un avance en las investigaciones, la obtención de beneficios económicos y de nuevas formas para mejorar el estilo de vida. Igualmente, se generó en los últimos años una alta demanda tanto laboral como de materiales y productos industriales que han producido una contaminación de gran impacto en la atmósfera del planeta que han provocado diversas enfermedades en el ser humano y han generado cambios climáticos no deseados.

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) “Se calcula que cada año la exposición a la contaminación del aire causa 7 millones de muertes prematuras y provoca la pérdida de otros tantos más millones de años de vida saludable”(OMS, 2021). Las partículas que se encuentran suspendidas en el aire como el PM 2.5 y PM 10 son de gran importancia para el monitoreo en la calidad del aire debido a sus efectos perjudiciales sobre el ser humano, como generan enfermedades en los sistemas respiratorio y cardiovascular, se clasifican como cancerígenas por el Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer (CIIC) de la OMS. Toda esta generación de contaminación sin control también afecta el cambio climático generando variaciones de temperatura y humedad en los diferentes entornos ambientales como los ecosistemas, los hábitat de los animales, las zonas urbanas y rurales de los seres humanos; también produce otras consecuencias como sequías, escasez de agua, aumento de incendios forestales y disminución de la biodiversidad. Igualmente, la OMS ha estimado que “la temperatura media de la Tierra es ahora 1,1 °C más elevada que a finales del siglo XIX, antes de la revolución industrial, y más elevada en

términos absolutos que en los últimos 100.000 años” (Naciones Unidas, 2022). El cambio climático provoca gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono generado en una gran parte por las industrias relacionadas con el petróleo, estos cambios inesperados pueden tener impacto en la sociedad, como: el colapso de cosechas, la disminución de agua potable, la posible desaparición de ecosistemas, los efectos de calor (fenómeno del niño), el aumento en la probabilidad de existencia de huracanes y otros problemas que no han tenido un posible registro en la actualidad.

Todos los efectos han generado que la atmosfera se encuentre en un proceso de desgaste debido a las contaminaciones generadas por el ser humano, por lo cual, algunas radiaciones que genera el sol no son totalmente absorbidas por la atmosfera generando que ingresen en la tierra como la radiación solar UVA y UVB. Esta es de gran importancia para los procesos biológicos como la producción de la vitamina D, pero su exposición de manera no controlada, puede generar daños en la salud como cáncer de piel; estas patologías han llevado a la decisión de crear conciencia sobre el riesgo de la radiación solar en periodos de tiempo largo, por ello se ha creado una escala de índice de radiación solar (UVI) que permite a los seres humanos ser más conscientes sobre las precauciones y cuidado en la piel cuando se exponen al sol.

Los efectos negativos generados por las variables ambientales mencionadas anteriormente son las bases para la realización del trabajo de grado que es el resultado de un profundo estudio y análisis de la problemática que presenta la ciudad de Bucaramanga y la falta de una red de monitoreo ambiental debido a los costos que implica establecerla. Se examinará las complejidades y aspectos fundamentales de este tema, divididas en 11 capítulos que cubren diferentes aspectos y perspectivas descritas de la siguiente forma:

En el capítulo 2 estableceremos las bases de nuestro estudio, introduciendo el tema de las variables atmosféricas, su relevancia que proporcionará para comprender mejor nuestro tema, su relación con la salud humana y la integración de las variables en una estación meteorológica.

En el capítulo 3 se describirán los proyectos del monitoreo ambiental aplicadas a las ciencias ciudadanas de forma mundial, local y nacional.

En el capítulo 4 se describirán a profundidad las variables ambientales que se implementarán en la estación meteorológica EMA, como sus tipos de variable, sus métodos de medición y sus rangos de alerta.

En el capítulo 5 se describirá el proceso de diseño para la creación de EMA que incluye las restricciones, la estructura general para la selección de los sensores de las variables medioambientales, el diseño de la PCB y el diseño de un aplicativo móvil.

En el capítulo 6 se realizará el proceso de implementación del prototipo de los sensores que se seleccionaron en el capítulo 5, tanto en protoboard como en PCB, la adición de componentes adicionales para el funcionamiento autónomo de EMA y la implementación en lugares interiores y exteriores.

En el capítulo 7 se mencionan los métodos de calibración u usados para la verificación de los datos obtenidos por los sensores seleccionados en el capítulo 5.

En el capítulo 8 se realizará las validaciones de la estación EMA de los componentes implementados, a su vez, la verificación de recepción y envío de datos en diferentes lugares.

En el capítulo 9 se describe el costo total de la estación EMA, el capítulo 10 se realizarán las conclusiones de la realización del trabajo de grado, el capítulo 11 se realizan las recomendaciones para mejorar la estación EMA y el capítulo 12 se evidencian documentos adjuntos que incluyen información adicional de la creación de la estación EMA.

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Diseñar un prototipo de estación de monitoreo de variables medioambientales y material particulado con sensores de bajo costo y con conectividad IoT.

1.2. Objetivos Específicos

Realizar un estudio de mercado basado en los requerimientos que permita seleccionar los sensores y componentes para la implementación del prototipo.

Implementar la arquitectura del sistema compuesta por los instrumentos de medición, potencia y comunicación para su integración en placa PCB.

Validar el funcionamiento de la interfaz software y Hardware con la base de datos respecto a la transmisión de datos.

Validar el funcionamiento de un aplicativo básico móvil que permita visualizar la información proveniente de la base de datos.

2. Marco Conceptual

La atmósfera terrestre, la capa gaseosa que rodea nuestro planeta, es el escenario donde ocurren los fenómenos meteorológicos que influyen en nuestra vida diaria de la cual es importante cuidarla y no dañarla para futuros eventos climáticos que pueden ocasionar debido a la contaminación industrial. Las variables temperatura, humedad, radiación solar, dióxido de carbono y material particulado son de importancia para comprender el impacto en la salud humana frente a los cambios generados por la contaminación industrial no controlada generando exposición a cambios de condiciones climáticas en diferentes regiones de la tierra. Para realizar un seguimiento preciso de estas variables y sus efectos, se requiere una herramienta esencial, la estación meteorológica. Una estación meteorológica es un conjunto de instrumentos y sensores diseñados para medir y registrar datos atmosféricos. las estaciones nos proporcionan información valiosa sobre el clima y permiten tomar decisiones informadas en áreas como la agricultura, la gestión de recursos naturales, la planificación urbana y la predicción meteorológica.

3. Introducción a las Variables Atmosféricas

El sistema solar se formó a partir de una nube fría de materia que se condensó, dando origen a un disco de material de forma plana en el cual se fueron creando los protoplanetas y luego los planetas actuales y en su centro el sol (VIU, 2023). Este proceso implicó la acumulación de elementos a través de colisiones entre pequeñas partículas atraídas por la gravedad, formando cuerpos cada vez más grandes que se convirtieron en planetas. Este proceso duró aproximadamente 100 millones de años y resultó en un intenso bombardeo de cometas y asteroides. Actualmente, el bombardeo es mucho menos intenso en comparación con esa época inicial(ABC, 2012). Durante

los primeros cientos de millones de años, componentes volátiles, como líquidos o gases, fueron expulsados a la superficie de la Tierra a través de erupciones volcánicas. Estos componentes fueron capturados en la superficie por la gravedad, formando así la primera atmósfera. En la actualidad, la tierra continua en un proceso llamado desgasificación debido a que una erupción volcánica aporta componentes de alta energía a la atmosfera, en sus investigaciones los geoquímicos consideran que la tierra tiene una composición de gases volcánicos (Schiavo, Inguaggiato, Arredondo-Palacios, & Meza-Figueroa, 2021) que incluyen nitrógeno molecular, dióxido de carbono, vapor de agua, monóxido de carbono y dióxido de azufre (Mediavilla Pérez, 2004). Debido a la compresión de gases y la gravedad terrestre, la atmósfera tiene una gran cantidad de masa cerca de la superficie. Esto resulta en la presencia de componentes líquidos y sólidos en diferentes capas atmosféricas, como la homosfera y la heterosfera. La investigación en la atmósfera terrestre ha destacado la importancia de variables como la temperatura, la humedad, el material particulado, el CO₂ y la radiación solar en los fenómenos meteorológicos, dichas investigaciones ayudan a comprender cómo estas variables cambian en diferentes momentos y lugares, lo que tiene un impacto significativo en la sostenibilidad de la vida en nuestro planeta. Esta información es valiosa para tomar decisiones en áreas como la salud, la gestión de recursos naturales y la adaptación al cambio climático para sus efectos en el medio ambiente.

La temperatura ha sido una variable importante en la determinación del clima de una región, sus análisis son importantes para muchas aplicaciones, desde la agricultura hasta la aeronáutica y la planificación urbana. Las fluctuaciones de la temperatura atmosférica desencadenan fenómenos que van desde cambios diarios de temperatura hasta fenómenos meteorológicos extremos (Alanís Flores, 2011), (BOTTOLLIER-DEPOIS, 2021)

Igualmente, la humedad es un factor muy importante en la formación de nubes debido a los efectos que generan en los ecosistemas; produce eventos como la lluvia, la nieve y las tormentas. los niveles adecuados de humedad son vitales para el crecimiento de la agricultura, pues permiten la germinación óptima de los alimentos, como también el crecimiento de las plantas y la supervivencia de los animales (Xiong, Y., Meng, Gao, Tang, & Zhang, 2017), (Paull, 1999)

La radiación solar es la energía emitida en forma de radiación electromagnética, es esencial para mantener los procesos de los ecosistemas como el de fotosíntesis que permite el desarrollo de la agricultura en la producción de alimentos, oxígeno y también en la determinación del clima debido a la radiación que ingresa a la tierra(Ghetti, Checcucci, & Bornman, 2006).

Por otra parte, el dióxido de carbono es esencial en la atmósfera debido a su contribución al efecto invernadero, que es crucial para mantener una temperatura moderada en la Tierra. El estudio de la fotosíntesis de las plantas, que convierte el dióxido de carbono en oxígeno, es importante para predecir los efectos del cambio climático y sus consecuencias para los ecosistemas (Mondragon, 2021), (Rodriguez Ucha, 2006).

La calidad del aire es vital para el bienestar de los ecosistemas y la salud humana. Las partículas suspendidas en el aire, conocidas como material particulado (PM10, PM2.5 y PM1.0), representan una preocupante fuente de contaminación, debido a que son lo suficientemente pequeñas para inhalarse profundamente en los pulmones, también pueden alterar el clima, reducir la visibilidad impactando negativamente en los ecosistemas y los recursos naturales.(Brunekreef & Russell, 2009), (Brunekreef & Russell, 2009)

3.1. Importancia de las Variables Atmosféricas y su Relación con la Salud

Las variables atmosféricas como la temperatura, la humedad, la radiación solar, el CO2 y el material particulado son factores claves para la comprensión de los efectos climáticos que afectan

los ecosistemas y la salud humana. La relación entre las variables puede tener un impacto ya sea de forma agresiva o pasiva.

La temperatura es uno de los factores climáticos más importantes que afectan la salud humana. Las temperaturas altas o bajas pueden provocar problemas de salud como hipertemia, hipotermia y agravamiento de enfermedades cardiovasculares y respiratorias (Montero Rubio, Mirón Pérez, Díaz Jiménez, & Alberdi Odriozola, 1997). El aumento de la temperatura debido al calentamiento global puede causar cambios en la distribución de factores ambientales. Esto puede llevar a la aparición de enfermedades en áreas que antes no eran propensas a ellas, afectando especialmente a niños y personas con enfermedades graves que tienen dificultades para adaptarse a estos cambios. Además, estos efectos se reflejan en las condiciones diarias de confort térmico para los seres humanos (Xiong, J., Lian, Zhou, You, & Lin, 2015). La humedad afecta la regulación de la temperatura corporal en los humanos. La alta humedad aumenta el riesgo de insolación, enfermedades respiratorias y cardiovasculares, y dificulta la regulación térmica. En contraste, la baja humedad puede obstruir las vías respiratorias y aumentar la susceptibilidad a infecciones. Mantener un equilibrio adecuado de humedad es esencial para la salud humana debido a sus efectos significativos. Las personas con problemas cardíacos (Davis, McGregor, & Enfield, 2016) son más susceptibles debido a que puede aumentar la frecuencia cardíaca y la presión arterial, afectando el sistema cardiovascular. La humedad afecta negativamente a personas con enfermedades pulmonares como el asma y la EPOC al aumentar los alérgenos en el aire, desencadenando ataques y empeorando los síntomas. Por otro lado, la radiación solar tiene un impacto significativo en la salud humana. La exposición adecuada al sol tiene beneficios, como la síntesis de vitamina D, fortalecimiento de huesos, mejora del sistema inmunológico y cardiovascular, además de efectos positivos en la salud mental. Sin embargo, la exposición excesiva puede causar daños, como

quemaduras solares, envejecimiento prematuro de la piel, aumento del riesgo de cáncer de piel y problemas oculares. Para reducir los riesgos, se recomienda el uso de protector solar, ropa protectora y sombreros.

El dióxido de carbono (CO₂) es un componente natural e indispensable de la atmósfera, cuya concentración se ha incrementado significativamente debido a la actividad humana, principalmente la quema de combustibles fósiles. Aunque el dióxido de carbono en sí mismo no es tóxico en concentraciones normales, su aumento está asociado con otros efectos sobre la salud humana. La quema de combustibles fósiles puede liberar partículas y otros contaminantes que tienen un impacto negativo en la salud respiratoria y cardiovascular. Las comunidades más vulnerables que viven en áreas urbanas congestionadas pueden estar más expuestas a la contaminación del aire relacionada con el dióxido de carbono ya sea a niveles altos aumentando la frecuencia cardíaca o concentraciones altas de CO₂ en lugares cerrados afectando un estado de la corteza cerebral (Gerlach, Guth, & Oelssner, 2019). El material particulado es un componente de la contaminación del aire que consiste en pequeñas partículas en el aire. Estas partículas varían en tamaño y composición y pueden tener efectos significativos en la salud humana. Las partículas más pequeñas, como PM_{2.5}, pueden penetrar profundamente en los pulmones y, en algunos casos, en el torrente sanguíneo. PM₁₀ es un poco más grande y puede alcanzar vías respiratorias más profundas. La exposición a altas concentraciones de partículas puede causar problemas respiratorios. Las partículas pequeñas pueden irritar las vías respiratorias y empeorar los síntomas en personas sensibles. La exposición a largo plazo a altas concentraciones de partículas se ha relacionado con una mayor mortalidad prematura y el desarrollo de enfermedades crónicas como enfermedades cardíacas, enfermedades pulmonares crónicas y ciertos tipos de cáncer (Kim, Kabir, & Kabir, 2015). Los grupos más vulnerables, como los ancianos, los niños, las personas con

Las investigaciones son fundamentales para el desarrollo de estaciones meteorológicas, vitales para monitorizar los cambios ambientales causados por la industrialización y la comercialización de materias primas. Estas estaciones varían en diseño y costo, desde las de alto costo con sensores avanzados para monitoreo constante como los elementos que se aprecian en la Figura 1, hasta las de bajo costo adaptadas a investigaciones específicas. Además, se clasifican en terrestres, marítimas o de alturas(Quinchía, 2020) según su ubicación, desempeñando un papel crucial en la recopilación de datos climáticos y atmosféricos para comprender el clima, pronósticos y la investigación científica (Ko, Lee, Hwang, & Shin, 2022) La evolución de las estaciones meteorológicas ha superado las limitaciones de transmisión y procesamiento de datos gracias a la incorporación de microcontroladores, estos dispositivos programables actúan como cerebros inteligentes que mejoran la eficiencia del monitoreo y control de operaciones. Los microcontroladores impulsan el desarrollo de estaciones meteorológicas avanzadas al permitir la ejecución de programas complejos y la comunicación en tiempo real con sensores.

4. Ciencia Ciudadana en Proyectos de Monitoreo Ambiental

La ciencia ciudadana en proyectos de monitoreo ambiental a nivel global, nacional y local es un enfoque colaborativo que enriquece la comprensión de los problemas ambientales en diferentes lugares geográficos. Este capítulo se examina sus aplicaciones en diversos contextos sobre aplicaciones en la cual se realiza la incorporación en el medio ambiente para generar conciencia de los efectos de las variables ambientales.

4.1. Proyectos a Nivel Mundial

Es un enfoque donde los ciudadanos comunes colaboran con personas, que no necesariamente están capacitadas como científicos, para recopilar y analizar datos meteorológicos, obteniendo información valiosa y enriqueciendo la comprensión de las condiciones ambientales como el clima en diferentes áreas geográficas. La recopilación de datos puede ayudar a resolver los problemas del cambio climático, monitorear eventos climáticos extremos y mejorar los problemas ambientales.

4.1.1. Air Quality Egg

Air Quality Egg brinda a los ciudadanos la oportunidad de medir las condiciones ambientales de su entorno de vida. El proyecto es una colaboración entre diseñadores, investigadores y ciudadanos de diferentes países como Nueva York, Ámsterdam y Londres. Un prototipo comunitario que consta de un sensor exterior y una estación base en forma de huevo que recibe datos de calidad del aire de forma inalámbrica y tiene una pantalla visual con datos reales. La base de datos en línea recopila continuamente datos de todos los huevos de calidad del aire en todo el mundo y utiliza estas mediciones para crear alertas, mapas y otras aplicaciones creativas (Air Quality Egg, 2021) .

4.1.2. Citizen Weather Observing Program (CWOP)

CWOP es una red de voluntarios que permite a los propietarios de estaciones meteorológicas personales compartir datos en tiempo real de sus estaciones con el Servicio Meteorológico Nacional de EE. UU., administradores de emergencias, bomberos forestales y universidades de todo el mundo. Es un proyecto colaborativo basado en la web que permite a los observadores ciudadanos entregar informes meteorológicos en tiempo real en todo el mundo, CWOP está diseñado para recopilar observaciones meteorológicas precisas y detalladas desde

múltiples ubicaciones, utilizando estaciones meteorológicas personales (US Department of Commerce, NOAA, 2012).

4.1.3. Programa Mundial de Investigaciones Climáticas (PMIC o WCRP)

El Programa Mundial de Investigaciones Climáticas (PMIC) realiza prevenciones de cambios en el sistema Tierra para su uso en diversas aplicaciones prácticas de importancia y beneficio para la sociedad. El WCRP tiene como objetivo determinar la estimación del clima y el efecto de las actividades humanas en el clima (World Climate Research Programme, 2015)

4.2. Proyectos a Nivel Nacional

En este subcapítulo, nos centramos en la implementación de proyectos de monitoreo ambiental a nivel nacional, cómo la ciencia ciudadana influye en el estudio de problemas ambientales a gran escala en un contexto nacional.

4.2.1. Observatorio Ambiental de Bogotá

Según la secretaria distrital de ambiente de la ciudad de Bogotá: “Es una herramienta digital para aprender sobre la calidad del ambiente de la ciudad, es un sistema oficial de reporte y divulgación de la información ambiental, que cuenta con el apoyo de otras 12 entidades del Distrito. Allí se encuentran indicadores sobre la salud ambiental, la calidad del agua, del aire, del suelo, el cambio climático, entre otros. También posee documentos de planes y políticas ambientales, informes de calidad del aire, promedios anuales de los efectos contaminantes, entre otros”. (Secretaria Distrital de Ambiente, 2019)

4.2.2. SIATA (Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá)

Es un proyecto en Colombia que se dedica al monitoreo y la gestión de la calidad del aire en el Valle de Aburrá, una región que incluye la ciudad de Medellín y su área metropolitana. SIATA es un ejemplo destacado de cómo la ciencia ciudadana y la tecnología se utilizan para

abordar problemas de calidad del aire y mejorar la calidad de vida en áreas urbanas (Sistema de Alerta Temprana del Medellín y el Valle de Aburra, 2022).

4.3. Proyectos a Nivel Local

En este subcapítulo, nos enfocamos en proyectos de monitoreo ambiental a nivel local, específicamente en la ciudad de Bucaramanga, de cómo incide en las cuestiones ambientales locales y su impacto en la comunidad.

4.3.1. Sistema de vigilancia de Calidad del Aire (CDMB)

Según el área metropolitana de Bucaramanga: “Las estaciones son un sistema TIPO III diseñadas para la medición de material particulado, ozono, óxido de nitrógeno y datos meteorológicos. La medición de NO_x se incluye debido a que es fundamental para comprender la dinámica de las concentraciones de Ozono, ya que entre estos dos contaminantes se presentan reacciones fotoquímicas”. (Área Metropolitana de Bucaramanga, 2019)

4.3.2. Racimo

Según el grupo de investigación Halley: “El proyecto RACIMO, financiado por el Fondo Regional de Innovación Digital para América Latina y el Caribe y la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad Industrial de Santander, busca formar a estudiantes de secundaria en educación cívica, ciencia abierta y ciencia de datos. En colaboración con el Grupo de Astronomía Halley de la universidad, los participantes utilizan tecnologías de la información y la comunicación (TIC) para crear una estación de medición de datos climáticos en la región. Esta estación básica mide la presión y la temperatura y se conecta a una computadora con acceso a Internet”. (La experiencia RACIMO – red ambiental Ciudadana de MONitoreo (RACIMO)).

5. Descripción de las Variables Ambientales

El medio ambiente se ha convertido en un tema muy importante en la sociedad actual. Las variables ambientales como la temperatura, la humedad, el material particulado, el dióxido de carbono y la radiación UV son de gran importancia para abordar los desafíos ambientales actuales debido a su impacto significativo en la salud humana, como se analiza en la sección 3 y 3.1. Por tanto, estas variables son esenciales para la conservación del planeta y tienen un impacto directo en nuestro bienestar. En este contexto, se analizan cuidadosamente, teniendo en cuenta los cambios atmosféricos observados y su relevancia en un mundo en constante evolución, como se explica en la sección 3. Juntas, estas cinco variables son esenciales para un seguimiento y control adecuados que permitan prevenir problemas de salud, promover la seguridad y el confort y mantenernos informados sobre nuestras vidas y el mundo que nos rodea.

