



POLITÉCNICA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

José Gutiérrez Abascal, 2. 28006 Madrid
Tel.: 91 336 3060
info.industriales@upm.es

www.industriales.upm.es



Jesús Arnaldo Martínez Tahan

05 TRABAJO FIN DE MASTER

INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE MASTER

ELABORACIÓN DE UN SISTEMA DESTINADO A LA PREVENCIÓN DE INCENDIOS A PARTIR DE LA IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS DE ARDUINOS Y LA FABRICACIÓN ADITIVA

TRABAJO FIN DE MÁSTER
PARA LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE MÁSTER EN
INGENIERÍA MECÁNICA

SEPTIEMBRE 2025

Jesús Arnaldo Martínez Tahan

DIRECTOR DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER:

Jon Mikel Molina Aldareguia
Esther Hontañón



“El genio es uno por ciento de inspiración y noventa y nueve por ciento de transpiración”

-Thomas A. Edison.

Agradecimiento

Mediante este apartado quiero agradecer a todos los involucrados durante este capítulo de mi vida para poder alcanzar el logro de culminar satisfactoriamente la maestría de ingeniería mecánica en la Escuela Técnica de Ingeniería Industrial.

Principalmente a Dios por la oportunidad de cursar esta maestría a través de una prestigiosa escuela.

A mis padres que me brindaron soporte económico y emocional mientras me encontraba a distancia cursando la maestría. Quiero agradecerles por la fe que depositaron en mí y la confianza que tuvieron para que fuese a cursar esta maestría y desarrollarme a nivel personal y profesional.

A mi tutor Jon Mikel Molina, quien inicialmente impartió una de mis clases favoritas, Sistemas Integrados de Fabricación, y aceptó formar parte de este trabajo como tutor y guía impulsándome a ser un mejor profesional y siempre buscar la excelencia.

Al CSIC, por la oportunidad de desarrollarme en estas prácticas y utilizar mis conocimientos dentro de un proyecto tan interesante como lo es el resguardo y cuidado de la naturaleza.

A Esther Hontañón, mi tutora externa, quien me introdujo en el equipo del proyecto y me apoyó durante toda mi estancia en el CSIC.

A Sofía Aparicio, que me apoyó durante el desarrollo del proyecto y TFM, siempre disponible para cualquier ayuda que necesitase.

A María Gabriela Restifo, mi pareja, por toda la ayuda que me ofreció durante el desarrollo de este trabajo sin importar la dificultad.

Resumen

El propósito de este proyecto es elaborar una red inalámbrica de sensores para la prevención y detección de incendios forestales, con la intención de preservar y proteger 7 zonas rurales a lo largo de España y Portugal. El trabajo fue elaborado junto al CSIC en el programa de becas ofertado por el programa JAE Intro de la misma organización. A través de los conocimientos obtenidos en la asignatura de Sistemas Integrados de Fabricación (53000966), la utilización de programas de diseño como Autodesk Inventor y programación de sistemas con Arduino IDE se llevó a cabo la ejecución del proyecto para emplear un sistema *open-source* que pueda facilitar la reutilización de los componentes del proyecto y así también facilitar su acceso para futuras mejoras. El proyecto busca documentar todas las etapas del proyecto, desde su justificación, hasta las etapas de diseño, producción, programación e instalación.

El trabajo inicia con la selección del modelo de arduino (MKR WAN 1310), sensores y batería. Esto se determina en base al consumo, transmisión, conectividad a redes y puertos disponibles para la conexión de otros controladores. Por otro lado, los sensores deben de cumplir con los criterios de calibración desde sus fábricas y certificaciones de producción, aplicación en la intemperie y el rango de medida indicado para acumular datos representativos de una formación de incendios.

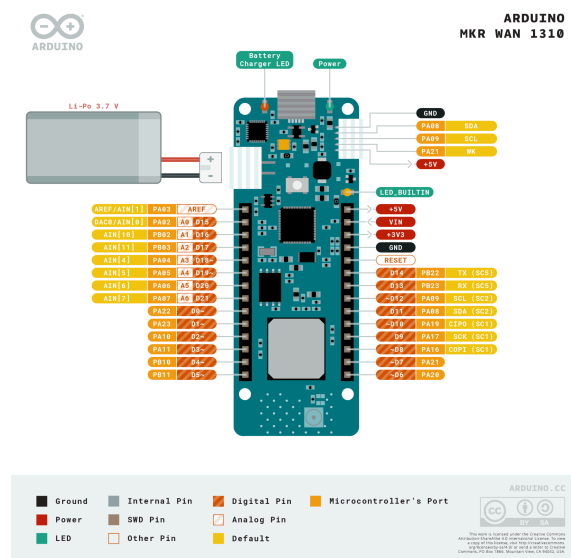


Figura 1: Arduino MKR WAN 1310

Posterior a la elaboración de un sistema de captura de datos se procede a desarrollar la comunicación de datos. Estos datos capturados por los sensores son enviados a través del protocolo de comunicación LoRa, el cual se conecta a un Gateway que lleva las mediciones a la nube para monitorearlas en tiempo real. Una vez finalizado el sistema de comunicación se elabora una carcasa que pueda contener el Arduino y garantizar la protección adecuada ante los agentes externos a los que se verá expuestos, como por ejemplo, altas temperaturas,