5.1. Temperatura

La temperatura es un factor importante para detectar y comprender los cambios ambientales. En nuestro trabajo de grado se analizará en el mundo de la meteorología y la estación meteorológica la inclusión con precisión la variable temperatura; como afecta la toma de decisiones ambientales y cómo puede ayudarnos a comprender mejor el cambio climático y sus efectos en nuestro entorno ambiental.

5.1.1. Tipos de Temperatura

Existen diferentes tipos de temperatura que nos permite describir diferentes aspectos en los medios ambientales, los más importantes a analizar son la temperatura ambiente, temperatura superficial del mar y temperatura del suelo debido a sus efectos en los ecosistemas ambientales y

el cambio climático. La temperatura ambiente es el registro que se puede llevar en los espacios de habitad ya sea de los humanos o de los animales, obteniendo su medición en 2 escalas, Celsius o Fahrenheit. La temperatura superficial del mar es una medida de la capa superior de los océanos, su variación depende la ubicación geográfica para su análisis, sus variaciones pueden generar ciclones o huracanes que implica cambios en las condiciones de habitad de organismos biológicos (Pastor, Valiente, & Palau, 2018).

La temperatura del suelo es la capa de los primeros centímetros de profundidad, ya que su variación es dependiendo del tiempo o ubicación geográfica, sus efectos son de gran importancia para los procesos de actividades como el crecimiento de vegetación, mediciones ambientales, agricultura.

5.1.2. Métodos de Medición

Los termómetros de mercurio utilizan la expansión y contracción de líquidos para medir la temperatura en una escala graduada, mientras que los termómetros digitales emplean circuitos integrados para convertir las variaciones de tensión en valores numéricos en grados Celsius o Fahrenheit, mostrando el resultado en una pantalla de manera instantánea evidenciado en la Figura 2.

Figura 2

Termómetro Analógico y Digital

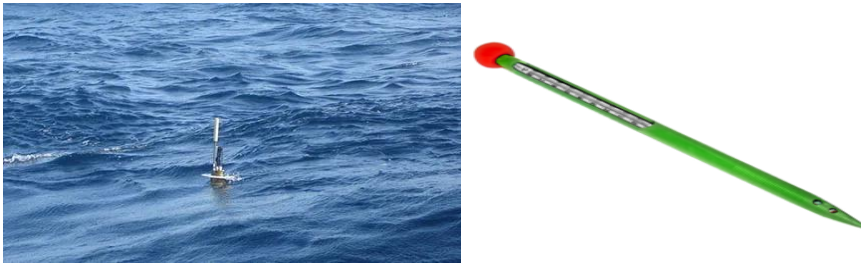


Nota: Imagen tomada de (Villa, 2020) donde se presenta el valor del termómetro digital y el valor aproximado del termómetro de mercurio

Las Boyas de Deriva, Boyas argo o satélites de observación son lo de mayor uso para el registro de datos de la temperatura superficial del mar; Un método común usado en los suelos es el termómetro de suelo evidenciado en la Figura 3 debido a que se introduce en el sustrato y conocer la temperatura de la tierra realizando su medición en varios puntos del terreno.

Figura 3

Boyas de Deriva y Termómetro de suelo



Nota: Imágenes tomada de (Martin Leon Francisco, 2016) y (Gesa Termómetros, 2014)

5.1.3. Rangos de Alerta

Los rangos de alerta de temperatura son una herramienta esencial en la evaluación de las condiciones climáticas. Los intervalos, como precaución o peligro extremo generan efectos significativos en diversos aspectos de nuestra vida y el entorno. Si se encuentra en nivel de precaución puede presentar incomodidades en el bienestar humano, pero si llega a peligro extremo, puede generar deshidratación y estrés térmico; por lo cual se deben considerar los diferentes niveles de riesgo que se encuentran en la Tabla 1.

Tabla 1*Niveles de temperatura*

Nivel de Riesgo	Índice de Calor	Efectos
Precaución	27 a 32	Posible fatiga por exposición prolongada o actividad física
Precaución extrema	33 a 40	Insolación, golpe de calor, calambres. Posibles por exposición prolongada o actividad
Peligro	41 a 53	Insolación, golpe de calor, calambres. Muy posibles por exposición prolongada o actividad física.
Peligro extremo	54 0 mas	Golpe de calor, insolación inminente.

Nota: Valores adaptados de la tabla tomada de (solerpalau, 2021)

5.2. Humedad

La humedad es una variable importante en una estación meteorológica por su papel importante en la comprensión de las condiciones climáticas que pueden afectar aspectos como la salud y la agricultura. En nuestro trabajo de grado destacamos la importancia de la humedad y enfatizamos cómo esta variable contribuye a una evaluación más precisa del clima y otros factores ambientales.

5.2.1. Tipos de Humedad

La humedad absoluta es una medida de la cantidad de vapor de agua presente en el aire en forma de gramos por metro cúbico (g/m^3) o kilogramos por metro cúbico (kg/m^3). Es una medida directa de la cantidad real de vapor de agua en una cantidad de aire específica y se utiliza para evaluar la cantidad de humedad presente en el ambiente. La humedad relativa se utiliza para

describir la cantidad de vapor de agua en el aire en comparación con la cantidad máxima de vapor de agua que el aire puede contener a una temperatura y presión determinadas. Expresado como porcentaje evidenciado en la Figura 4, esta es una métrica importante para comprender qué tan saturado está el aire en comparación con su capacidad máxima.

Figura 4

Humedad Relativa y absoluta



Nota: Imagen tomada de (AtlasScientific, 2022)

5.2.2. Métodos de Medición

La medición precisa de la humedad es esencial en diversos campos como la meteorología, agricultura e industria. El higrómetro es el método más común y el higrómetro de absorción es ampliamente utilizado, detectando cambios en propiedades de materiales cuando absorben humedad. Los medidores capacitivos, precisos y versátiles, miden la humedad mediante cambios en capacitancia de materiales sensibles. Los medidores de humedad de suelo son cruciales para controlar el crecimiento agrícola al medir el contenido de humedad en el suelo. (Equipos Y Laboratorio de Colombia, 2019)

5.2.3. Rangos de Alerta

Los rangos de alerta en relación con la humedad son intervalos específicos de valores que indican niveles críticos o excepcionales en la cantidad de vapor de agua presente en el aire. La

Tabla 2 muestra cómo se dividen los rangos, incluyendo baja o alta humedad en tonos rojos, humedad normal en verde y humedad media en tonos de amarillo. La comprensión de estos rangos es fundamental para tomar decisiones informadas en una variedad de campos y asegurar una gestión adecuada de las condiciones ambientales.

Tabla 2

Niveles de Humedad

Índice de porcentaje	Nivel de humedad
Mayor a 70%	Alto
Entre 60% y 70 %	Alto justo
Entre 30% y 60%	Óptimo
Entre 25% y 30 %	Bajo justo
Menor a 25%	Bajo

Nota: Valores de humedad adaptados de (Bannister, 2020)

5.3. Radiación Solar

La radiación solar, una variable de gran importancia, se incluye en nuestra estación meteorológica porque juega un papel clave en la evaluación de modelos climáticos y predicciones meteorológicas para comprender y resolver problemas ambientales y energéticos.

5.3.1. Tipos de Radiación Solar

La radiación solar es una parte fundamental de nuestro ambiente y es esencial en variedad de procesos naturales y tecnológicos. Hay tres tipos principales de radiación que llegan a la Tierra: Radiación ultravioleta (UV), Radiación visible y Radiación infrarroja (IR). Estos diferentes tipos de radiación tienen diversos impactos en nuestro clima y salud. La radiación ultravioleta es una forma de energía solar que llega a la Tierra en diferentes longitudes de onda, la radiación

ultravioleta A (UVA) es menos energética que otras formas de radiación UV y es responsable del bronceado de la piel, pero también puede causar problemas como inmunosupresión, envejecimiento prematuro y daño a la piel. La radiación UV-B, aunque más débil que la UVA, puede ser perjudicial ya que llega debilitada por la capa de ozono. Puede afectar a la salud humana, causando quemaduras en la piel y aumentando el riesgo de cáncer de piel. También tiene un impacto negativo en las plantas. Por último, los rayos UV-C son altamente energéticos y dañinos, pero afortunadamente son absorbidos por el ozono en la estratosfera, por lo que no llegan a la superficie terrestre. (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales., 2012), (OMS, 2022)

5.3.2. Métodos de Medición

La medición precisa de la radiación solar es crucial para entender sus efectos en la energía y el clima. Se utilizan diferentes métodos, como el pirheliómetro para medir la radiación directa del sol, el piranómetro que mide la radiación directa y difusa para una evaluación completa, y el actinógrafo para medir la duración de la exposición a la luz solar directa mediante la detección de sombras solares. (Benito, 2018)

5.3.3. Rangos de Alerta

Los rangos de alerta del índice UV se utilizan para comunicar los niveles de exposición al sol y el riesgo de daño a la piel. La Tabla 3 muestra los diferentes niveles de índice UV, desde el nivel 1 que puede estar en lugares exteriores sin riesgo hasta el nivel 11 o más, Estos rangos son esenciales para tomar precauciones adecuadas y proteger la piel contra los efectos perjudiciales de la radiación UV, como quemaduras solares y riesgo de cáncer de piel.

Tabla 3*Niveles de radiación UV*

Índice de UV	Afectaciones
Índice 1 y 2	Puede permanecer en el exterior sin riesgo.
Índice 3, 4, 5, 6 y 7	Manténgase a la sombra durante las horas centrales del día.
Índice 8,9,10,11 y 11+	Evite salir durante las horas centrales del día.

Nota: Valores adquiridos de la tabla de (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales., 2015)

5.4. Dióxido de Carbono (CO₂)

La medición del dióxido de carbono (CO₂) es fundamental para comprender y monitorear el cambio climático y la calidad del aire, lo que la convierte en una adición esencial a las estaciones meteorológicas. Este proyecto considerará la implementación del CO₂, ya que es un importante gas de efecto invernadero y su monitoreo es esencial para evaluar los impactos ambientales y las tendencias climáticas en el medio ambiente.

5.4.1. Métodos de Medición

Existen diferentes formas como analíticos, la detección fotoacústica, los sensores electroquímicos e infrarrojos no dispersivos (Gerlach et al., 2019). Los métodos analíticos que se enlazan con la química son debido a que utilizan para separar, identificar y determinar los componentes químicos de sólidos, líquidos o gases en función de su estructura y composición. Seguidamente. Los sensores potenciométricos de CO₂ son dispositivos diseñados para medir la concentración en una muestra mediante cambios de potencial eléctrico entre un electrodo de referencia y un electrodo de trabajo, es decir, en el potencial eléctrico de la celda

electroquímica(Lee, Akbar, & Dutta, 2009), (Kobos, Parks, & Meyerhoff, 1982).Los sensores de infrarrojos no dispersivos (NDIR) son dispositivos que se utilizan para medir la concentración en una muestra mediante la absorción de radiación infrarroja. Estos sensores aprovechan la capacidad característica para absorber la radiación infrarroja en una determinada longitud de onda (Arzoumanian et al., 2019).

5.4.2. Rangos de Alerta

Los rangos de alerta para el dióxido de carbono (CO₂) son intervalos que indican niveles significativos de este gas en el aire. Estos rangos se utilizan para evaluar la calidad del aire y el impacto en la salud y el medio ambiente. Los diferentes niveles de CO₂, desde bajos hasta altos, son cruciales para monitorear la concentración de CO₂ en espacios interiores y exteriores, lo que es fundamental para la salud humana y la gestión ambiental evidenciados en la Tabla 4.

Tabla 4

Niveles de dióxido de carbono

Concentración de ppm	Calidad del aire
Rango de 400-600	Excelente
Rango de 700-800	Bueno
Rango de 900-1000	Normal
Rango de 1100-1500	Mediocre
Rango de 1600-2100	Malo

Nota: Valores tomados de la imagen de (stadiumvenecia, 2020)

5.5. Material Particulado

La inclusión del material particulado en nuestra estación meteorológica es crucial debido a su impacto en la calidad del aire y la salud humana. Medir estas partículas es esencial, ya que

niveles altos están relacionados con enfermedades respiratorias y cardiovasculares. Esto nos permitirá recopilar datos precisos para entender mejor estos impactos y tomar medidas para proteger la salud pública y la calidad del aire.

5.5.1. Tamaño de las Partículas

En el ambiente se encuentra circulando un polvo fino que contiene partículas respirables denominadas Material particulado, el cual es una gran mezcla de material sólido muy pequeño y también de gases que están suspendidos en el aire y que son fáciles de respirar, por lo cual, existen 3 tipos de partículas.(Laura Judith Ramírez, 2021). Las partículas PM10, con un diámetro de 10 micrones se pueden encontrar en partículas como polvo, polen, pero pueden originarse tanto de procesos naturales como de emisiones de combustión, acumulando carga química en la atmósfera. Por otro lado, las partículas PM2.5 tienen una capacidad muy alta de ingresar a los pulmones y el sistema respiratorio, su principal fuente son las actividades industriales como la combustión en vehículos y maquinaria. Por último, las partículas PM1.0, estas partículas son extremadamente pequeñas por lo que permanecen suspendidas en el aire y su ingreso a los pulmones es muy perjudicial.

5.5.2. Métodos de Medición

El método gravimétrico es una técnica de medición que se utiliza para estimar la concentración de partículas en el aire. Consiste en capturar las partículas en un filtro durante un tiempo específico y luego pesar el filtro antes y después del muestreo. La diferencia de peso está relacionada con la cantidad de partículas recolectadas, que puede ser determinada por un alto flujo de aire o un bajo flujo de aire (Licla Tomayro, 2021). Los métodos instrumentales miden partículas suspendidas en el aire y ofrecen detección en tiempo real del tamaño, se utilizan técnicas como espectrometría de masas de tiempo de vuelo (ToF-MS) para tamaño y composición, espectrometría

de movilidad iónica (IMS) para clasificar por carga y tamaño, y espectrometría de absorción. Estos métodos avanzados son esenciales para un análisis preciso de la calidad del aire y sus implicaciones en salud y medio ambiente (Fernández Maestre, 2012). Los sensores utilizados para medir las partículas del aire son importantes en la evaluación de la calidad del aire y la detección de la contaminación ya que utilizan técnicas ópticas, láser, de fluorescencia, de tunelización y otras para estimar la concentración de partículas suspendidas.

5.5.3. Rangos de Alerta

Es fundamental estar atentos a los rangos de alerta de material particulado, ya que niveles elevados pueden aumentar el riesgo de problemas respiratorios como infecciones respiratorias y empeorar las condiciones de salud existentes. La Tabla 5 muestra los riesgos y subraya la importancia de monitorear los niveles de material particulado para proteger la salud pública.

Tabla 5

Niveles de material Particulado

Nivel de categoría	Concentración de PM 2.5 ug/m3	Concentración de PM10 ug/m3	Impacto en la salud
Bueno	0-30	0-50	Mínimo
Satisfactorio	31-60	51-100	Molestias respiratorias leves para personas sensibles.
Moderadamente contaminado	61-90	101-250	Molestias respiratorias para pacientes con asma, ancianos y niños.
Malo	91-120	251-350	Malestar respiratorio para todos.
Muy malo	121-250	351-430	Enfermedad respiratoria por exposición prolongada.
Severo	250+	430+	Impacto en la salud incluso con trabajos físicos ligeros. Grave impacto en personas con enfermedades cardíacas o pulmonares.

Nota: Representación gráfica de la tabla tomada de (airveda, 2018)

Con base en la información presentada en este capítulo, se establecen los rangos de medidas de las variables con ayuda de los rangos de alerta presentados, los cuales se han organizado en la Tabla 6 que establece el rango mínimo para cada una de las variables a usar. Estos valores se considerarán de forma primordial al seleccionar los sensores apropiados para el proyecto, ya que es fundamental que los sensores elegidos tengan la capacidad de medir dentro de estos rangos específicos. Además, se requiere que los sensores mantengan un alto nivel de precisión y exactitud en las mediciones realizadas, garantizando así la fiabilidad de los datos obtenidos debido a su importancia mencionado en la sección 3.

Tabla 6

Niveles de rango de los sensores

Variable	Rango de medición
Temperatura	-40 a 125
Humedad	0 a 100%
Índice de UV	1 a 11+
Material Particulado	0 a 500+ ug/m ³
Dióxido de carbono	100 a 2000+ ppm

Nota: Valores de los sensores para la estación EMA.

6. Proceso de Diseño

En este capítulo se explorará a detalle cada una de las etapas llevadas a cabo durante el proceso de diseño, desde la definición de los requerimientos básicos necesarios en el proyecto, la selección de los componentes hasta la culminación de los diseños necesarios para la construcción e implementación de todos los subsistemas. Es importante destacar que este proyecto no existe desde un vacío aislado, se basa en todos los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera y se nutre de proyectos previos como el proyecto de clase de la materia instrumentación electrónica donde desde la existencia de esta propuesta de trabajo de grado se realizaron trabajos conjuntos con los estudiantes para la elaboración de estaciones de monitoreo básicas e ir las mejorando en conjunto y los conocimientos de la comunidad que fueron presentados en la sección 4.

6.1. Requerimientos del Sistema

La construcción de una estación de monitoreo de variables medioambientales completamente funcional requiere del análisis previo sobre donde se realiza la medición de los datos, cuál será su método de comunicación y a donde serán enviados para hacer un análisis.

6.1.1. Requerimientos de Costo

Debido a los altos costos de los instrumentos para la medición y monitoreo de las variables medioambientales y contaminación del aire de las ciudades nuestro desarrollo de la estación de monitoreo no debe exceder el 1'500.000 pesos colombianos, ya que este es un costo bajo teniendo en cuenta que existen en el mercado desarrollos que pueden alcanzar hasta los 3.000 USD (dólares estadounidenses). Este requerimiento de costo lo que busca es poder desarrollar un sistema económico y capaz de tomar datos de alta calidad.

6.1.2. Restricción del Hardware

Para establecer los requerimientos de hardware se requiere tener en cuenta a qué condiciones estará sometida la estación EMA, es por esto por lo que se plantean los siguientes requerimientos: Los sensores deben tener una buena precisión y rango de lectura, el voltaje de consumo de los componentes no debe exceder los 5 voltios, el microcontrolador debe contar con una antena incorporada en su PCB, la incorporación de un sistema de carga y descarga de baterías y conexión de conectores estable.

6.1.3. Restricciones del Software

Los requerimientos de software se establecen a partir de la necesidad almacenar todos los datos de la estación de monitoreo para su posterior análisis y desarrollo de tecnología IoT, la visualización de estos mediante una interfaz gráfica amigable con los usuarios y un aplicativo móvil que permita la interacción con la estación y la visualización de los datos en tiempo real. Por lo anterior, se establecen los siguientes requerimientos de software: Base de datos que permita la conexión del microcontrolador e interfaz gráfica y la conexión de más dispositivos para la posterior creación de una red ciudadana de monitoreo ambiental, diseño de un aplicativo móvil que permita interactuar con la estación, interfaz gráfica de la base de datos debe ser amigable con el usuario y almacenamiento de los datos con marcador de tiempo y ubicación geográfica.

6.1.4. Restricciones Estructurales

La ubicación espacial de todos los componentes que integran nuestra estación EMA también es parte fundamental para obtener un buen producto final, teniendo en cuenta que las estructuras se encontraran tanto en entornos interiores como los hogares y en entornos exteriores a la intemperie. Por lo anterior, se plantean los siguientes requerimientos estructurales: Tamaño estructura de interiores no mayor a 100 [mm^3], Tamaño estructura para exteriores no mayor a 200

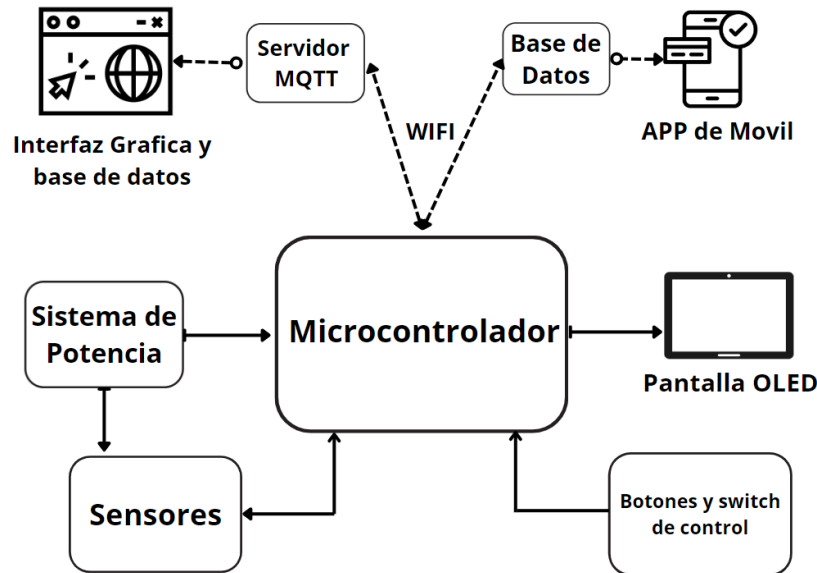
[mm^3], Las dos estructuras deben contar con ventilación directa a los sensores, el uso de materiales se limita a impresión 3D y corte laser de acrílico, el diseño debe permitir el acople de la estructura de interiores dentro de la estructura para exteriores y la estructura para exteriores debe tener un acople para tornillo universal tipo trípode.

6.2. Arquitectura General del Sistema

En esta sección, presentaremos la estructura principal que servirá como base para elegir los componentes y accesorios de la estación EMA como se muestra en la Figura 5. El componente central de la estación EMA será un microcontrolador, que se seleccionará más adelante. Este microcontrolador debe tener la capacidad de conectarse a un servidor o una base de datos a través de MQTT y enviar datos tanto a la interfaz gráfica como a la aplicación móvil haciendo que el proyecto tenga características de un dispositivo IoT.

Los sentidos de EMA se basarán en sensores que deben cumplir con los requisitos de bajo consumo y bajo costo, además de poseer las mejores características que se adapten a nuestro sistema. También se incluirá una pantalla OLED para visualizar los datos localmente, sin necesidad de consultar la aplicación o la interfaz en línea, lo que proporciona una ventaja al verificar su funcionamiento.

Además, se incorporarán botones para realizar acciones específicas, cuyas funciones se definirán en la sección de diseño. Por último, el sistema de alimentación será el núcleo de EMA, ya que debe proporcionar energía tanto al microcontrolador como a los sensores y la pantalla. Los detalles específicos se abordarán más adelante en la sección 6.3.2

Figura 5*Arquitectura general*

6.3. Análisis y Método de Selección de Componentes

El método de análisis y selección de componentes es un proceso importante en el diseño de sistemas para la identificación y selección de elementos teniendo en cuenta lo anteriormente presentado en la sección 5 y el resumen de la Tabla 6. Este proceso es fundamental para la funcionalidad, la eficiencia y el rendimiento óptimo en los componentes de la estación meteorológica para los requisitos como temperatura, humedad, material particulado, dióxido de carbono y radiación solar. Durante el proceso, el análisis se realiza en una estructura matricial, por lo que se dividió en 3 niveles de puntaje evidenciados en la Tabla 7 donde se tendrá un puntaje de 1 si se considera bajo, 2 para medio y 3 para alto, donde el valor más apto para nuestro proyecto es 3 y el valor más bajo es 1. El valor N/A será tomado como 0 en valor numérico.

6.3.1. Estructura General y Aplicación de las Matrices de los Componentes

La Tabla 7 muestra el formato a usar durante la selección de los componentes que conformarán la estación de monitoreo, en donde se tendrán los criterios básicos de precio, rango de medición de los sensores, precisión, resolución, voltaje de alimentación y el tipo de comunicación por la cual serán enviados los datos al microcontrolador. Además, se podrán añadir o eliminar criterios según corresponda para cada componente de la estación.

Tabla 7

Matriz de selección General

Criterios de selección	Sensor X			
	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor X
Precio	X - bajo	-	-	-
Rango	-	-	-	X - medio
Precisión	-	-	-	-
Resolución	-	X - alto	-	-
Voltaje de Alimentación	-	-	-	-
Comunicación	-	-	-	-
Total	-	-	-	-

Como se puede observar en la Tabla 8 , la selección del sensor de CO2 se decantó por el MH-Z1311A sensor que permite realizar mediciones tanto en interiores como en exteriores gracias a su rango de detección que inicia desde la 0 ppm y su alta precisión comparada con los otros dos sensores. Una desventaja de este sensor es su voltaje de alimentación de 5 voltios que se puede suplir con un regulador extra en el circuito de control. También se destaca su método de

comunicación UART o serial con el microcontrolador permite que mediante software se pueden simular puertos seriales para recibir de una mejor manera los datos del sensor.

Tabla 8

Matriz de selección sensor de CO2

Criterios de selección	Sensores CO2		
	MH-Z19B	MH-Z1311A	MH-Z14B
Precio	13.5 USD alto	39 USD medio	71 USD bajo
Rango	400-1000 ppm medio	0-10000 ppm alto	400-10000 ppm medio
Precisión	50 ppm+5% lectura bajo	30ppm+3%lectura alto	50 ppm+5% lectura bajo
Resolución	1 ppm alto	1 ppm alto	1 ppm alto
Voltaje de Alimentación	5 voltios medio	5 voltios medio	5 voltios medio
Comunicación	UART medio	UART medio	UART medio
Total	13	15	11

En la Tabla 9 se relacionan 3 referencias distintas para el sensor de radiación UV, esta selección se decantó por el sensor VEML-6075 que permite realizar las mediciones de la radiación en su forma de índice, también es el sensor más especificado en su hoja de datos con un valor intermedio entre las 3 opciones, cuenta con su interfaz I2C de comunicación que facilita la obtención de los datos a una velocidad superior a la comunicación serial y por ultimo su alimentación de 3.3 voltios permite que sea integrada una batería de menor voltaje para su alimentación.

Tabla 9*Matriz de los sensores de Radiación Solar (UV)*

Criterios de selección	Sensores de UV		
	ML8511	VEML-6075	GUVA-S12SD
Precio	6.35 USD alto	11.17 USD medio	5.9 USD bajo
Rango	280-390nm bajo	0-11+ UVI alto	0-11+ UVI alto
Precisión	10% lectura bajo	$\pm 10nm$ alto	No especificado
Resolución	No especificado	16 bits alto	No especificado
Voltaje de Alimentación	3.3 voltios alto	3.3 voltios alto	3.3 voltios alto
Comunicación	I2C alto	I2C alto	I2C alto
Total	11	17	9

La selección del sensor de temperatura y humedad que se puede ver en la Tabla 10, se decantó por el sensor SHT-21 que se caracteriza por su amplio rango de valores en temperatura, también por su alta resolución y precisión comparadas a diferencia de los 2 sensores adicionales. Es un sensor que cuenta con su interfaz I2C lo que facilita la comunicación con el microcontrolador. No se contempla el uso del sensor DHT11 debido a sus bajos rangos en resolución, precisión. Por otro lado, el sensor BME-280 tienen un costo más alto y un rango reducido para la variable de temperatura, estos dos sensores no encajan en nuestro proyecto ya que se quiere la mayor funcionabilidad con relación a su precio.

Tabla 10*Matriz de los sensores de Temperatura y Humedad*

Criterios de selección	Sensores de Temperatura y Humedad		
	SHT-21	DHT-11	BME-280
Precio	3.8 USD medio	2 USD alto	9.27 USD bajo
Rango temperatura	-40 a 125 °C alto	0 – 50 °C bajo	-40 a 85 °C medio
Rango humedad	0 – 100 % alto	20 – 90 % bajo	0 – 100 % alto
Precisión	±0.5°C y ±2% alto	±2°C y ±5% bajo	±1°C y ±3% medio
Resolución	0.01°C y 0.04% alto	1°C y 1% bajo	0.01 °C y 0.008% alto
Voltaje de Alimentación	3.3 voltios alto	3.3 voltios alto	3.3 voltios alto
Comunicación	I2C alto	UART medio	I2C alto
Total	20	12	17

Para la selección del sensor de material particulado se da la particularidad de tener dos sensores con la misma puntuación, sin embargo, la decisión final fue tomada teniendo en cuenta el criterio del precio que es considerablemente superior en el sensor SPS30, por lo que la mejor opción para nuestro proyecto será el sensor PMS5003 que permite medir los 3 diferentes tamaños de partículas con una precisión alta y confiable.

Tabla 11*Matriz de los sensores de Material Particulado*

Criterios de selección	Sensores de Temperatura y Humedad		
	ZH03B	SPS30	PMS5003
Precio	11 USD alto	61,95 USD bajo	33,52 USD medio
Rango	0-1000 ugr/m^3 alto	0-1000 ugr/m^3 alto	0-1000 ugr/m^3 alto
Precisión	0~100 $\mu g/m^3$: $\pm 15\mu g/m^3$ 101~1000 $\mu g/m^3$: ± 15 %reading bajo	0~100 $\mu g/m^3$: $\pm 5\mu g/m^3$ 101~1000 $\mu g/m^3$: ± 10 %reading alto	0~100 $\mu g/m^3$: $\pm 10\mu g/m^3$ 101~1000 $\mu g/m^3$: $\pm 10\%$ reading alto
Resolución	0.3~10 μm alto	0.3~10 μm alto	0.3~10 μm alto
Voltaje de Alimentación	5 voltios medio	5 voltios medio	5 voltios medio
Comunicación	UART medio	UART/I2C alto	UART medio
Total	14	15	15

Con gran diferencia resalta el módulo ESP32-WROOM en la Tabla 12 esta nos permitirá realizar los diferentes tipos de comunicaciones necesarias ya sean alámbricas o inalámbricas. También nos aporta su facilidad de procesamiento con dos núcleos y su memoria RTC que será usada para guardar datos necesarios si el microcontrolador se envía a modo apagado para ahorrar energía de la batería. Por todo lo anterior, el módulo ESP32-WROOM se adaptará de manera óptima a nuestro proyecto.

Tabla 12*Matriz de los microcontroladores*

Criterios de selección	Microcontroladores		
	Atmega328p	Seed xiao ESP32-C3	ESP-32 WROOM
Precio	9.9 USD medio	18.35 USD bajo	6.1 USD alto
Numero de núcleos	1 bajo	2 alto	2 alto
Memoria Flash	0.032 MB Bajo	4MB alto	4MB alto
Memoria SRAM	2 KB bajo	400KB alto	532.48 (520KiB) alto
SRAM RTC	N/A	8 KB medio	16 KB alto
Voltaje de Alimentación	5 voltios medio	3.3 voltios alto	3.3 voltios alto
WiFi	N/A	2.4GHz alto	2.4GHz alto
I2C/UART	I2C/UART alto	I2C/UART alto	I2C/UART alto
Total	10	21	24

6.3.2. Base de Datos y Elementos Secundarios para la Interacción con el Sistema

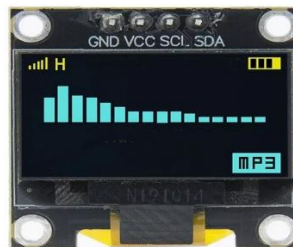
La base de datos es un componente fundamental en el proyecto, en esta serán almacenados todos los datos enviados por la estación para su posterior análisis. Es por esto por lo que se opta por usar los servicios de adafruit io en donde no solo se podrán almacenar los datos en sus servidores, también se podrán realizar diferentes interfaces para la visualización del histórico con gráficas y elementos ilustrativos para el mejor entendimiento de la información. Además, se podrán incorporar en estas mismas graficas datos de otros dispositivos y poder ver todo en un solo entorno que puede ser usado para la creación de la red de monitoreo ambiental.

Además de esta base de datos, para la implementación del aplicativo móvil y tener los últimos datos tomados por la estación, enviar la ubicación desde el dispositivo móvil y generar acciones sobre la misma, se cuenta con el servicio de FireBase de Google el cual permite guardar variables en tiempo real y generar cambios que pueden ser captados desde el aplicativo móvil como desde la estación.

Los elementos secundarios de hardware permiten la interacción de los usuarios con la estación, por lo que se selecciona una pantalla que se puede ver en la Figura 6 para la visualización en tiempo real de los datos que son enviados a la base de datos, así mismo se añadirá un arreglo de botones que permitan ejercer control sobre algunas variables de la estación.

Figura 6

Imagen de la pantalla OLED.



Con todos los elementos y dispositivos que se utilizarán en la estación EMA podemos construir una arquitectura para los diferentes subsistemas que componen la estación. Estos subsistemas son el de potencia, el de sensores y el de conexión entre la estación y la aplicación móvil/interfaz gráfica. A lo largo de este proceso, realizaremos un recorrido por cada uno de ellos.

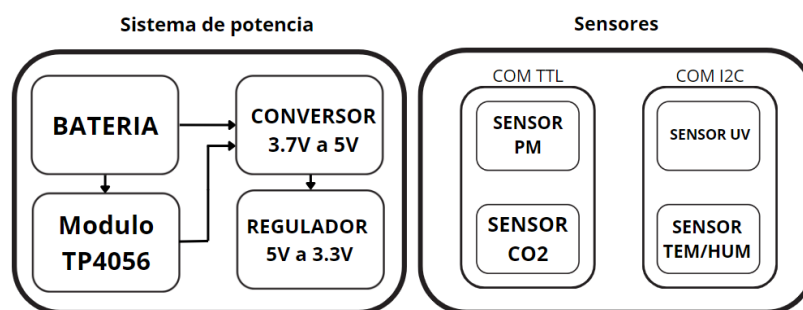
En la Figura 7, se destacan dos subsistemas de gran importancia: el subsistema de Potencia y el de Sensores. Empezaremos con el subsistema de Potencia, que consta de una batería. Esta batería asegurará que la estación siga funcionando en caso de un corte de energía o cuando sea necesario realizar mediciones en lugares sin acceso a la red eléctrica. La batería es recargable

mediante un módulo de carga equipado con el chip TP4056. Además, este subsistema incluye un conversor elevador DC-DC que transforma la tensión de 3.7V a 5V. Esto es necesario para alimentar los sensores de CO₂ y de Material Particulado. Luego, se regula el voltaje de 5V a 3.3V para suministrar energía al módulo ESP32-WROOM, la pantalla OLED, los sensores de temperatura y humedad, así como el sensor de radiación UV.

La Figura 7 también nos muestra el subsistema de Sensores, que se basa en dos protocolos de comunicación distintos utilizados por cada sensor. Los sensores de CO₂ y de Material Particulado utilizan una comunicación TTL, que es una comunicación serie entre solo dos dispositivos. Esta es una de las razones por las cuales se utiliza el módulo ESP32, ya que mediante software se pueden configurar los pines para funcionar como puertos seriales, lo que permite conectar varios dispositivos seriales sin necesidad de un módulo externo. Por otro lado, los demás sensores utilizan una comunicación I2C, que también es serial, pero permite conectar varios dispositivos en un bus de dos líneas (SDA y SCL). Sin embargo, solo un dispositivo puede transmitir a la vez, mientras que los otros escuchan. Para que cada dispositivo sepa hacia dónde va la información, se utilizan direcciones individuales para cada uno. Gracias a este bus de datos, se puede añadir la pantalla OLED al mismo, lo que permite diseñar una PCB más compacta.

Figura 7

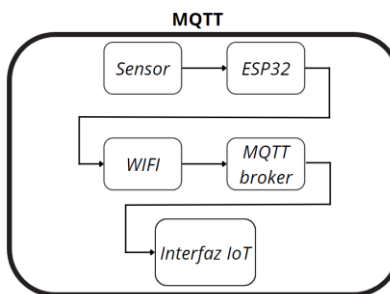
Subsistema de potencia y subsistema de sensores.



Por último, en la Figura 8, encontramos el subsistema encargado de la comunicación con las bases de datos, que utiliza el protocolo MQTT. Este protocolo es excelente para reducir el tráfico de datos, lo que lo hace ideal para dispositivos enfocados en Internet de las cosas (IoT) que están conectados a la misma red. En este sistema, los sensores envían datos al módulo ESP32, que utiliza el estándar 802.11 (Wi-Fi) para el envío de los datos por medio del protocolo MQTT a un "bróker" o servidor donde se almacenan. Luego, estos datos se utilizan para su publicación en una interfaz IoT o se envían a una aplicación móvil según sea necesario.

Figura 8

Subsistema de comunicación.

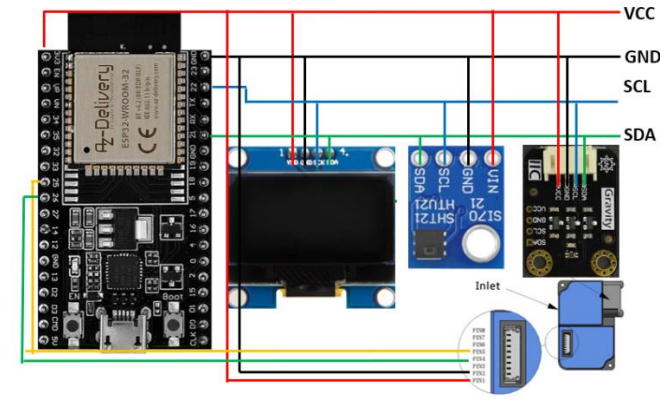


6.4. Diseño del Circuito Integrado PCB

Teniendo en cuenta cada una de las restricciones antes mencionadas y las necesidades de cada uno de los componentes seleccionados y los protocolos necesarios para la recepción de los datos por el microcontrolador, se inicia con el proceso de diseño del circuito impreso o PCB teniendo en cuenta el diagrama visto en la Figura 9 con la ayuda de diferentes softwares de diseño donde se realizarán los cambios necesarios para enviar a su fabricación.

Figura 9

Diagrama de conexión de todos los elementos a usar.



Nota: Este diagrama permite ver de forma sencilla la conexión entre los sensores, el sistema de potencia y la ESP32.

Los diseños realizados previos a la versión final que se pueden evidenciar en el Apéndice B son insumos para el diseño de la versión final, ya que nos permitieron corregir errores significativos dentro del programa y experimentar con diferentes microcontroladores como lo fue el diseño con la seeed xiao esp32-c3 el cual es muy versátil y funcional, ya que incorpora un cargador para baterías lipo 1s pero no cuenta con las suficientes protecciones dentro de la misma placa y la convierte en un microcontrolador para un uso muy limitado.

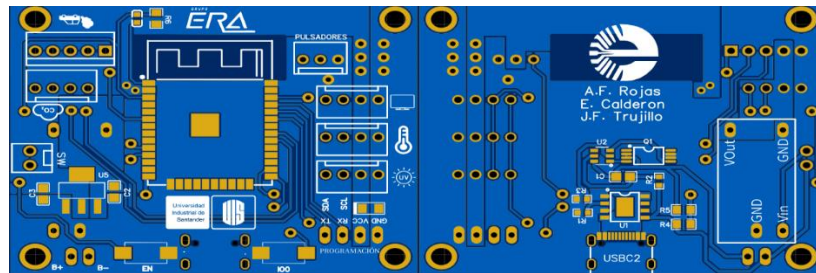
6.4.1. Diseño con Modulo ESP-32 WROOM

Una vez analizadas las necesidades reales de cada uno de los sensores, el microcontrolador y la pantalla oled en sus etapas de alimentación, se realiza en nuevo diseño de la placa PCB que integra reguladores de tensión a 3.3 V y a 5 V necesarios para la alimentación de los sensores y el microcontrolador usados. También integra conectores robustos para generar conexiones seguras y un puerto de pines para la comunicación serial de la ESP32 con el computador mediante un módulo externo que convierte de USB a TTL. Además, en la Figura 10 se pueden ver las capas superior e

inferior de la placa PCB donde se integran los componentes ya mencionados y además se incorpora un circuito de carga y descarga de baterías de lipo 1s TP4056 que suministrara tanto la carga de la batería como la alimentación sin batería de todo el circuito.

Figura 10

Diseño final con ESP-32 WROOM



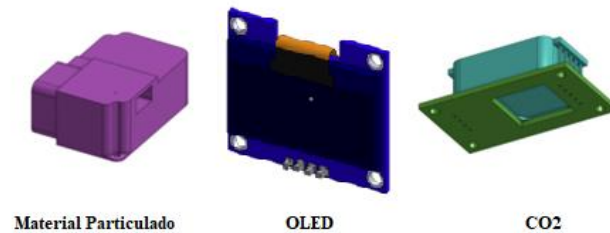
Nota: Imagen extraída del programa EasyEDA, en este diseño más complejo de la electrónica de la estación se incorporan reguladores para la tensión necesaria de cada uno de los componentes, también cuenta con módulo de carga y descarga.

6.5. Diseño Estructural

Una parte importante de todo producto es su estructura y como en ella se integran todos los componentes necesarios para que su funcionamiento sea optimo, es por esto que en la Figura 11 resaltamos los componentes más grandes que se incorporan en el proyecto para iniciar nuestro proceso de diseño estructural primero se deben dimensionamos los componentes internos de la estación para así tener un punto de referencia de cuál sería el tamaño aproximado necesario para iniciar a trabajar dentro del programa CAD utilizado.

Figura 11

Diseño CAD de los sensores de material particulado y CO2



Decidimos dividir el diseño de la estación EMA en dos categorías, ya que nuestra estación de monitoreo puede funcionar tanto en interiores como en exteriores. Esto nos permite abarcar ambos segmentos de mercado. Generalmente, en el mercado, los productos están diseñados específicamente para su uso en interiores o exteriores, pero no suelen ser versátiles para adaptarse a ambos entornos. Nuestra estación EMA será única en ese sentido, ya que puede ser utilizada en ambas situaciones. Esta flexibilidad nos permitirá crear una red de estaciones más amplia, independientemente de cómo se vaya a utilizar cada estación.

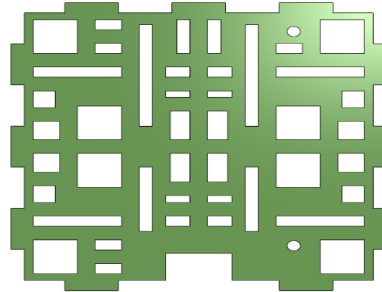
Esta división de diseño nos permitirá crear un producto que sea adecuado y estético para su uso en interiores en un hogar, al mismo tiempo que es lo suficientemente resistente y protegido para soportar las condiciones exteriores.

6.5.1. Diseño para Interiores

El diseño para interiores se dimensiono sobre un cubo de $80 [mm^3]$ en donde se integrarán los componentes vistos en la Figura 11, también teniendo en cuenta que la estación necesita ventilación natural se selecciona un patrón geométrico asimétrico que permita la toma directa de datos por los sensores como se puede observar en la Figura 12.

Figura 12

Diseño final de la ventilación en las paredes de la estación.

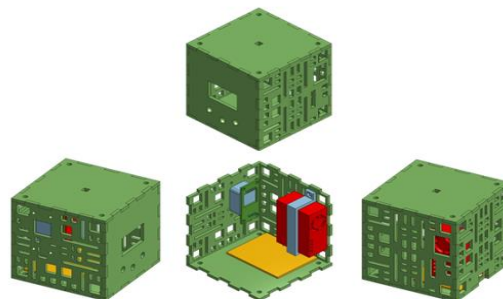


Nota: Patrón seleccionado de formas rectangulares ya que los agujeros de toma de datos serán de forma rectangular.

Teniendo en cuenta lo anterior, se decide realizar el diseño de la estructura para interiores en placas separadas para ser ensambladas en un cubo pensando en el próximo proceso de implementación que será llevado a cabo mediante el corte laser de láminas acrílicas de 3 [mm] de espesor. La Figura 13 cómo será la ubicación espacial de cada uno de los componentes más grandes del proyecto dentro de la estructura para interiores.