lluvia, granizo, viento, impactos accidentales, radiación UV y polvo. Estudiando las normativas de protección como la IP, ISO 4892 y también la ISO 10012 se busca replicar las condiciones en las que el sistema debe de trabajar para garantizar la longevidad y correcto funcionamiento del sistema.

La intención de este proyecto es aportar una solución viable mediante la fabricación aditiva y el *open-source*, métodos por los cuales se puede optimizar el trabajo de guardabosques, simplificar la logística y elaborar iteraciones y nuevas soluciones que eliminen la dependencia hacia el proveedor y sus productos ofertados. Por otra parte, se reducen los tiempos de entrega y costes de envío. En este caso, podemos utilizar como ejemplo el modelo de escudo de radiación solar comercial de RIKA RK95-01.



Figura 2: Escudo de radiación RK95-01

El escudo de RIKA es fabricado con un ABS que acorde a la tabla especificaciones de RIKA tiene propiedades de anti-radiación y opera entre los -40°C y los $+75^{\circ}\text{C}$. Este sistema se arma a partir de tres ejes por los cuales pasa un tornillo sin fin, asegurando la tapa superior sobre la inferior, la cantidad de platos puede variar entre 4 y 20 según el sensor colocado internamente y el espacio donde será instalado el sistema. El sensor se instala por la parte inferior de la envolvente a través de una rosca con una membrana que sella el paso de cualquier agente externo.

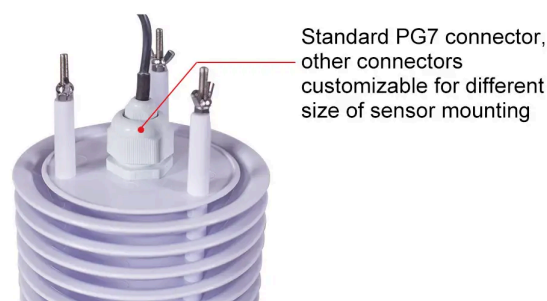


Figura 3: Conector del sensor del escudo

Analizando las características que muestra la envolvente procedemos a diseñar una alternativa adecuada para el Arduino, ya que el sistema sensorial del módulo de RIKA es distinto y conlleva un coste mayor. El diseño se desarrolló a través de Autodesk Inventor gracias a su variado portafolio de herramientas y facilidad de uso. Continuando con la impresión de la carcasa, se utilizó una BCN3d SIGMAX R19 para los platos que recubren la estructura y permiten el paso del aire. Para la base donde se aloja el sensor se utilizó una Bambu Carbon X1. Posterior al diseño de la carcasa, se optó por añadir una caja estanca en donde se alojaría la batería, controladores y sistemas electrónicos, con la intención de aislar los componentes de agentes como el agua, polvo o incluso animales e insectos.



Figura 4: Impresora BCN3d SIGMAX R19 (derecha)