Figura 13

Vista isométrica del ensamblaje y ubicación de los sensores y la PCB

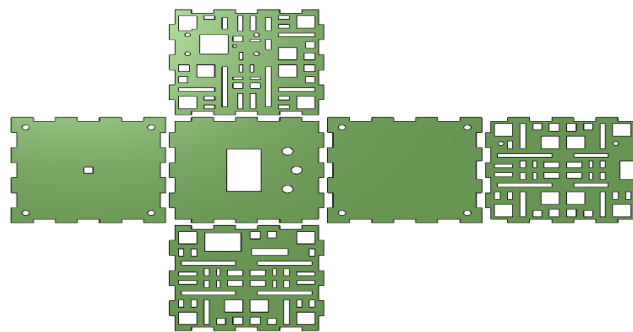


Nota: En la imagen se puede observar como el programa de diseño permite visualizar el resultado final con todos los componentes ubicados en su espacio asignado.

Para visualizar de una mejor manera la estructura para interiores, se realiza un despliegue de piezas que se evidencia en la Figura 14 de cada una de las caras que conformaran el cubo de la estación de monitoreo, este despliegue también se realiza con el fin de tener una referencia de tamaño para la compra del material que será cortado a laser.

Figura 14

Plano estructura para interiores.



Nota: La imagen muestra el plano completo de la estructura base de la estación EMA para ser cortado en acrílico de 3[mm] de espesor y ser ensamblado para formar un cubo de 80 [mm] de lado.

Además de la estructura vista anteriormente, se adicionará un complemento impreso en 3D que cumplirá la función de dar una vista más estética a la estructura para interiores y protegerla de golpes. La Figura 15 muestra el diseño de la recubierta, se divide en dos partes para permitir un mejor ensamblaje con la estructura cortada a laser y poder realizar un mejor trabajo de impresión.

Figura 15

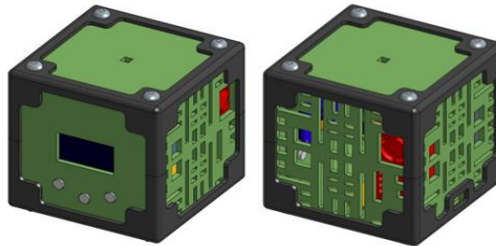
Rediseño de la recubierta.



La integración final de todos los componentes y el resultado final de la estructura para interiores esperado se puede observar en el modelo CAD de la Figura 16, en este modelo se ajustaron todas las tolerancias de las maquinas que se usaran para la elaboración de cada una de las piezas y que puedan encajar para llegar al resultado esperado.

Figura 16

Integración final de todos los componentes de la estructura para interiores.



Nota: Al finalizar el proceso de la implementación se espera tener un resultado igual al visto en la imagen usando las herramientas disponibles en la universidad.

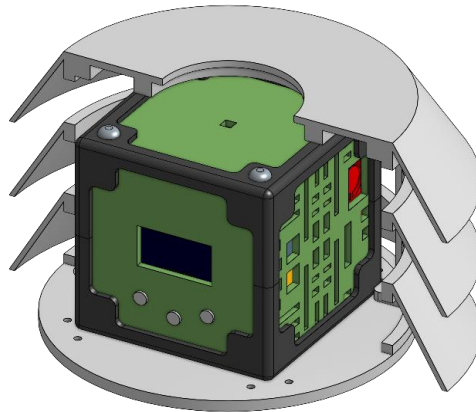
6.5.2. Diseño para Exteriores

El componente estructural más importante del proyecto se enfoca en realizar mediciones del medio ambiente con alta seguridad para que todos los componentes electrónicos de nuestra estación EMA se vean protegidos a las condiciones climáticas como la lluvia o la radiación directa

del sol. La creación de una recubierta para exteriores donde se pueda introducir el diseño de la estructura para interiores completa y pueda tomar datos en el exterior sin ninguna afectación ambiental. Para reducir la radiación solar y proteger de la lluvia nuestra estación EMA se usará una pantalla de Stevenson (Buisan, Azorin-Molina, & Jimenez, 2015) adaptada de forma circular como se aprecia en la Figura 17 de color blanco para proteger del exceso de radiación que pueda generar calentamiento de nuestra estación y con una buena distribución de las aletas para que la lluvia no ingrese y dañe los elementos electrónicos internos y permita un buen flujo de aire.

Figura 17

Integración de la estación EMA con la recubierta para exteriores.



Nota: Imagen Final del proyecto.

En la Figura 17 también se puede apreciar cómo es la integración de la toda la estructura para interiores dentro de la estructura para exteriores donde encajara de una manera segura y quedara protegida de las condiciones ambientales externas que puedan provocar daños a los componentes internos de la estación. Además, se diseñó la parte inferior para que se acople dentro del plástico de la impresión una tuerca común en los acoples para trípodes y así poder tener un soporte universal.

6.6. Diseño del Aplicativo Móvil e Interfaz de la Base de Datos IoT

Como se vio en la sección 6.1.3 los diseños deben contar con los parámetros que se definieron anteriormente para así poder llegar a obtener una interfaz y aplicativo móvil más amigable para el usuario y funcional.

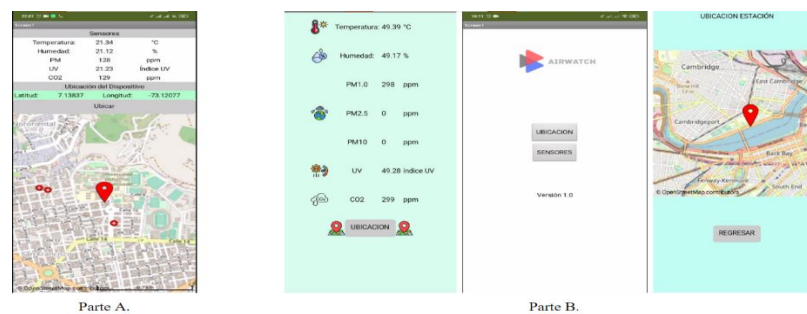
6.6.1. Aplicativo Móvil

Para el diseño de un aplicativo móvil se optó por usar App inventor que es un sistema que permite realizar una aplicación con una programación en bloques lo cual permite que sea algo más sencillo e intuitivo para la persona que pueda llegar a querer mejorarla, en este aplicativo lo que se busca es poder visualizar si la estación está funcionando de manera correcta sin un historial de datos y poder ubicar la estación por medio del GPS del mismo dispositivo móvil y en llegado caso no sea posible así, se puede introducir manualmente la ubicación de la estación, donde todos los datos serán almacenados en la base de datos Firebase RealTime Data Base de Google.

El primer diseño para nuestra APP se puede ver en la, la Parte A la cual es una aplicación muy sencilla, para luego llegar la segunda versión como se ve en la Figura 18 Parte B, en este diseño se optó por tener separado los valores de los sensores de la ubicación de la estación dando así una mejora en la apariencia visual a toda la aplicación haciéndola más intuitiva para el usuario.

Figura 18

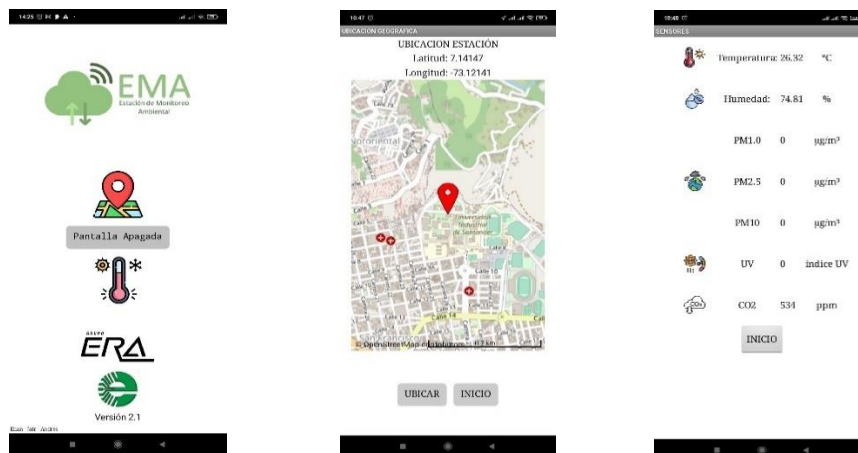
Aplicativo móvil versiones iniciales.



Para el Diseño Final se tomó como base la Figura 18 Parte B, quedando como en la Figura 19 la cual contiene las mejoras que se realizaron a la APP, una de las modificaciones más significativas fue en el apartado de ubicación, donde al ingresar a la pantalla, se pueda ubicar la estación de forma correcta en la última localización de forma automática. en el apartado de INICIO se agregaron los logotipos del Grupo ERA, del Grupo de Investigación CEMOS, el Logo de la estación EMA y por último se establece un pulsador virtual el cual sirve para apagar o prender la pantalla y así prolongar la duración de la batería, también se colocaron iconos para acceder a la pantalla de ubicación y a la de sensores, y las otras dos pantallas solo se mejoró la apariencia visual.

Figura 19

Pantalla de INICIO del aplicativo en la versión 2.1.



Nota: Se puede observar la versión final de la aplicación EMA donde se muestran las 3 pantallas posibles para la app Inicio, Ubicación y Sensores.

6.6.2. Interfaz de la Base de Datos IoT

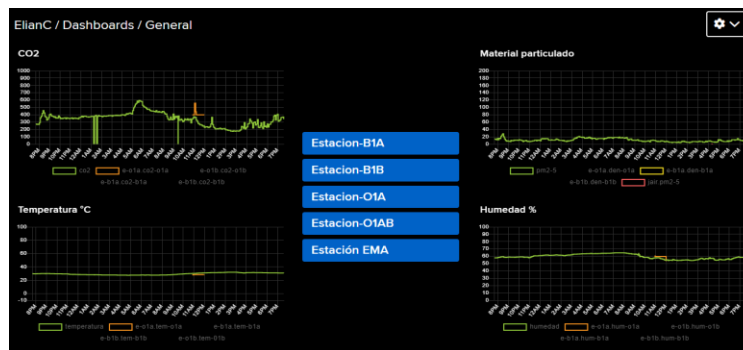
Uno de los servicios adicionales de la base de datos seleccionada es poder realizar diversas interfaces o dashboard para la visualización de los datos que se guardan dentro de la base de datos,

por lo que el diseño de la interfaz visual debe guiarse de las restricciones vistas en la sección 6.1.2 y debe ser visualmente agradable y lo suficientemente clara para la interpretación de los datos. El diseño se divide en dos partes, la primera consta de realizar un dashboard en donde se puedan recopilar los datos de todas las estaciones existentes que se encuentren transmitiendo hacia la base de datos, la segunda parte consta en crear un dashboard individual de visualización para nuestra estación en donde se puedan evidenciar de mejor manera los datos individuales de cada variable y sea más intuitiva la interfaz para una mejor interpretación de los datos.

En la Figura 20 podemos observar un dashboard creado para poder observar en conjunto los datos enviados por cada dispositivo a la base de datos, donde se observan los datos en forma simultánea con marca horaria e indicador de que dispositivo envió dicho dato. También se puede seleccionar la estación que se quiere visualizar los datos para analizar por grafica separadas y un listado que redirigirán a la persona a cada uno de los dashboard individuales de cada dispositivo.

Figura 20

Histórico de las Variables en Adafruit IO



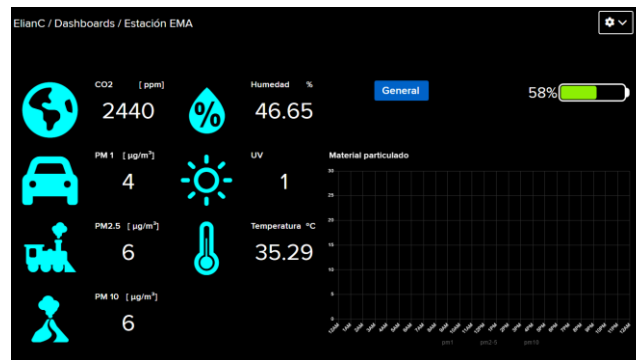
Nota: Imagen extraída de la plataforma Adafruit IO, donde nos muestra el histórico de todas las estaciones conectadas a la red.

Para el diseño del dashboard específico de nuestra estación de monitoreo, decidimos que debía tener un diseño amigable y óptimo para la visualización de los datos, en la Figura 20 se

puede ver el diseño donde cada variable tiene asociada una imagen que ilustra a dato en específico se está monitoreando, también cuenta con un indicativo del porcentaje de la batería de la estación el cual cambia de color dependiendo del valor que tenga en el momento y saber cuándo iniciar el proceso de carga de la batería. Además, se pueden visualizar en la gráfica de la Figura 21 los 3 tamaños de partículas medidas por el sensor de material particulado pasando sobre la ella el cursor del mouse y por último el link que redirecciona al dashboard general de las estaciones.

Figura 21

Diseño Final del dashboard en Adafruit IO.



Nota: Se puede apreciar los iconos de cada variable con su respectivo valor numérico, también se puede apreciar la carga de la batería y una gráfica con el histórico del material particulado el cual es una de las variables más importantes para monitorear.

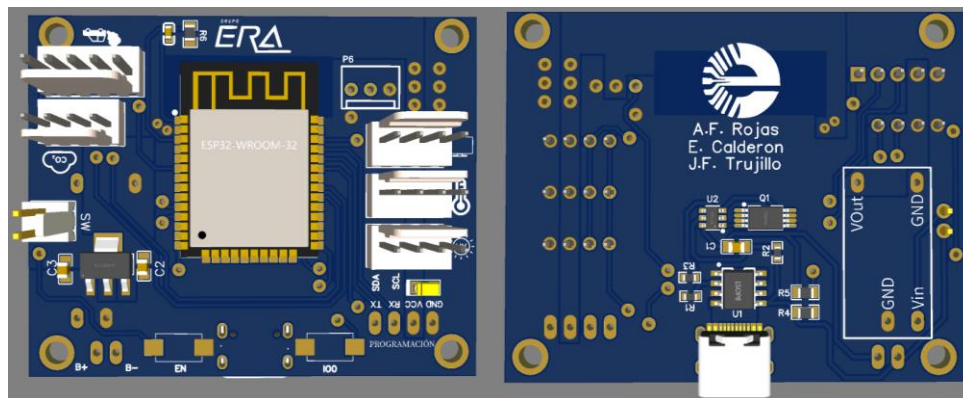
6.7. Diseño Final del Prototipo

Al integrar en un solo conjunto cada una de las partes anteriormente diseñadas y verificadas, se tendrá un producto final que cumpla cada una de las restricciones de diseño establecidas y las necesidades de la estación EMA para la toma de los datos, envío de los mismos a la base de datos y la visualización en la interfaz Iot de la base de datos y el aplicativo móvil.

El diseño completo y la integración de todos los componentes se puede ver en la Figura 17, además la placa PCB que es la parte fundamental del proyecto, ya que se integran los sensores y demás elementos de la estación en un solo sistema embebido que permite la adquisición de los datos y el envío a la base de datos IoT donde se podrán visualizar de una manera más amigable con los usuarios. La Figura 22 muestra el producto final esperado de nuestra placa PCB con todos los componentes necesarios para el buen funcionamiento de todos los sistemas y sensores del proyecto.

Figura 22

Vista 3D del diseño final de la placa PCB.



Nota: En la imagen se puede observar tanto la PCB como la mayoría de los componentes que integran la misma, teniendo en cuenta esta herramienta y la facilidad que nos brinda para ver la organización espacial pudimos llegar a concluir nuestro diseño.

7. Implementación del Prototipo

En la presente sección se realizará la implementación de cada una de las etapas de diseño vistas en la sección 6, este proceso se lleva a cabo desde una etapa de pruebas básicas iniciales para cada uno de los sensores adquiridos y en paralelo se lleva a cabo el proceso de construcción

de las estructuras para validar cada uno de los espacios asignados a cada componente. Además de toda la implementación de la comunicación con la base de datos y la elaboración del circuito que integrara todos los componentes en un sistema embebido.

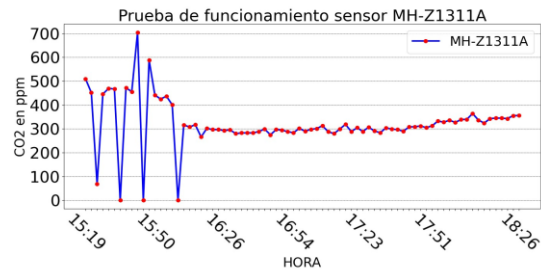
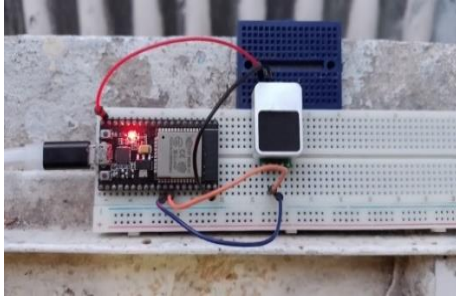
7.1. Implementación del Montaje en Placa de Prueba (PROTOBOARD)

El montaje en protoboard es fundamental para realizar las primeras pruebas de comunicación de los sensores con el microcontrolador, la verificación de su funcionamiento y necesidades de potencia de cada sensor por separado y demás componentes de nuestra estación, a continuación, se podrán ver las diferentes pruebas de funcionamiento y verificación que se realizaron con cada uno de los componentes que se incorporan en nuestra estación EMA.

7.1.1. Implementación de la Comunicación de los Sensores

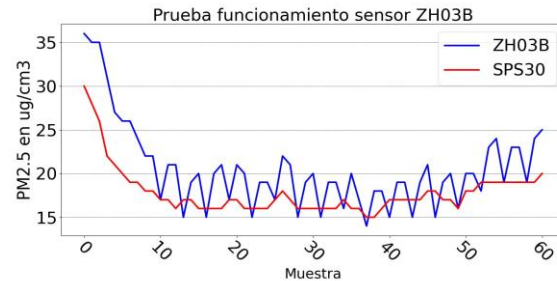
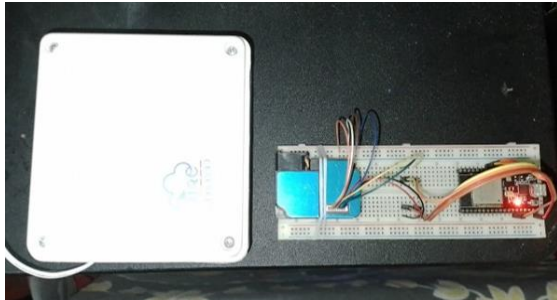
La primera implementación de los sensores seleccionados en la sección 6.3 se realiza usando el módulo ESP32 Dev module y protoboard para la verificación del correcto funcionamiento de la comunicación de los sensores con el microcontrolador y la recepción de los datos. Respecto al sensor de material particulado, en primera instancia se adquiere el sensor ZH03B y luego se cambia al sensor PMS5003 ya que el primer sensor presentaba errores muy grandes en la toma de los datos después de cierto tiempo de funcionamiento.

La primera prueba con el sensor de CO₂ se puede observar en la Figura 23, al inicio de la toma de los datos se nota una gran variación de la variable ya que se estaban realizando ajustes de conexión entre el sensor y la ESP32. A partir de las 16:26 se puede observar la variación del CO₂ en exteriores que se encuentra alrededor de las 400 ppm que es la concentración de CO₂ promedio en exteriores.

Figura 23*Implementación del sensor de CO2 MH-Z1311A*

Nota: En la imagen se puede observar el sensor conectado a la ESP32 por medio de su comunicación serial para la verificación de la correcta recepción de los datos, el muestreo de los datos para esta prueba fue de 1 minuto.

La prueba del sensor de material particulado se realizó al mismo tiempo que el sensor SPS30 de la estación de aire ciudadano como se puede ver en la Figura 24, esto con el fin de verificar el correcto funcionamiento y veracidad de los datos comparándolos con un sensor con mayores capacidades en precisión y exactitud. Como muestra la gráfica, los datos del sensor ZH03B presentan variaciones intrínsecas del sensor por sus componentes, pero sigue la misma tendencia de los datos del sensor SPS30.

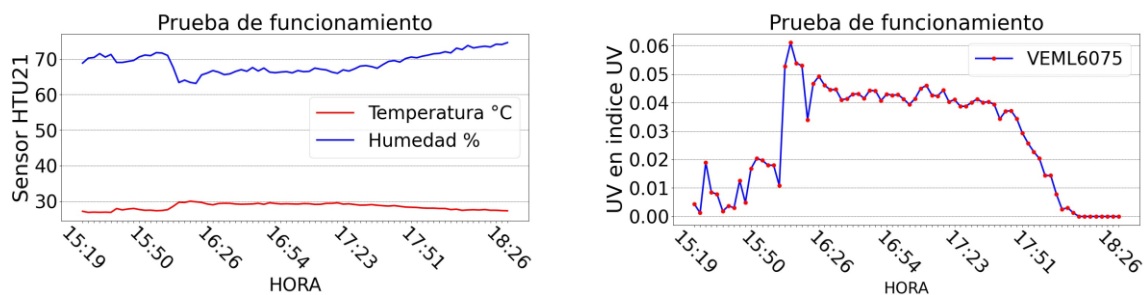
Figura 24*Implementación del sensor ZH03B.*

Nota: En la imagen se puede observar el sensor conectado a la ESP32 y a su lado izquierdo la estación de aire ciudadano que cuenta con el sensor SPS30 para realizar la comparación entre sus tomas de datos y el correcto funcionamiento del sensor ZH03B, el funcionamiento del sensor tomando datos cada minuto durante una hora.

Para la verificación de los sensores de radiación UV VEML6075 y el sensor HTU21 de temperatura y humedad se realiza una prueba de funcionamiento durante 3 horas como se puede ver en la Figura 25, en la gráfica del índice UV se presentan los datos sin redondeo para poder captar las variaciones de la variable por el sensor VEML6075 durante el tiempo de funcionamiento, el sensor de temperatura y humedad de igual manera su funcionamiento es óptimo ya que puede captar las variaciones pequeñas de la variable.

Figura 25

Implementación de los sensores HTU11 y VEML6075



Nota: En la imagen superior se puede observar en 1 el sensor VEML6075 y en 2 el sensor HTU21, el muestreo de los datos para esta prueba fue de 1 minuto.

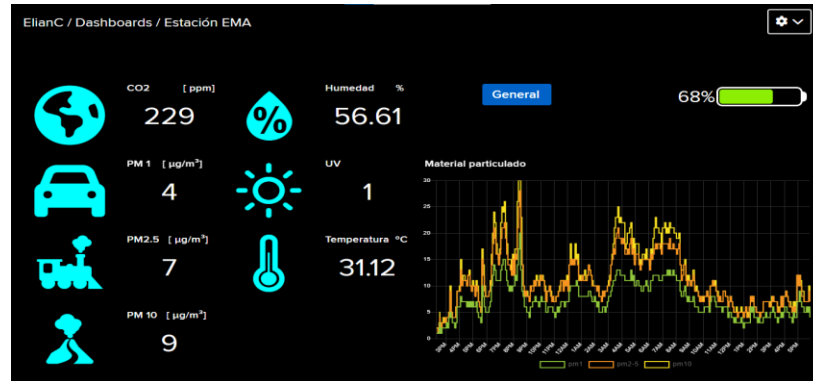
7.1.2. Implementación de la Comunicación a las Bases de Datos

Para implementar las bases de datos al módulo ESP32 se usó el ejemplo que de cada librería, donde se crean dos objetos para cada una de las dos bases de datos, luego se crean las llaves de acceso, después se le asigna a cada uno de los objetos creados previamente, lo siguiente es iniciar el enlace, esto se hace teniendo acceso a internet mediante la librería WIFIManager que nos permite conectarnos a una Red WIFI, luego de iniciar la comunicación la cual hace uso del protocolo MQTT que es el ideal para este tipo de aplicaciones que necesitan un mínimo ancho de banda y reducir los recursos del equipo, este protocolo trabaja bajo el TCP/IP el cual tiene una comunicación bilateral ordenada y sin pérdidas en el envío/recepción de los datos (Chambers, 2021). Con lo anterior observando la Figura 26 y Figura 27 que hacen referencia a la recepción de

los datos enviados desde la ESP32 usando el protocolo anterior, dando, así como resultado un envío correcto y sin perdidas de los datos.

Figura 26

Prueba de comunicación ESP32 y Adafruit IO.



Nota: Imagen extraída de la plataforma Adafruit IO, en esta imagen se visualizan los datos enviados desde la ESP32 los cuales son datos aleatorios generados por software para comprobar que él envió se hace de forma correcta y con ayuda de la gráfica de tiempo se puede determinar que se hace un guardado correcto de los datos.

Figura 27

Prueba de comunicación entre ESP32 y Firebase.

```

https://db-tdg-redmeteo-default-rtdb.firebaseio.com/
└─ Datos
  └─ CO2: 534
  └─ Latitud: "7.14147"
  └─ Latitud, Longitud: "7.10812,-73.14335"
  └─ Longitud: "-73.12141"
  └─ PM: 5
  └─ PM1: 0
  └─ PM10: 0
  └─ PM2_5: 0
  └─ UV: "0.00"
  └─ humedad: "74.81"
  └─ temperatura: "26.32"

```

7.1.3. Implementación de la Comunicación con la Pantalla OLED

Para realizar la implementación de la pantalla OLED la cual hace uso del protocolo I2C, el cual consta de dos líneas SDA y SCL, donde los dispositivos conectados a esta red tienen una dirección única entre cada uno de estos, por lo cual se hace uso del código I2C scanner para poder determinar la dirección de la Pantalla y así poder apuntar a esa dirección y que se reciba la información de la ESP32. Después de esto se hace uso de la librería para OLED que se evidencia en Apéndice A, la cual nos permite incluir imágenes que están en BITMAP como se ven en la Figura 28, a su vez se implementa una secuencia de visualización de los datos por los sensores como se ve en la versión Final del programa exactamente en la Función `MostrarText()` que fue creada por nosotros, para así mostrar una serie de iconos representativos de la variable y el valor de dicha variable cada 5 segundos para así ir cambiando y poder mostrar todos los valores que fueron censados.

Figura 28

Implementación de la Pantalla OLED.



Nota: En la imagen se muestra que la pantalla recibe perfectamente los datos enviados desde la ESP32 y así se nota que la pantalla posee una baja resolución y debido a esto los iconos se ven de forma un poco distorsionados.

7.1.4. Implementación del Aplicativo Móvil

Para la implementación del aplicativo hecho en AppInventor, se usa el apartado de experimentales el cual tiene ya predeterminado el método de comunicación con la base de datos FireBase RealTime DataBase, el cual se agrega al aplicativo y se configura dándole los valores del URL donde está la base de datos, el nombre de la Rama donde están ubicados los datos, y la key de acceso, con esto ya podemos enviar y recibir datos de forma estable, así como se ve en la Figura 29

Figura 29

Implementación entre AppInventor y FireBase.



Nota: Se puede apreciar los diferentes valores para cada una de las variables y su valor correspondiente con su respectiva unidad de medida.

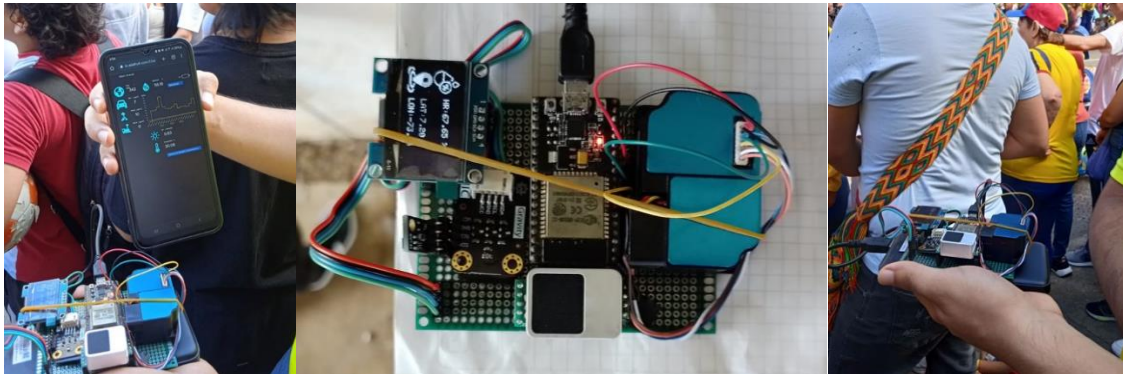
7.2. Implementación en Placa Perforada Universal

Una vez verificado el funcionamiento de cada uno de los componentes de nuestra estación EMA, se realiza una pequeña placa de pruebas como se ve en la Figura 30 que integra todos los componentes necesarios para la toma de los datos. La primera prueba con esta placa fue la

verificación de los datos enviados con los tomados por la estación en tiempo real a la base de datos Adafruit.io, esto fue realizado el día 20 de julio de 2023 en el desfile del día de la independencia en la ciudad de Bucaramanga con él envió de los datos vistos desde la interfaz web que proporciona Adafruit y verificando que los datos enviados vistos en la pantalla oled coincidan con los datos que se muestran en la base de datos.

Figura 30

Prueba de conexiones y comunicación en placa perforada universal



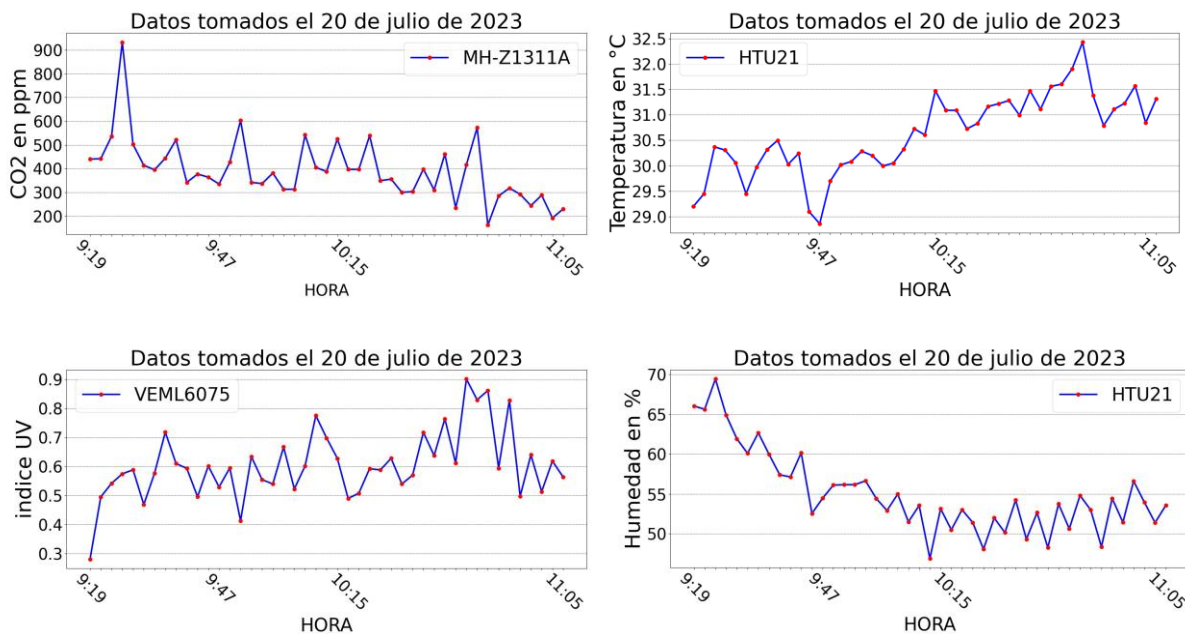
Nota: Tomando el diagrama de diseño de la placa PCB, generamos una placa de pruebas de todos los componentes de la estación para poder observar el comportamiento completo y la recepción correcta de los datos en la base de datos.

Los datos recopilados en este día de pruebas se pueden observar en la Figura 31 donde se relacionan los datos de CO₂, temperatura, radiación UV y humedad tomados en un lapso de 2 horas. La medición de CO₂ aumenta su valor a 900 ppm al momento de estar cerca a las personas y una vez alejados se reduce notablemente, en cuanto a la temperatura se evidencia como avanza el tiempo aumenta su valor alcanzando un pico de 32.5 °C, caso contrario a la humedad que a

medida que avanza el tiempo en minutos cercanos al medio día disminuye su porcentaje. El índice de radiación UV medido no tiene mucha importancia debido a que nos encontrábamos en la sombra.

Figura 31

Datos obtenidos en las pruebas realizadas el día 20 de julio de 2023.

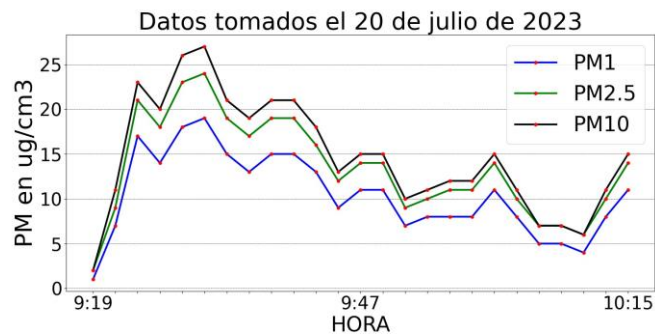


Nota: En la imagen se pueden ver datos relacionados a los sensores de CO2, radiación UV, humedad y temperatura.

La concentración de material particulado en la zona se evidencia en la Figura 32, en ella se puede observar el cambio en los datos tomados por la estación donde siendo las 9:19 am inicia un incremento de las concentraciones hasta alcanzar los 25 ugr/cm^3 de PM2.5, esto debido a que en esos momentos en el desfile militar pasan algunos automóviles que son fuentes de material particulado. Al momento de finalizar el desfile de los automóviles las concentraciones comienzan a disminuir ya que las fuentes de material particulado no se encuentran en la zona.

Figura 32

Datos del material particulado obtenidos el día 20 de julio de 2023.



Nota: En la imagen se relacionan los tres valores de los datos obtenidos por el sensor ZH03B de material particulado durante el desfile del 20 de julio de 2023 en la ciudad de Bucaramanga.

Los datos vistos en la Figura 32 se cortan a la mitad de la prueba de funcionamiento de los sensores el día 20 de julio de 2023, esto es debido a que el sensor ZH03B presento muchas fallas en los datos después de las 10:15 a.m. Este sensor se adquirió para realizar pruebas de funcionamiento de la estación completa mientras se esperaban los tiempos de envío del sensor PMS5003 ya que debido a las fallas en los datos presentadas no se puede incluir el sensor ZH03B en el proyecto.

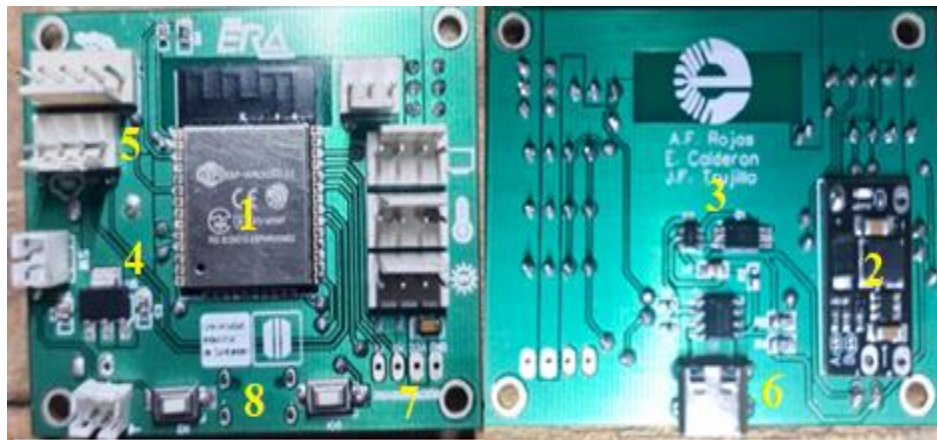
7.3. Implementación en PCB

Al implementar el diseño realizado en la sección 6.4 obtenemos el resultado visto en la Figura 33 donde se pueden observar los diferentes elementos que la componen como lo son en 1 el microcontrolador ESP32-WROOM, en 2 el convertidor DC-DC que eleva la tensión suministrada por la batería a 5 voltios, en 3 se observa el circuito de carga y control de la batería TP4056, en 4 se observa el regular a 3.3 voltios necesarios para la alimentación del microcontrolador y los sensores con comunicación I2C, en 5 se ven los conectores KF2510 que

dan seguridad soporte a las conexiones de los sensores con la placa PCB, en 6 el conector USB tipo C para la alimentación del circuito, en 7 el conector para la programación de la ESP32-WROOM y para finalizar en 8 los pulsadores necesarios para la programación del microcontrolador.

Figura 33

Implementación en placa PCB



Nota: En esta imagen se puede observar la implementación final de la placa PCB con todas las correcciones y componentes necesarios para el buen funcionamiento y comunicación con la base de datos.

7.3.1. Implementación del Sistema de Carga de Batería

Para el proceso de verificación del circuito de carga y descarga de la estación EMA se validó en primera instancia la carga de la batería después de un uso prolongado obteniendo un voltaje bajo de 3.78 voltios y posterior al proceso de carga este valor aumento a los 4.05 voltios lo cual es un indicativo de que la batería de litio está recibiendo el suficiente suministro de energía como para aumentar el voltaje almacenado en esta celda. En la Figura 34 se puede observar el montaje usado para la verificación de la carga de baterías.

Figura 34

Verificación del circuito de carga para baterías de una celda de litio.



El circuito de carga también funciona como una fuente de energía cuando no se tiene conectada la batería.

7.3.2. Implementación del Sistema de Regulación del Voltaje

La verificación del correcto funcionamiento del regulador de voltaje a 3.3 voltios y el convertidor DC-DC a 5 voltios se puede evidenciar en la Figura 35 donde se toma la medida con el multímetro a la salida de dichos componentes con el fin de validar que entreguen correctamente la alimentación a los diferentes componentes que la usan.

Figura 35

Implementación de los circuitos de regulación de voltaje.



Nota: En la imagen se puede ver la toma directa de la tensión en el regulador de voltaje de 3.3 voltios y en el convertidor DC-DC de 5.07 voltios.

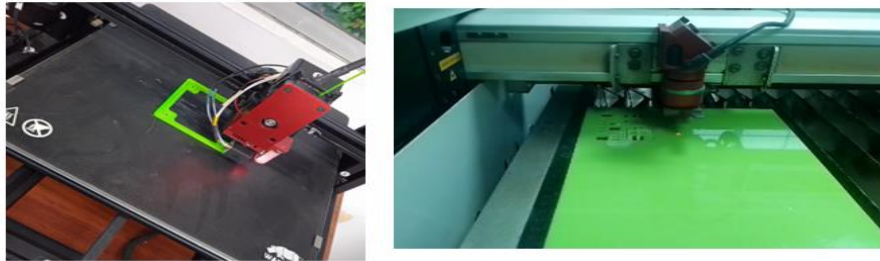
7.4. Implementación de Estructura

La estructura en general se dividió en dos etapas, la primera consta de la elaboración de la estructura para interiores que incluye el corte laser de las paredes de ventilación y la impresión de la recubierta de protección. En la segunda etapa se hará la recubierta para exteriores y su tapa en impresión 3D, todo esto para su posterior validación.

En la Figura 36 se puede ver el proceso de corte laser en acrílico de las paredes de ventilación y la impresión 3D en PLA de la recubierta de protección de la estructura para ser ensambladas y pasar a su posterior validación.

Figura 36

Herramientas usadas en la construcción de las estructuras de la estación EMA.



Nota: La impresión 3D y el corte laser son la base de la construcción de nuestra estación EMA y la manera más eficiente de obtener las piezas en menos tiempo.

7.4.1. Implementación de la Estructura de Interiores

Como fue visto en la Figura 36 la implementación de la estructura para interiores se llevó a cabo con dos materiales diferentes que se integraran para conformar nuestra estructura general para la toma de datos en interiores. La Figura 37 muestra el proceso finalizado del ensamblaje de las paredes de ventilación, se destaca que para este punto los diseños previos se están viendo reflejados en productos finales idénticos a lo esperado.

Figura 37

Ensamblaje de la estructura cortada a laser.



Nota: Después del proceso de cortado obtuvimos la estructura vista en la imagen que fue ensamblada usando un pegamento especial para acrílicos teniendo en cuenta los planos de construcción y la ubicación de cada una de las paredes.

Para la recubierta de protección el proceso de impresión de las dos piezas fue un total de 6 horas con un gasto de material de 45.12 gramos de material al 20% de relleno de la estructura. En la Figura 38 se pueden ver los resultados de la impresión que se ensamblaran posteriormente con el ensamble de las paredes de ventilación de la estación.

Figura 38

Recubierta de protección para la estación impresa en 3D.

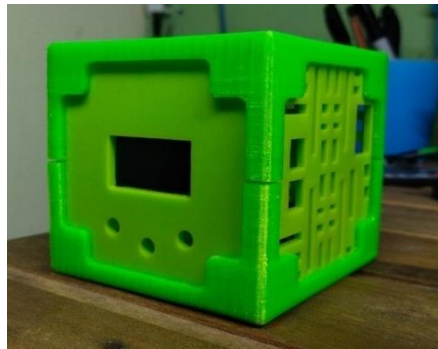


Nota: A diferencia del color, la impresión cumple todas las medidas preestablecidas en el programa de diseño.

Contando con las dos estructuras base de la estación EMA, se procede a realizar el ensamble y verificación de ambas estructuras como se puede ver en la Figura 39. Al momento de finalizar las impresiones 3D quedan algunos restos de material que se deben rectificar antes de encajar todas las piezas y tener el resultado final.

Figura 39

Ensamble de las paredes de ventilación con la recubierta de protección.



7.4.2. Implementación de la Estructura de Exteriores

Al igual que en los procesos de construcción anteriores, la estructura para interiores fue impresa en 3D con material de color blanco para ayudar a reflejar la radiación solar y que la temperatura en el interior de la estación sea acorde con la temperatura ambiente. En la

Figura 40 se puede observar el proceso de impresión y la pieza ya finalizada que cuenta con un buen acabado superficial, esto permite un mejor ensamblaje de la recubierta para exteriores con la estructura vista en la Figura 39.

Figura 40

Recubierta para exteriores impresa en 3D.



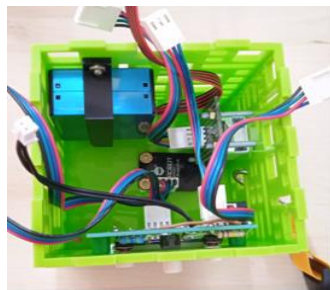
Nota: En la imagen parte B se ve un poco del proceso de impresión llevado a cabo con los soportes para poder imprimir todas las capas superiores, en la parte A se encuentra la pieza ya finalizada lista para ser validada.

7.5. Integración General del Sistema

Finalizados ya los procesos de diseño y la implementación de cada componente por separado, se inicia la integración general de todos los componentes dentro de la estructura para interiores para su posterior validación tanto en ambientes interiores como en ambientes exteriores usando la recubierta para exteriores. En la Figura 43 se ve el resultado de todo el proceso de diseño y selección de cada uno de los componentes y la estructura con una integración exitosa no solo en lo estructural, también en la comunicación con la base de datos y la recepción correcta de los mismos.

Figura 41

Integración de los componentes internos con la estructura para interiores.



A)



B)

Nota: En la imagen A) se puede ver cada uno de los sensores en los espacios asignados, además de los demás componentes seleccionados en el proceso de diseño. En la imagen B se puede ver el montaje final de la estación EMA en su formato para interiores.

De igual forma, se integra la estructura para interiores dentro de la estructura para exteriores como se evidencia en la Figura 42, las estructuras como se esperaba desde el proceso de diseño visto en la sección 6.5 donde también se añade el trípode para soporte de la estación en cualquier superficie de exteriores o en cualquier soporte que cuente con el tornillo universal tipo trípode donde pueda acoplarse la estación.

Figura 42

Ensamblaje de las dos estructuras para toma de datos en exteriores.



Nota: En la imagen se puede ver como la ventilación de la recubierta para exteriores es considerable para que los sensores ubicados en la estructura para interiores tomen datos de manera correcta.

8. Calibración de Sensores

La verificación y calibración de los sensores es parte fundamental del proyecto, ya que permite evidenciar la verdadera veracidad de los sensores adquiridos para el proyecto. A continuación, se presentarán algunos tipos de calibración para sensores utilizados y el método que seleccionamos para la calibración de nuestros sensores.

8.1. Métodos de Calibración

La calibración de sensores es un proceso crítico en la instrumentación y la medición, ya que garantiza que los sensores proporcionen mediciones precisas y confiables. La curva de calibración nos permite determinar sus diferentes valores respecto a los indicados de un sensor Patrón, por lo cual podemos determinar su nivel de confianza mediante el modelo lineal ya sea en

modelo de 2 puntos o de polinomios, tabla de valores, también podemos mencionar la calibración por comparación y software considerando el error generado en cada uno de ellos (Olivieri, 2018).

Utilizar una recta de calibración para descubrir la cantidad de un elemento en una muestra es un ejemplo clave de cómo la regresión lineal puede ser útil. El eje Y representa lo que el instrumento mide y X representa la medición estándar. La calibración de 2 puntos es la forma rápida y efectiva ya que consiste en utilizar dos puntos para ajustar una recta que describe la relación entre los valores a su medición. Existen varios protocolos de calibración que utilizan una tabla de valores que define la correlación entre los valores que se van a medir mediante los valores esperando en una recolección de puntos.

La calibración por comparación es un método esencial para garantizar la precisión de los instrumentos de medición. Durante el proceso, un instrumento se ajusta y para que sus mediciones coincidan con las de un estándar de referencia previamente calibrado y altamente preciso. Esta comparación asegura que los resultados de las mediciones sean confiables y consistentes considerando un análisis mediante ecuaciones o tablas de valores mencionadas anteriormente.

La calibración por software es esencial para garantizar mediciones precisas en dispositivos electrónicos. Se utilizan programas para ajustar y verificar valores de medición, asegurando que se encuentren alineados con estándares conocidos, es fundamental en diversas aplicaciones, desde la industria hasta la investigación científica, donde la precisión es un factor muy importante. La calibración por software ofrece una solución eficiente para mantener instrumentos electrónicos precisos en un mundo cada vez más digital.

8.2. Método de Calibración Usado

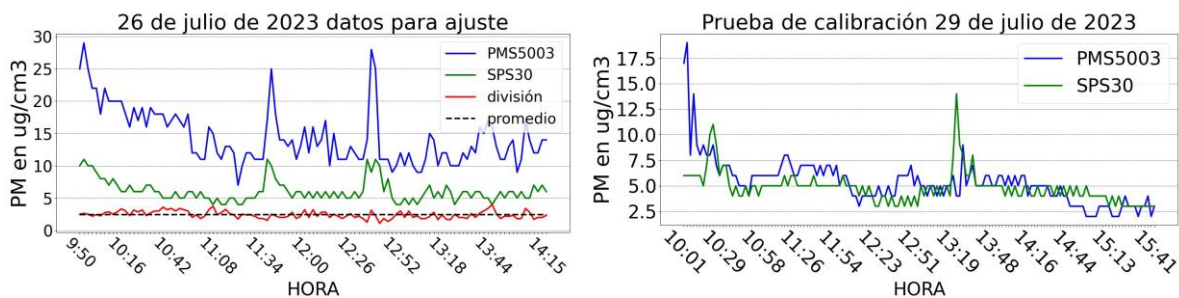
En cuanto a la calibración del sensor de material particulado PMS5003, se realizó usando del método de calibración por comparación ya que contamos con el sensor SPS30 usado en el

medidor aire ciudadano visto en la sección **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** el cual presenta una precisión y exactitud en las mediciones más alta, pero con un costo mucho más elevado.

Se realizan mediciones durante un periodo prolongado de tiempo con los dos sensores en el mismo lugar para garantizar en cierta forma las mismas condiciones, durante este tiempo se evidencia que las mediciones del sensor PMS5003 presentan una tendencia a ser valores dobles con respecto a las mediciones del sensor SPS30 con respecto a los valores de PM2.5, esto se confirma en el cálculo realizado para la verificación en la Figura 43 donde tomamos los datos obtenidos por el sensor PMS5003 y los dividimos entre cada uno de los datos tomados por el sensor SPS30 para evidenciar la gráfica roja y posteriormente realizar el promedio de este proceso para obtener un valor que sea usado para realizar el ajuste del sensor usado en la estación mediante líneas de código. En la Figura 43 también se puede evidenciar el ajuste realizado a los datos de nuestra estación de monitoreo en un periodo de tiempo de 4 horas de toma de datos.

Figura 43

Calibración del sensor PMS5003

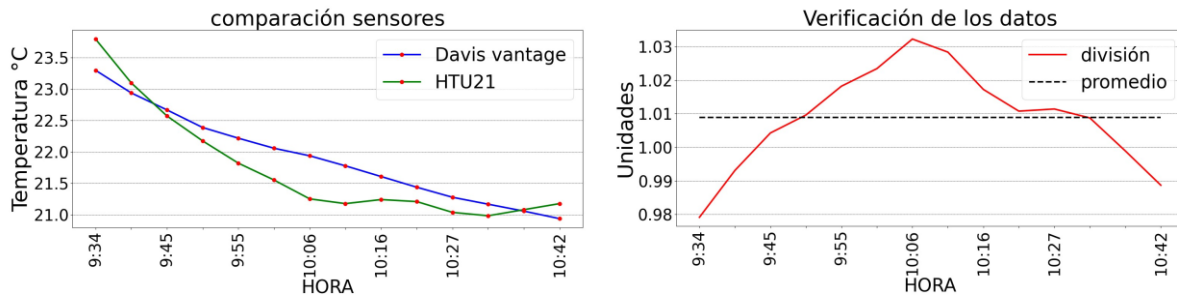


Para el sensor de CO₂ MH-Z1311A se toma como referencia el reporte de inspección dado por la empresa WINSEN al momento de la compra, en este reporte visto en el Apéndice F se evidencia la fecha en la que se realizó 06 de febrero de 2023 y los resultados arrojados a las pruebas realizadas, donde se destaca la precisión de $\pm(30ppm + 3\% \text{ de la lectura})$, el rango de detección de 0 a 10000 ppm (partes por millón) y los puntos de inspección tomados de 600 y 5000 partes por millón y teniendo resultados favorables de 612 y 5030 partes por millón. Por lo anterior, decidimos que este reporte es aceptable para decir que el sensor MH-Z1311A esta calibrado correctamente y no necesita de una calibración externa.

La calibración del sensor de Temperatura HTU21 se realiza de igual manera mediante el método de comparación usando como referencia el sensor de temperatura dentro de la estación comercial Davis Vantage ampliamente usada en el ámbito medioambiental. Para esta calibración se disponen de las dos estaciones en un mismo lugar y tomando datos durante una hora, obteniendo los resultados de la Figura 44 en donde por un lado tenemos la gráfica comparativa de ambos sensores en la cual se puede observar la pequeña variación del sensor HTU21 con respecto al sensor patrón con un error entre los datos de 0.8%. Además, la verificación arroja un resultado satisfactorio ya que el ajuste que se debe realizar a nuestro sensor es mínimo, esto quiere decir que nuestro sensor es de alta calidad y fiable en los datos. Este pequeño ajuste se incorpora mediante líneas de código en la estación.

Figura 44

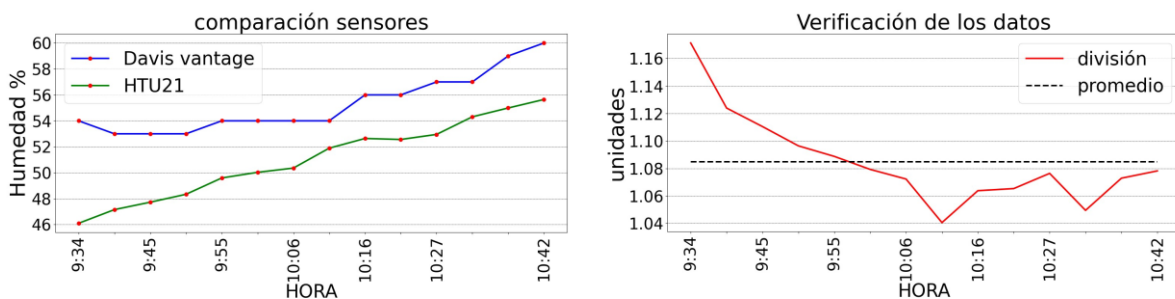
Calibración del sensor de temperatura



La calibración del sensor de Humedad HTU21 se realiza de igual manera mediante el método de comparación usando como referencia el sensor de humedad dentro de la estación comercial Davis Vantage. Obteniendo los resultados de la Figura 45 en donde por un lado tenemos la gráfica comparativa de ambos sensores en la cual se puede observar la pequeña variación del sensor HTU21 con respecto al sensor patrón. Además, la verificación arroja que se debe realizar un ajuste del 8.4% de los datos del sensor HTU21 con respecto al sensor patrón, el cual no es significativamente grande, pero se debe hacer para tener una estación calibrada. Este pequeño ajuste se incorpora mediante líneas de código en la estación.

Figura 45

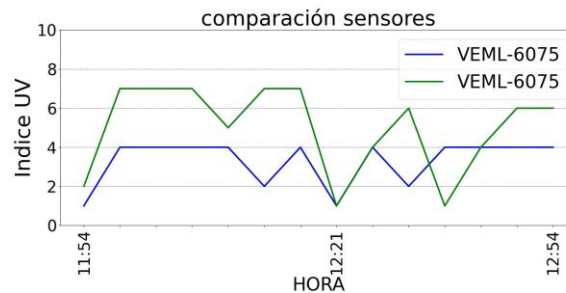
Calibración del sensor de humedad.



Respecto al sensor de radiación UV, se realiza una comparación de los datos con un sensor de la misma referencia en las mismas condiciones ambientales. La Figura 46 muestra los datos obtenidos por los dos sensores durante una hora de prueba, en verde se puede ver el sensor que se incorpora en la estación y en azul el sensor de comparación para así poder determinar si el funcionamiento es óptimo. En conclusión, el sensor incorporado en nuestra estación capta los cambios del índice UV de manera correcta y los errores que puedan tener los datos se asignan teniendo en cuenta la Tabla 9.

Figura 46

Verificación de los datos del sensor VEML-6075



9. Validaciones

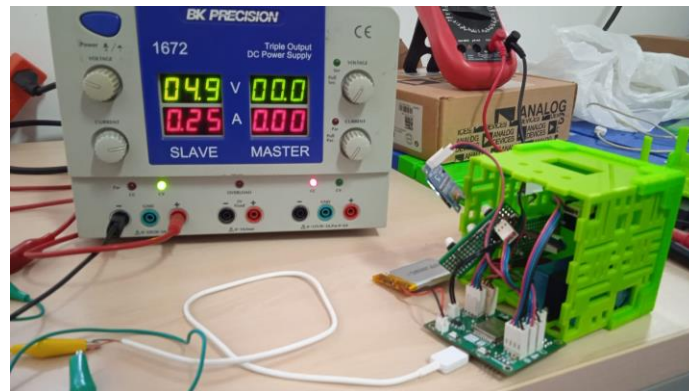
Para llevar a cabo la validación de la integración de todos los sistemas se toma la decisión de realizar un viaje con distintas paradas al corregimiento de Berlín en el municipio de Tona ubicado en el departamento de Santander, con el fin de validar el correcto funcionamiento de todos los sensores que integran la estación, la comunicación con la base de datos y la geolocalización. Esto con el fin de ir recopilando datos en carretera y poder observar el verdadero comportamiento

de los sensores al momento de encender la estación, este viaje también se hizo con el fin de validar la veracidad de los datos del sensor de temperatura y humedad ya que solo se había probado en ambientes calurosos y más adelante podremos ver el contraste y su funcionalidad.

Antes de realizar cualquier validación se realiza una prueba de consumo de energía del sistema total en funcionamiento, en la Figura 47 se evidencia el montaje realizado para esto y el resultado de la prueba siendo de 250 [mW/h] el consumo total y con esto se calcula la autonomía de la estación estimada de 4 horas continuas con una batería de 1200 [mA/h].

Figura 47

Verificación del consumo del sistema.



Nota: El montaje con la fuente de laboratorio permite verificar el consumo siendo de 250 [mW/h]

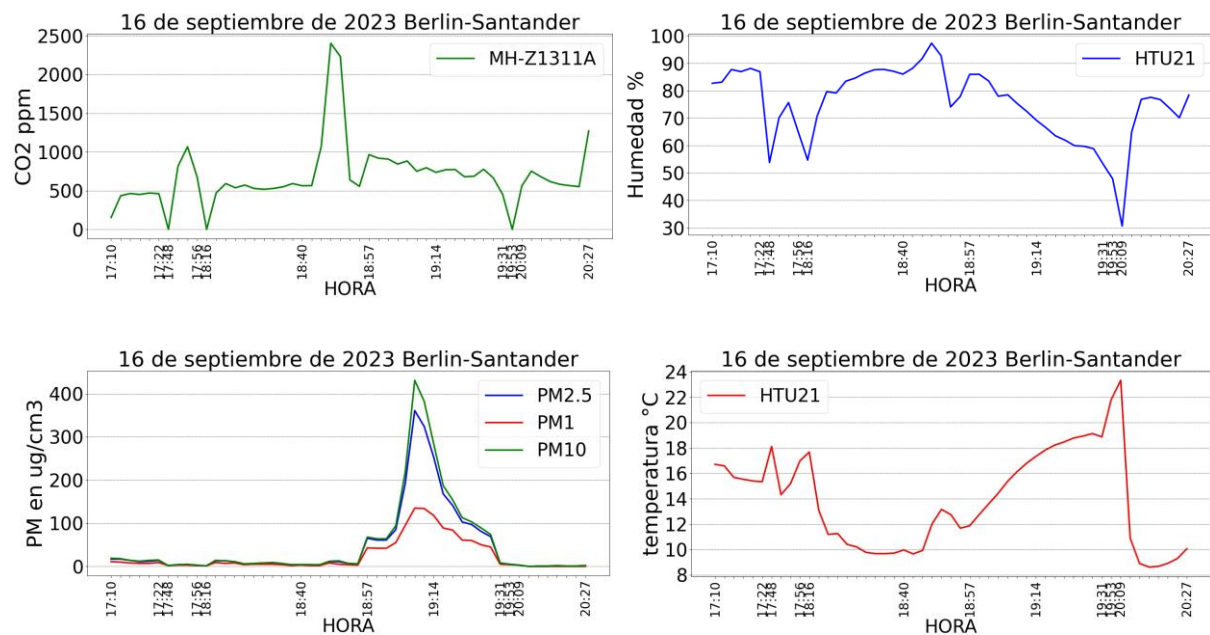
9.1. Verificación de los Componentes en Funcionamiento

Durante el recorrido por carretera al corregimiento de Berlín Santander se realizaron pruebas de funcionamiento para verificar como es el comportamiento de las variables, el comportamiento de la batería y si existen fallas en los componentes a temperaturas bajas, la Figura 48 muestra los datos recopilados durante el recorrido con su respectivo marcador horario.

Durante la primera parada entre las 17:10 y las 17:22 se registraron los primeros datos arrojando indicadores normales de cada una de las concentraciones de cada variable e iniciando con un valor de temperatura de 16 °C en promedio y una humedad de 85% en promedio. Durante la segunda parada entre las 17:48 y las 17:56 se registra un pico de 1000 ppm de CO₂ esto debido a que la estación se encontraba dentro del automóvil con 5 personas dentro.

Figura 48

Datos obtenidos durante la prueba en Berlín Santander.

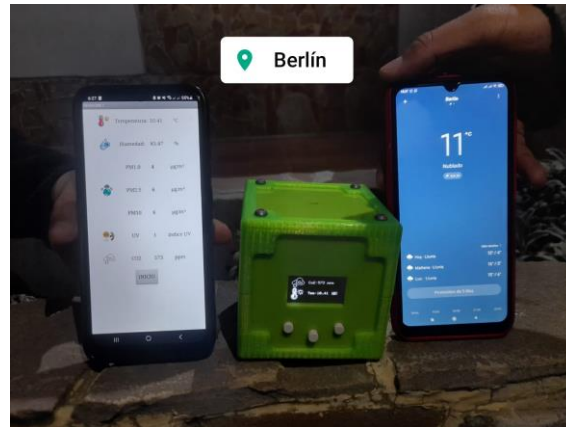


Llegando al corregimiento de Berlín se enciende la estación obteniendo un valor inicial de 14 °C y 60% de humedad, a medida que avanza el tiempo y debido al tiempo de respuesta de los sensores después de la primera toma de los datos se estabilizan los valores obtenidos a los

esperados según las aplicaciones climáticas incorporadas en los dispositivos móviles como se observa en la Figura 49.

Figura 49

Validación de los datos de temperatura en el corregimiento de Berlín Santander.



Nota: En la imagen se pueden ver los datos tomados por la estación en el aplicativo móvil y a la derecha la temperatura suministrada por la app clima del dispositivo móvil.

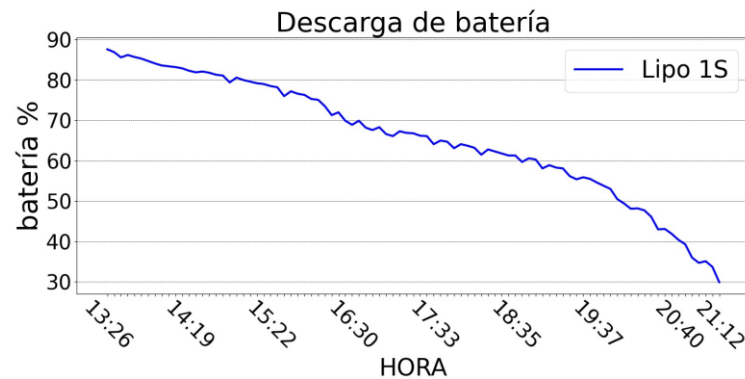
Durante la hora de comer ingresamos a un restaurante cerrado a las 18:57 y se puede evidenciar el cambio que ocurre en las variables de temperatura, humedad y material particulado donde la temperatura empieza a aumentar a medida que pasa la hora de comer llegando a un pico de 19°C, el material particulado aumenta al momento de llegar los platos a la mesa alcanzando un pico de $350 \text{ } \mu\text{g}/\text{cm}^3$ de PM2.5 y empieza a disminuir en el transcurso de la comida, la humedad al estar en un lugar más cerrado alcanza a disminuir hasta el 60% en la última medición que se realizó a las 19:31 p.m.

La última toma de datos del recorrido se realiza en el peaje del picacho Santander, donde siendo las 20:09 se registran datos de temperatura alrededor de los 10 °C y una humedad del 80%,

el último dato registrado por el sensor de CO₂ de 1500 ppm se da al momento de ingresar al automóvil.

Figura 50

Validación del tiempo de duración de la batería



Nota. Después de pasar por el 50% de la batería se puede apreciar que la descarga se incrementa, proceso normal en la descarga de las baterías de este tipo.

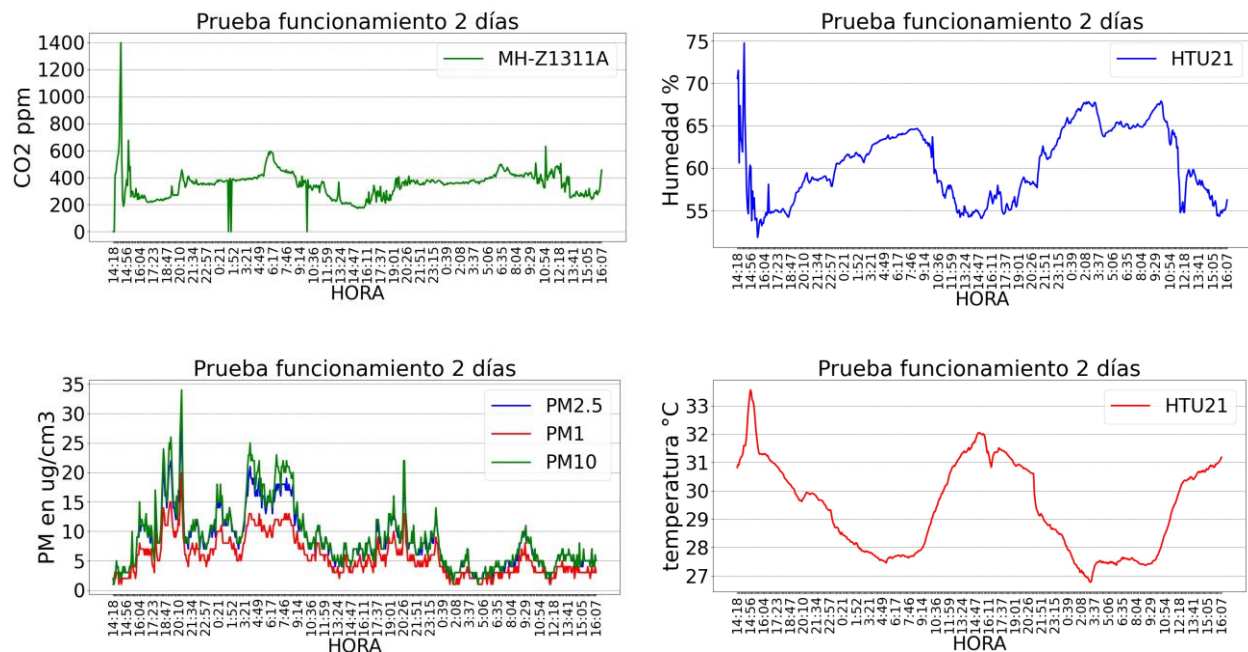
La toma de datos autónoma está sujeta al tiempo de duración de la batería interna del sistema, por esto se realiza una validación en funcionamiento total de la estación con alimentación directa de la batería para verificar el tiempo de duración de esta. La Figura 50 muestra el comportamiento del porcentaje de la batería en el tiempo iniciando con un 86% de la carga total de la batería y finalizando después de 8 horas de funcionamiento con el 30% de la misma. La autonomía es superior a la estimada de 4 horas, teniendo así un consumo del 5% total de la capacidad de la batería durante 1 hora lo que equivale a 60 [mWh] solo con la toma de datos activa cada 5 min, la pantalla oled apagada e implementando el modo de sueño profundo en el microcontrolador para reducir su consumo.

Adicionalmente se realiza la prueba de larga duración que consiste en dejar la estación conectada tomando datos por 2 días y verificar el envío, la recepción y la veracidad de los datos. Además de verificar el correcto funcionamiento de la alimentación sin batería por medio de la conexión del cable USC tipo C.

En la Figura 51 se presenta un mosaico con las gráficas de los datos obtenidos durante 2 días teniendo la estación en el interior de una habitación, es por esto que los valores de CO2 varían por alrededor de las 400 ppm y la temperatura alcanza valores altos de hasta 33 °C.

Figura 51

Datos obtenidos durante la prueba de larga duración.

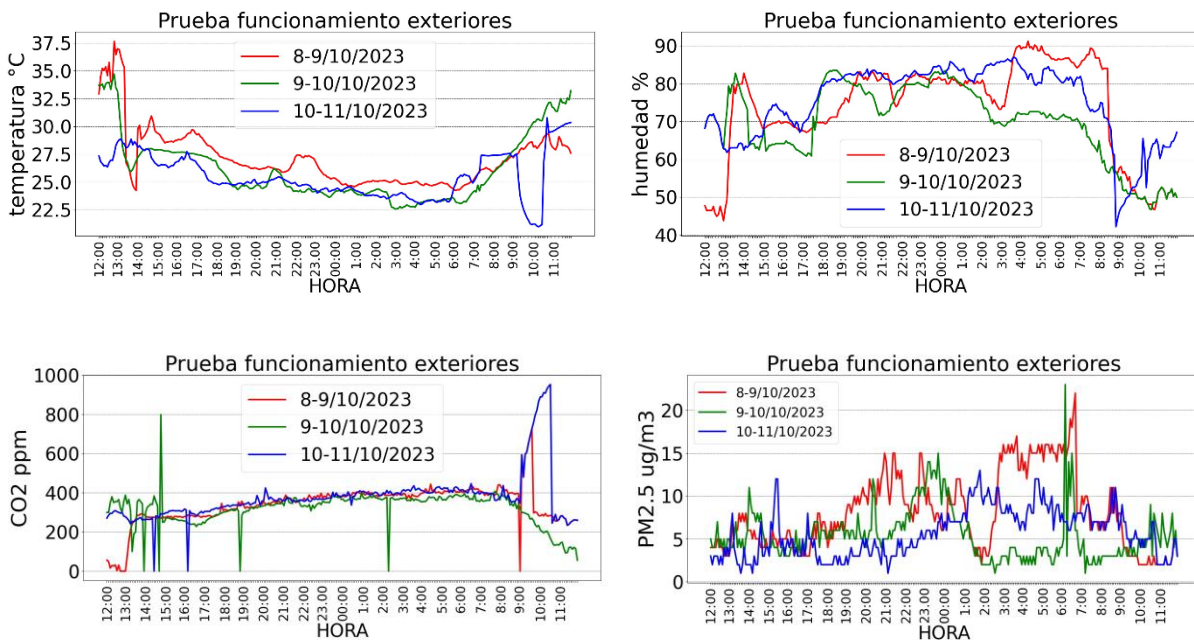


Esta prueba de larga duración nos permite concluir que la alimentación por el puerto USB tipo C sin tener conectada la batería funciona correctamente ya que en ningún momento se cortó

la transmisión de los datos. También que la existe una fuerte relación entre las variables de temperatura y humedad ya que la humedad varia a medida que cambia la temperatura. En la Figura 51 también se pueden evidenciar los cambios que ocurren al momento de encender la estufa para cocinar como se observa en los picos altos de la gráfica de material particulado o los cambios de temperatura y humedad en el transcurso del día y la noche.

Figura 52

Toma de datos en exteriores.

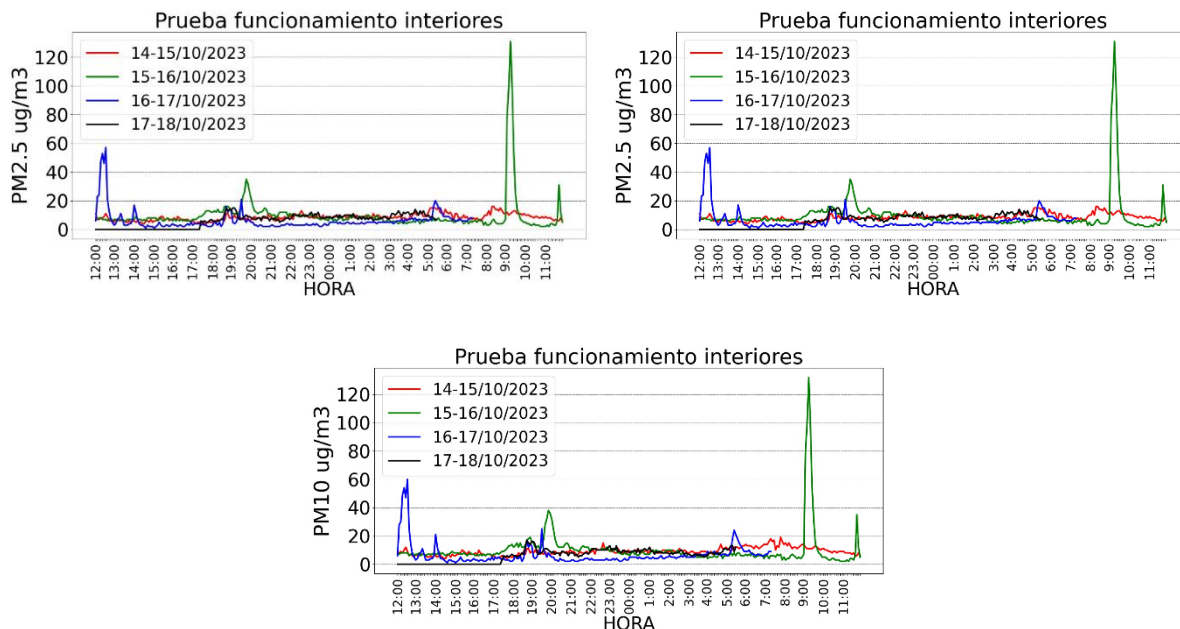


Durante la prueba vista en la Figura 52 llevada a cabo al aire libre, se pueden evidenciar los cambios de las variables monitoreadas por la estación a lo largo de 3 días. Los cambios más notables y significativos ocurrieron en las variables de humedad y temperatura en los días 8 y 10 de octubre ya que en estos se presentaron lluvias durante una hora después de las 12:00 horas del día 8 de octubre y después de las 9:00 horas del día 11 de octubre, evidenciándose una caída considerable de la temperatura ambiente y un aumento en el porcentaje de humedad el día 8 de

octubre registrados por el sensor HTU21 interno de la estación. Además, los registros de CO₂ se encuentran variando en promedio alrededor de las 400 partes por millón durante gran parte del día y presentar cambios considerables si al momento de la toma del dato se presentan perturbaciones como pueden ser mucho viento o gran concentración de personas cerca de la estación. Los valores de CO₂ y material particulado PM_{2.5} se encuentran dentro de los rangos normales vistos en la sección 5 y durante algunas horas la variable de CO₂ supero dichos rangos.

Figura 53

Validación en interiores del sensor de material particulado PMS5003.



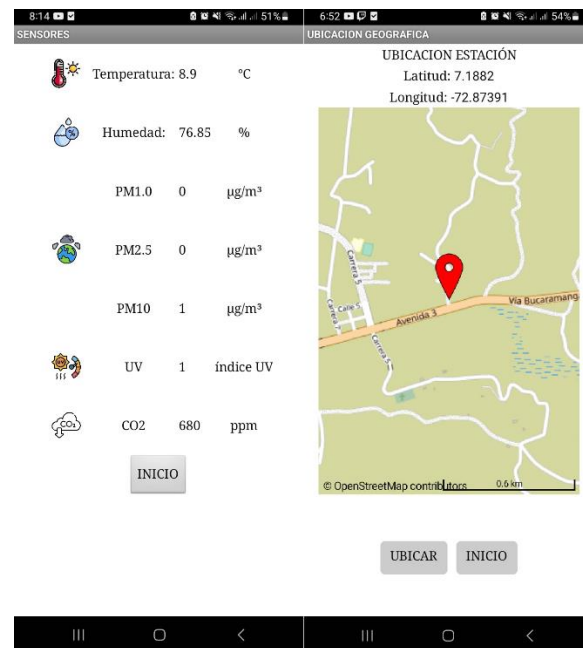
La prueba de tomar los datos de material particulado PM₁, PM_{2.5} y PM₁₀ en interiores vista en la Figura 53 permite observar los cambios que se presentan dentro de una casa al momento de encender la estufa para cocinar alimentos, en algunos casos los valores obtenidos por el sensor superan el rango malo superando los 91 ug/m^3 durante un corto periodo de tiempo sin tener una afectación directa con la salud de las personas.

9.2. Validación de la Recepción de Datos en Aplicación y la Base de Datos

La validación del aplicativo móvil se realiza durante el viaje a Berlín Santander, verificando que los datos presentados en el apartado de sensores y la geolocalización de la estación mediante el uso del GPS incorporado en el dispositivo móvil. En la Figura 54 se evidencian algunos de los datos captados por el aplicativo móvil que corresponden a los datos enviados a la base de datos como los mostrados en la pantalla oled, también se observa una de las ubicaciones que coincide con la vista en la Figura 55.

Figura 54

Toma de ubicación y datos durante el recorrido a Berlín.

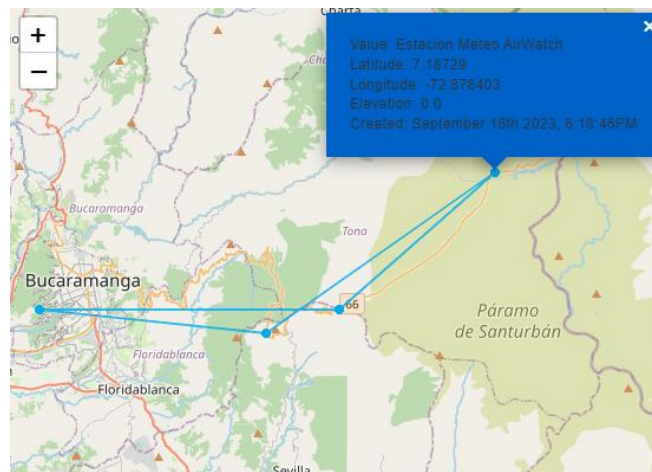


Nota. La ubicación de la estación se realizó de manera automática mediante el GPS incorporado en el dispositivo móvil en donde se inicia la aplicación.

Con el fin de validar los datos enviados a la base de datos de adafruit, en la Figura 55 se puede observar la última ubicación enviada por la estación siendo las 6:18 pm la cual coincide con la última ubicación registrada por el aplicativo móvil siendo así que él envió y la recepción de los datos es adecuada en todos los momentos.

Figura 55

Visualización de la ubicación en la interface online



Nota. En la imagen se pueden observar las diferentes ubicaciones en las que ha estado la estación.

9.3. Validación Estructural

Con el fin de verificar la protección que otorga la estructura para exteriores, se realiza una validación de lluvia simulada y lluvia real donde se verifica que el agua que cae no ingrese y dañe los componentes internos de la estación. La Figura 56 muestra como las gotas de lluvia quedan en el exterior de la estructura, durante la prueba se pudo observar cómo fluye el agua por las paredes inclinadas de la estructura como era esperado desde su diseño con la pantalla de Stevenson modifica.

Figura 56

Prueba de protección contra el agua de lluvia.



Además de la protección contra el agua de lluvia, la estructura para exteriores mantiene la temperatura interna de la estación con la temperatura del exterior ya que el color blanco refleja la mayoría de la radiación producida por el sol y permite una ventilación adecuada para que los sensores de material particulado y CO₂ realicen la toma de datos.

10. Costo Total de la Estación

El costo de la estación se puede detallar completamente en el Apéndice D donde se relacionan los costos por unidad de cada componente y los costos de envío para así poder calcular el valor total de la estación. Los precios de los envíos varían debido a la cantidad de componentes que se relacionan en cada envío, por esto se pueden observar algunos envíos más caros que otros. Además, algunos costos son aproximados a los valores reales como lo son el corte laser de los materiales estructurales y las impresiones 3D ya que los laboratorios tanto de Diseño Industrial

como de la escuela de mecánica de la universidad nos proporcionaron ayuda para realizar estos procesos.

Dentro de la tabla también se relacionan las herramientas e insumos para la elaboración de la PCB, ya que el aporte al costo de materiales como lo son el estaño, los conectores KF2510 y el cableado necesario para la interconexión de los sensores con la placa PCB que pueden parecer valores pequeños pero que aportan al valor total de la estación.

Por último, resaltamos el costo total de la estación en un valor de 1'165.524 pesos donde se incluyen cada uno de los componentes dentro de la estación como las herramientas y costos de envío. De nuestra estación se puede resaltar que este precio es solo si se lleva a cabo el proyecto como fue planteado durante todo el proceso de diseño y elaboración, pero su costo se puede reducir considerablemente si solo se implementa el apartado de sensores y se diseña una estructura menos compleja para la protección de la estación.

11. Conclusiones

La estación de monitoreo EMA representa un paso importante para crear conciencia e introducir medidas preventivas en Bucaramanga y sus alrededores, facilitar la creación de equipos de monitoreo en diversas instituciones de la ciudad y es un ejemplo de cómo la tecnología y la investigación se pueden integrar para contribuir significativamente a resolver los desafíos medioambientales del siglo XXI.

Por otro lado, la correcta implementación de las etapas de potencia permitió que la estación EMA tuviera el correcto flujo de energía por cada uno de sus componentes lo cual se traduce en un buen funcionamiento que es característico de los dispositivos IoT.

El estudio de mercado para los elementos principales arrojó resultados significativos ya que con un presupuesto limitado y sensores de gama media se puede construir una estación con bajos porcentajes de error en sus datos y de alta fidelidad. Tras el análisis de los datos almacenados en la base de datos, se comprobó que la elección de los sensores implementados en el proyecto fue óptima ya que presentan coherencia no solo al comparar con aplicaciones del clima sino al momento de realizar la verificación y calibración de los mismos.

Las validaciones del aplicativo móvil y de la base de datos respecto a la recepción de datos por parte de adafruit io y recepción y envío de los mismos por parte de Firebase al aplicativo móvil fueron satisfactorios ya que en ningún momento se encontraron pérdida de datos o alguna incoherencia respecto a los datos enviados desde la estación a las bases de datos.

Las validaciones realizadas en la ciudad de Bucaramanga y en el corregimiento de Berlín Santander confirmaron el funcionamiento correcto de cada uno de los sub sistemas de la estación, como también el buen funcionamiento del aplicativo móvil el cual permitió enviar la ubicación de la estación en diferentes momentos de las pruebas.

Se destaca del proyecto la integración de variables climáticas y de calidad del aire con sensores confiables y de un bajo costo con respecto a estaciones profesionales climáticas o monitores específicos para las variables de calidad del aire. Esto permite tener una estación de monitoreo completa a un precio accesible para instituciones públicas o personas del común y sean completamente compatibles para la integración en una red de monitoreo ambiental ciudadana. Además, la versatilidad del proyecto permite que se implementen diferentes tipos de estructuras para la toma de datos en exteriores y excluir componentes que no se consideren necesarios para las los propósitos de cada persona.

Tras completar todas las validaciones, podemos concluir que la estación EMA cuenta con una arquitectura de PCB sólida para la gestión de la potencia y la comunicación de los sensores. Además, se demostró que la conectividad es estable y confiable, lo que convierte a la estación en una solución portátil y altamente conectada para el monitoreo de variables ambientales confiables.

Por último, haciendo un recorrido a través de los sistemas diseñados y analizando sus costos, podemos concluir que nuestra estación cumple con la restricción de ser un dispositivo de bajo costo y con un bajo consumo de energía que puede ser incluido en la gama de equipos IoT.

12. Recomendaciones

Se recomienda encargar la fabricación de las placas de circuito impreso (PCB) con perforaciones pasantes en China para lograr un acabado más profesional. En Colombia, este proceso resulta costoso, y la universidad no dispone de los recursos necesarios para llevar a cabo este tipo de PCB. Alternativamente, se podría considerar la posibilidad de utilizar una máquina CNC con una punta de 0.1 mm para fabricar las PCB localmente, asegurándose de contar con los equipos necesarios para este proceso crucial.

Se sugiere utilizar un conector de carga más resistente o industrial en lugar del USB tipo C. Este cambio se debe a que el conector USB tipo C puede dañarse con el tiempo debido a conexiones defectuosas o golpes. La sustitución de este componente sería más sencilla con un conector robusto.

Es recomendable implementar una base de datos local en la universidad para permitir la interconexión de varias estaciones a nivel local. En el futuro, si se despliegan numerosas estaciones en Santander o en toda Colombia, esta base de datos local deberá ser escalable para evitar limitaciones.

Se aconseja colaborar con un diseñador industrial para crear un diseño de estructura tanto para interiores como para exteriores. Esto es esencial para optimizar el flujo de aire y garantizar que todos los sensores funcionen correctamente sin que su medida se vea afectada. Este diseño de estructura podría ser objeto de un proyecto de grado independiente.

Se recomienda mejorar la visualización de los datos en la pantalla OLED para hacer que la información sea más accesible y considerar la posibilidad de utilizar una pantalla de mayor calidad y menor consumo energético.

Se sugiere mejorar la integración de las piezas de la estructura, de modo que no se aprecien los puntos de sujeción o anclaje. Además, se debe realizar una prueba de resistencia de la estructura ante caídas, alta humedad y condiciones adversas para garantizar que la estación sea altamente confiable en diversas situaciones.

La universidad debería considerar adquirir sensores con certificaciones de calibración para permitir la calibración por comparación de sensores de bajo costo con sensores calibrados. Esto facilitaría la obtención de una curva de tendencia que permita ajustar con precisión los datos de los sensores de bajo costo, dado que actualmente, muchos de los sensores de calidad en la universidad están descalibrados.

References

- ABC. (2012). El bombardeo de los 2.000 millones de años. Retrieved from https://www.abc.es/ciencia/abci-bombardeo-millones-anos-201204250000_noticia.html
- Air Quality Egg. (2021). Air quality egg - science is collaboration. Retrieved from <https://airqualityegg.com/home>
- airveda. (2018). Measuring data - understanding particulate matter and how it impacts our health. Retrieved from <https://www.airveda.com/blog/Understanding-Particulate-Matter-and-Its-Associated-Health-Impact>
- Alanís Flores, G. J. (2011). Los fenómenos meteorológicos extremos: Efecto de las bajas temperaturas en la vegetación arbórea del área metropolitana de monterrey. *Ciencia UANL*, 14(2), 115-120.
- Área Metropolitana de Bucaramanga. (2019). Calidad del aire. Retrieved from <https://www.amb.gov.co/calidad-del-aire/>
- Arzoumanian, E., Vogel, F. R., Bastos, A., Gaynullin, B., Laurent, O., Ramonet, M., & Ciais, P. (2019). Characterization of a commercial lower-cost medium-precision non-dispersive infrared sensor for atmospheric CO₂ monitoring in urban areas. *Atmospheric Measurement Techniques*, 12(5), 2665-2677. doi:10.5194/amt-12-2665-2019
- AtlasScientific. (2022). What is A humidity sensor? Retrieved from <https://atlas-scientific.com/blog/what-is-a-humidity-sensor/>

- Bannister, M. (2020). Everything you need to know about humidity in your home. Retrieved from <https://www.airthings.com/resources/everything-you-need-to-know-about-humidity>
- Benito, J. L. d. (2018,). ¿Qué son y para qué sirven los piranómetros y los pirheliómetros? Retrieved from <https://www.energynews.es/que-son-y-para-que-sirven-los-piranometros/>
- BOTTOLLIER-DEPOIS, A. (2021). El niño y la niña, dos fenómenos que pesan sobre la temperatura mundial. *AFP International Text Wire in Spanish*,
- Brunekreef, B., & Russell, A. (2009). Particulate matter and human health focus issue. *Environmental Science & Technology; Environ.Sci.Technol*, 43(13), 4613-4614.
doi:10.1021/es901295k
- Buisan, S. T., Azorin-Molina, C., & Jimenez, Y. (2015). Impact of two different sized stevenson screens on air temperature measurements. *International Journal of Climatology*, 35(14), 4408-4416. doi:10.1002/joc.4287
- Chambers, L. (2021). *Arquitectura orientada a eventos sobre protocolo MQTT* Retrieved from <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/130301>
- Chaves Palacios, J. (2004). Desarrollo tecnológico en la primera revolución industrial. *Norba.Revista De Historia*, (17), 93-109.
- Davis, R. E., McGregor, G. R., & Enfield, K. B. (2016). Humidity: A review and primer on atmospheric moisture and human health. *Environmental Research; Environ Res*, 144, 106-116. doi:10.1016/j.envres.2015.10.014

Equipos Y Laboratorio de Colombia. (2019). Medicion de humedad. Retrieved from <https://www.equiposylaboratorio.com/portal/articulo-ampliado/medicion-de-humedad>

La experiencia RACIMO – red ambiental CIudadana de MONitoreo (RACIMO). Retrieved from https://halley.uis.edu.co/tierra/?page_id=143

Fernández Maestre, R. (2012). Ion mobility spectrometry: History, characteristics and applications. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica; Rev.Udcaactual.Divulg.Cient*, 15(2), 467-479. doi:10.31910/rudca.v15.n2.2012.848

Gerlach, G., Guth, U., & Oelssner, W. (2019). *Carbon dioxide sensing : Fundamentals, principles, and applications*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH.

Gesa Termómetros, S. L. (2014). Termómetro de tierra. Retrieved from <https://www.termometros.com/termometro-para-tierra>

Ghetti, F., Checcucci, G., & Bornman, J. F. (2006). *Environmental UV radiation: Impact on ecosystems and human health and predictive models proceedings of the NATO advanced study institute on environmental UV radiation: Impact on ecosystems and human health and predictive models pisa, italy, june 2001* (1st ed.). Dordrecht: Springer Netherlands. doi:10.1007/1-4020-3697-3

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2012). Generalidades de la radiación ultravioleta - ideam. Retrieved from <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/generalidades-de-la-radiacion-ultravioleta>

- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2015). Índice ultravioleta (iuv) - ideam. Retrieved from <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/indice-ultravioleta-iuv->
- Kim, K., Kabir, E., & Kabir, S. (2015). A review on the human health impact of airborne particulate matter. *Environment International; Environ Int*, 74, 136-143.
doi:10.1016/j.envint.2014.10.005
- Ko, J., Lee, K., Hwang, H., & Shin, K. (2022). *Deep-learning-based precipitation nowcasting with ground weather station data and radar data*. Ithaca: Cornell University Library, arXiv.org.
- Kobos, R. K., Parks, S. J., & Meyerhoff, M. E. (1982). Selectivity characteristics of potentiometric carbon dioxide sensors with various gas membrane materials. *Anal. Chem.; (United States); Anal. Chem*, 54(12), 1976-1980. doi:10.1021/ac00249a014
- Laura Judith Ramírez. (2021). ¿Conoces qué es el material particulado o polvo que circula en bogotá? Retrieved from <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/ambiente/que-es-el-material-particulado-o-polvo-en-el-aire>
- Lee, I., Akbar, S. A., & Dutta, P. K. (2009). High temperature potentiometric carbon dioxide sensor with minimal interference to humidity. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 142(1), 337-341. doi:10.1016/j.snb.2009.07.048

Licla Tomayro, L. R. (2021). Evaluación de la calidad de aire en el proyecto de explotación cantera camucha, distrito de morococha, provincia de yauli, junín. *Revista Del Instituto De Investigación*, 24(48), 245-251. doi:10.15381/iigeo.v24i48.21777

macrovector. (2018). Ilustración de la estación meteorológica. Retrieved from https://www.freepik.es/vector-gratis/ilustracion-estacion-meteorologica_14683100.htm

Martin Leon Francisco. (2016). La red de boyas argo cumple 15 años. Retrieved from <https://www.tiempo.com/ram/233012/la-red-de-boyas-argo-cumple-15-anos/>

Mediavilla Pérez, M. J. (2004). *Atmósfera, materia y radiación*. Madrid: Equipo Sirius.

Mondragon, F. (2021). Ciclos del dióxido de carbono en la formación y utilización de combustibles fósiles y su efecto en el cambio climático/carbon dioxide cycles in the formation and use of fossil fuels and their effect on climate change. *Revista De La Academia Colombiana De Ciencias Exactas, Físicas Y Naturales*, 45(176), 833. doi:10.18257/raccefyn.1364

Montero Rubio, J. C., Mirón Pérez, I. J., Díaz Jiménez, J., & Alberdi Odriozola, J. C. (1997). Influencia de variables atmosféricas sobre la mortalidad por enfermedades respiratorias y cardiovasculares en los mayores de 65 años de la comunidad de Madrid. *Gaceta Sanitaria*, 11(4), 164-170. doi:10.1016/S0213-9111(97)71294-9

Naciones Unidas. (2022). ¿Qué es el cambio climático? Retrieved from <https://www.un.org/es/climatechange/what-is-climate-change>

- Olivieri, A. C. (2018). *Introduction to multivariate calibration A practical approach* (1st ed.). Cham: Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-319-97097-4
- OMS. (2021). Las nuevas directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire tienen como objetivo evitar millones de muertes debidas a la contaminación del aire. Retrieved from <https://www.who.int/es/news/item/22-09-2021-new-who-global-air-quality-guidelines-aim-to-save-millions-of-lives-from-air-pollution>
- OMS. (2022). Radiación ultravioleta. Retrieved from <https://www.who.int/es/news-room/factsheets/detail/ultraviolet-radiation>
- Pastor, F., Valiente, J. A., & Palau, J. L. (2018). Sea surface temperature in the mediterranean: Trends and spatial patterns (1982–2016). *Pure and Applied Geophysics*, 175(11), 4017-4029. doi:10.1007/s00024-017-1739-z
- Paull, R. (1999). Effect of temperature and relative humidity on fresh commodity quality. *Postharvest Biology and Technology*, 15(3), 263-277. doi:10.1016/S0925-5214(98)00090-8
- Quinchía, A. Z. (2020). Así se monitorean desde santa elena las nubes de antioquia. Retrieved from <https://www.elcolombiano.com/antioquia/funcionamiento-del-radar-metereologico-de-santa-elena-las-nubes-de-antioquia-JC14349990>
- Rodriguez Ucha, I. (2006). *Evolucion del contenido de dioxido de carbono en aguas del norte de canarias su impacto en el cambio climatico global*. Gran Canaria, Espana: Fundacion Universitaria de Las Palmas.

Schiavo, B., Inguaggiato, C., Arredondo-Palacios, T., & Meza-Figueroa, D. (2021). Emisiones volcánicas: Origen e impacto en la atmósfera. *Epistemus : Ciencia Tecnología Y Salud*, 15(30) doi:10.36790/epistemus.v15i30.160

Secretaria Distrital de Ambiente. (2019). Todos los indicadores » observatorio ambiental de bogotá. Retrieved from <https://oab.ambientebogota.gov.co/todos-los-indicadores/>

Sistema de Alerta Temprana del Medellin y el Valle de Aburra. (2022). SIATA - sistema de alerta temprana del valle de aburrá. Retrieved from https://siata.gov.co/sitio_web/index.php/

solerpalau. (2021,). ¿Cómo ventilar espacios con altas temperaturas? | S&P. Retrieved from <https://www.solerpalau.com/es-es/blog/ventilar-espacios-altas-temperaturas/>

stadiumvenecia. (2020). Medición del CO2 del aire. Retrieved from <https://www.stadiumvenecia.com/practica-deporte-en-un-ambiente-seguro/>

US Department of Commerce, NOAA. (2012). Citizen weather observer program. Retrieved from <https://www.weather.gov/cle/CWOP>

Villa, B. (2020). ¿Cuál es mejor? las principales diferencias entre termómetros infrarrojos, digitales y de mercurio. Retrieved from <https://www.biobiochile.cl/noticias/vida-actual/consejos/2020/05/15/cual-es-mejor-las-principales-diferencias-entre-termometros-infrarrojos-digitales-y-de-mercurio.shtml>

VIU. (2023). El origen del sistema solar, la hipótesis nebular. Retrieved from

<https://www.universidadviu.com/es/actualidad/nuestros-expertos/el-origen-del-sistema-solar-la-hipotesis-nebular>

World Climate Research Programme. (2015). World climate research programme (WCRP).

Retrieved from <https://www.wcrp-climate.org/>

Xiong, J., Lian, Z., Zhou, X., You, J., & Lin, Y. (2015). Effects of temperature steps on human health and thermal comfort. *Building and Environment*, *94*, 144-154.

doi:10.1016/j.buildenv.2015.07.032

Xiong, Y., Meng, Q., Gao, J., Tang, X., & Zhang, H. (2017). Effects of relative humidity on animal health and welfare. *Journal of Integrative Agriculture; Agricultural Sciences in China*, *16*(8), 1653-1658. doi:10.1016/S2095-3119(16)61532-0

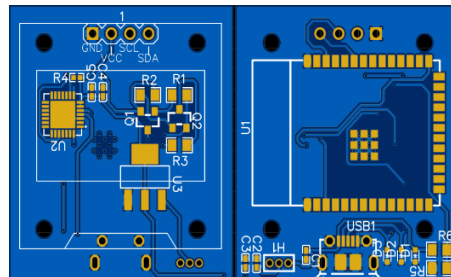
Apéndices

Apéndice A. Repositorio del proyecto – GitHub

<https://github.com/jal1rtrujillo5/Estacion-de-monitoreo-ambiental-EMA.git>

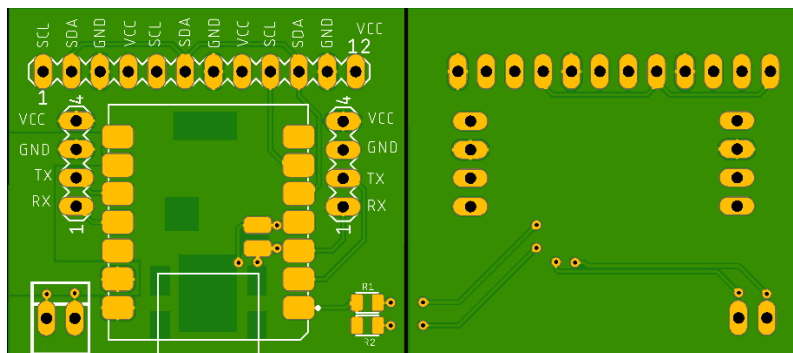
Apéndice B. Primeros diseños de placa PCB.

Primer diseño con el módulo ESP-32 WROOM de circuito impreso para la estación EMA



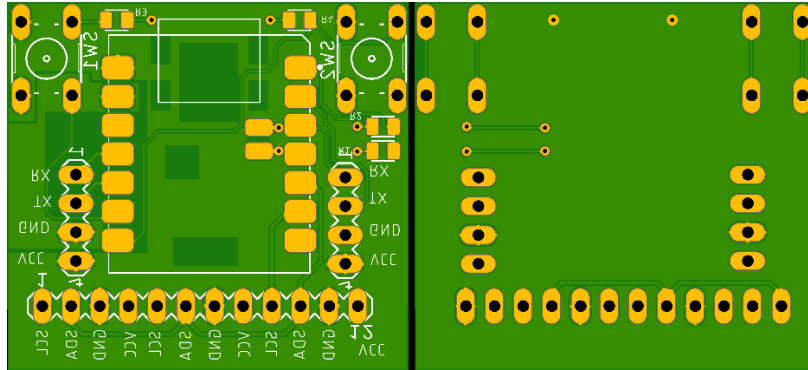
Nota: Imagen extraída del programa EasyEDA, este diseño integra la pantalla oled directamente en la PCB con todos los demás circuitos, también cuenta con el convertidor serial a TTL necesario para la programación del microcontrolador.

Primer diseño con la tarjeta seed xiao ESP32 C3 con módulo de carga



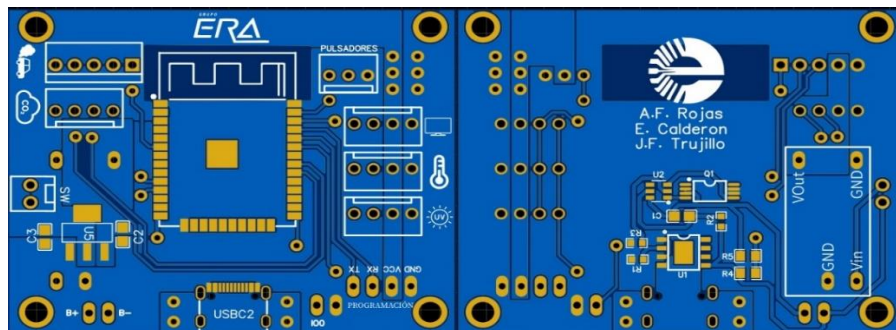
Nota: Imagen extraída del programa EAGLE, en este diseño se implementó el uso de la placa seed xiao ESP32 C3 y una serie de pines para la conexión de los sensores y la pantalla oled.

Segundo diseño con la tarjeta seed xiao ESP32 C3 con módulo de carga.

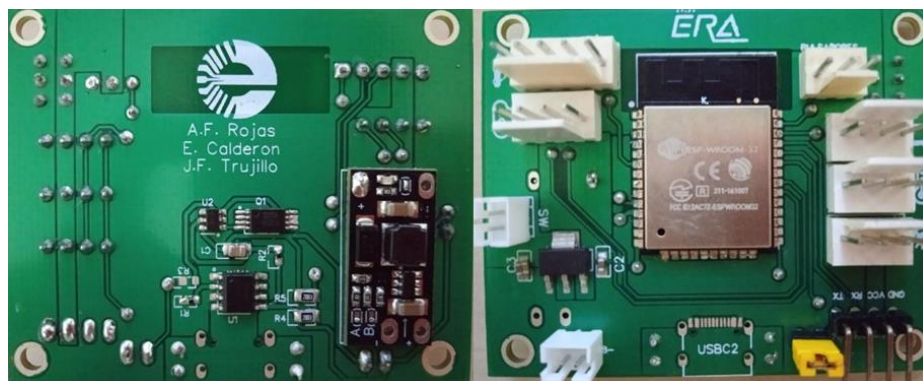


Nota: Imagen extraída del programa EAGLE, en este diseño se implementaron los mismos componentes vistos en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** adicionando dos pulsadores para ejercer control sobre algunas condiciones del programa.

Tercer Diseño con ESP-32 WROOM



Nota: Imagen extraída del programa EasyEDA, en este diseño más complejo de la electrónica de la estación se incorporan reguladores para la tensión necesaria de cada uno de los componentes, también cuenta con módulo de carga y descarga.

Primera implementación en placa PCB

Nota: En la imagen se muestra la primera implementación en circuito impreso, en esta se reduce el tamaño del área de trabajo usada para el montaje del circuito gracias al uso de componentes de montaje superficial y el uso del módulo ESP32 WROOM.

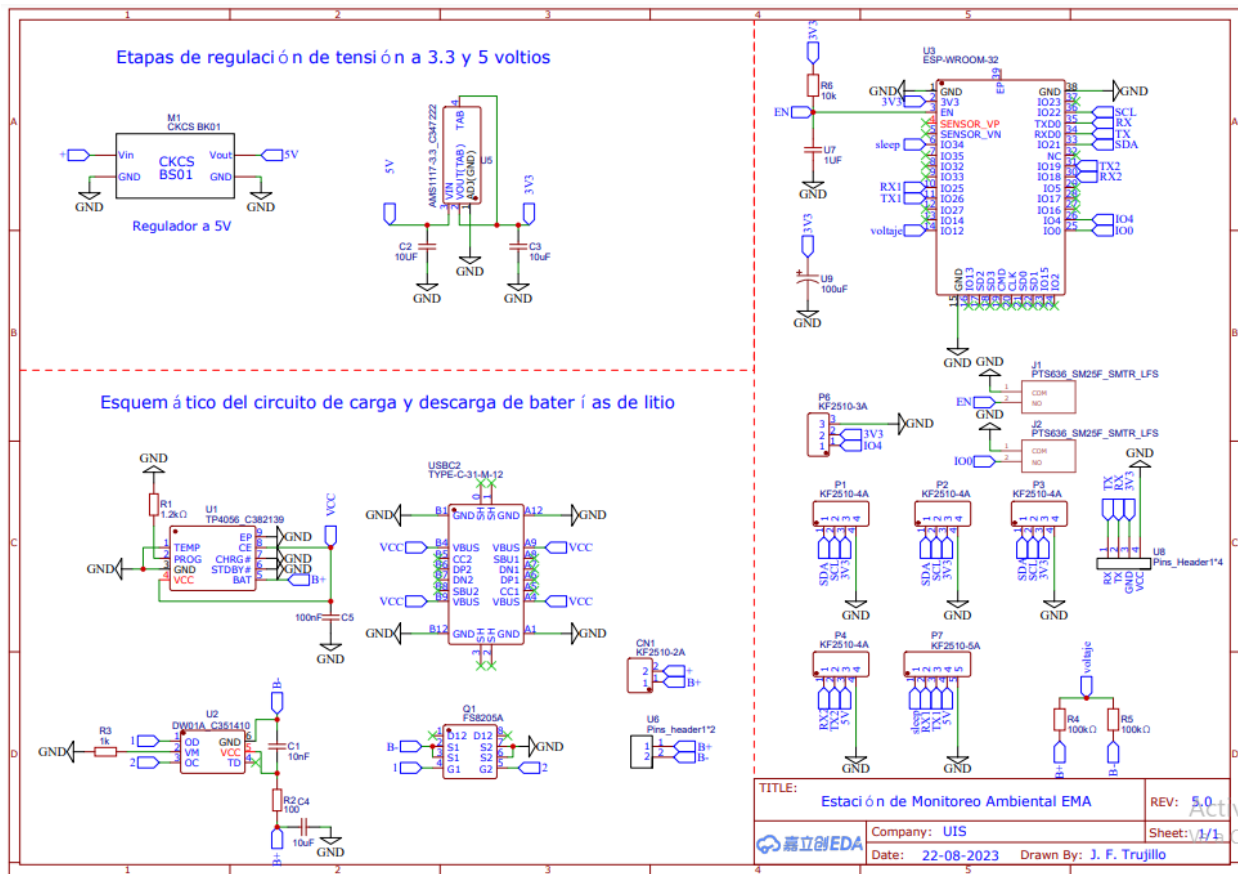
Apéndice C. Página web del trabajo de investigación.

<https://sites.google.com/view/emvmmpbc222/inicio>

Apéndice D. Tabla de costos por componente.

Componentes	Cantidad	Valor Unidad	Costo	Valor Total
Sensor UV	1.00	\$ 43,917.00	\$ 10,000.00	\$ 53,917.00
Sensor de Temperatura Y Humedad	1.00	\$ 15,476.00	\$ 10,000.00	\$ 25,476.00
Sensor de Dioxido de carbono	1.00	\$ 150,000.00	\$ 10,000.00	\$ 160,000.00
Sensor de material particulado	1.00	\$ 110,231.00	\$ 5,000.00	\$ 115,231.00
Bateria	1.00	\$ 35,000.00	\$ 5,000.00	\$ 40,000.00
Base de datos Adafruit para Interfaz	1.00	\$ 45,000.00	\$ 0.00	\$ 45,000.00
Modulo ESP32	1.00	\$ 30,000.00	\$ 5,000.00	\$ 35,000.00
Pantalla OLED	1.00	\$ 17,000.00	\$ 0.00	\$ 17,000.00
PCB	1.00	\$ 55,000.00	\$ 10,000.00	\$ 65,000.00
Conectores KF2510	6.00	\$ 3,000.00	\$ 500.00	\$ 18,500.00
Botones de montaje pasante	2.00	\$ 1,200.00	\$ 500.00	\$ 2,900.00
Elevador de voltaje	1.00	\$ 6,400.00	\$ 500.00	\$ 6,900.00
Cargador de voltaje para la bateria	1.00	\$ 6,000.00	\$ 500.00	\$ 6,500.00
Tapas para switches	3.00	\$ 400.00	\$ 500.00	\$ 1,700.00
Tuercas metalicas M2	6.00	\$ 500.00	\$ 500.00	\$ 3,500.00
Tira de Cables para Conectores	1.00	\$ 5,000.00	\$ 500.00	\$ 5,500.00
Estaño en pasta	1.00	\$ 15,000.00	\$ 2,000.00	\$ 17,000.00
Cautin	1.00	\$ 80,000.00	\$ 0.00	\$ 80,000.00
Corte Laser Acrilico + Acrilico Interiores	1.00	\$ 40,000.00	\$ 0.00	\$ 40,000.00
Impresión 3D Refuerzos	1.00	\$ 80,000.00	\$ 0.00	\$ 80,000.00
Impresión 3D Exteriores	1.00	\$ 200,000.00	\$ 0.00	\$ 200,000.00
Impresión 3D soporte Sensor PM	1.00	\$ 20,000.00	\$ 0.00	\$ 20,000.00
Cinta Doble faz 3M	1.00	\$ 10,000.00	\$ 0.00	\$ 10,000.00
Boton de montaje superficial	2.00	\$ 2,000.00	\$ 0.00	\$ 4,000.00
Switch de montaje pasante	1.00	\$ 1,000.00	\$ 0.00	\$ 1,000.00
Tornillos M3 de 15cm + tuerca	8.00	\$ 800.00	\$ 0.00	\$ 6,400.00
Corte laser acrilico + acrilico perforacion UV	1.00	\$ 10,000.00	\$ 0.00	\$ 10,000.00
Pegamento para Acrilico	1.00	\$ 5,000.00	\$ 0.00	\$ 5,000.00
Filamento para Impresiones 3D	1.00	\$ 90,000.00	\$ 0.00	\$ 90,000.00
Total				\$ 1,165,524.00

Apéndice E. Esquemático final usado para la elaboración de la PCB.



Apéndice F. Reporte de inspección del sensor MH-Z1311A



ZHENGZHOU WINSEN ELECTRONICS TECHNOLOGY CO., LTD

http://www.winsen-sensor.com
Tel:0086-371-67169097

E-mail:sales@winsensor.com
Fax:0086-371-60932988

INSPECTION REPORT

No.: JL-8.6-09a

Serial No.: : 2306034

Customer	603458			
Model	MH-Z1311A	Quantity	2 pcs	
Batch No.	40000271873	Inspection Date	2023/6/2	
Appearance	Good			
Function	Good			
Target Gas	CO ₂			
Precision	±(30ppm+3%of measure value)			
Detection Range	0-10000ppm			
Output Signals	UART/PWM			
Inspection Points(ppm)	600	5000	—	—
Display Values(ppm)	612	5030	—	—
Output Voltage (V)	—	—	—	—
Package	Good			
Inspection Condition	Temp: 21 °C		Humidity: 32 %RH	
Inspection Result	Good			

Inspector: Li kangQC Supervisor: Huangjiuyi