Figura 5: Impresora Bambu Lab Carbon X1

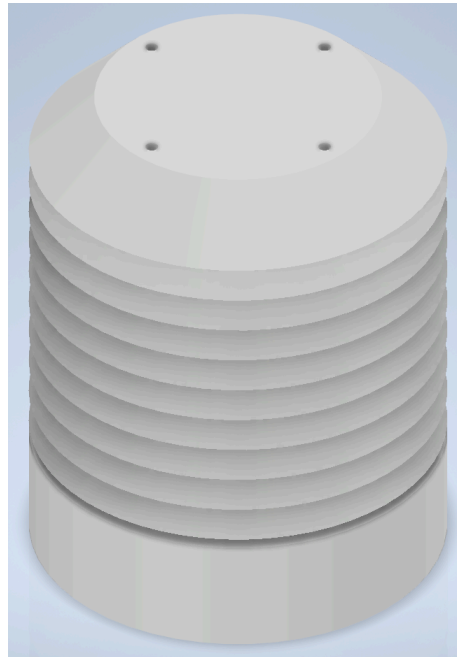


Figura 6: Primer diseño de la envolvente CAD Assembly

El sistema tiene como objetivo la reducción de costes y la conveniencia de mantenimiento, producción y rediseño. Considerando que un módulo completamente instalado puede estar ubicado en zonas rurales y remotas, sería beneficioso reducir tiempos de espera debido a la llegada de nuevas piezas o nuevos modelos para reemplazar dicho sistema. Éste puede ser modificado constantemente atendiendo distintas necesidades acordes a sus aplicaciones en el campo. Inicialmente, el primer prototipo será instalado con un trípode elaborado con el sistema de perfiles de aluminio que ofrece la empresa [Item](#), el cual nos permite adecuar todo el sistema dependiendo del terreno donde el modelo estaría midiendo. Por otra parte, el desarrollo de piezas a través de los softwares CAD nos permite elaborar iteraciones que logren optimizar el modelo y, de esta manera, no depender del stock disponible de los proveedores ni de los avances elaborados por RIKA para futuras instalaciones o nuevas soluciones.



Figura 7: prototipo final

La metodología principal para llevar a cabo este proyecto fue basada en el prototipado rápido. Gracias a las facilidades de la fabricación aditiva, se facilita el diseño, prueba y optimización del modelo en un ciclo que permite fabricar un modelo físico optimizado de una manera más rápida.

El inicio de este proyecto se lleva a cabo con la investigación acerca de las soluciones actuales, luego se procede a seleccionar los sensores necesarios para el sistema. Tras la selección, se procede a diseñar un prototipo acorde a la aplicación del sistema y los componentes sensoriales. Una vez culminado el diseño, se realizan pruebas del material y del sistema midiendo. Una vez finalizadas las pruebas se determina si son necesarias nuevas modificaciones.

Palabras clave:

Filamento ASA, Arduino, Open Source, Fabricación aditiva por extrusión de filamento.

Códigos UNESCO

3311: Ingeniería Mecánica

1203: Ciencias de la Computación, Programación y Software

3312: Ciencia de los Materiales

3311.16: Instrumentos de Medida de la Temperatura

ÍNDICE

Resumen	3
ÍNDICE	8
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	11
I.1 Antecedentes	11
I.2 Justificación	12
I.3 Delimitación y alcance	14
I.4 Objetivos de la Investigación	14
I.4.1 Objetivo general:	14
I.4.2 Objetivos específicos:	14
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	16
II.1 Incendios forestales y tecnología al servicio de la prevención	16
II.2 Plataforma Arduino	16
II.4 Selección de sensores ambientales	17
II.5 Fabricación aditiva y diseño estructural	17
II.7 Normativas técnicas consideradas	17
II.8 Tecnologías abiertas y sostenibilidad	18
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA	19
III.1 Tipo de estudio	19
III.2 Método de estudio	19
III.3 Ámbito de estudio	20
III.4 Diseño de la investigación	20
Fase 1: Análisis de antecedentes	20
Fase 2: Justificación del proyecto	21
Fase 3: Identificación y selección de sensores	21
Fase 4: Desarrollo de la programación y diseño del modelo	21
Fase 5: Fabricación del prototipo	21
Fase 6: Análisis del sistema y rentabilidad	21
III.1 Investigación del problema y soluciones potenciales	22
III.2 Selección de la electrónica	29
III.3 Programación de la electrónica	40
III.4 Selección del sistema Gateway	41
III.5 Selección de los materiales para la envolvente	46
III.6 Elaboración de la carcasa	53
III.6.1Diseño CAD	53
III.6.2 Impresión del escudo	62
III.7 Soporte del sistema	65
III.8 Prototipo Físico	68
III.9 Pruebas realizadas	70

III.9.1 Horno de precalentado	71
III.9.2 Pruebas de los sensores	72
III.9.3 Pruebas en el INIA	75
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	79
IV.1 Resultados de las pruebas en el CSIC	79
IV.1.1. Pruebas desde el 21/08/2024 hasta el 30/10/2024:	79
IV.1.2. Pruebas del 30/08/2024:	84
IV.2 Resultados de las quemas en el INIA	90
IV.2.1 Resultados de la quema el 4 de Noviembre	90
IV.2.2 Resultados de la quema el 5 de noviembre	94
IV.2.3 Monitoreo del medio ambiente durante las pruebas entre el 4 y 6 de noviembre.	96
IV.3 Evaluación de impactos: social, económico y medioambiental:	98
IV.4 Responsabilidad ética y legal:	98
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES	100
CAPÍTULO VI. LÍNEAS FUTURAS	102
CAPÍTULO VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103
CAPÍTULO VIII. PLANIFICACIÓN TEMPORAL Y PRESUPUESTO	106
VIII.1 Planificación temporal	106
VIII.2 Presupuesto	108
VIII.2.1 Estructura de costos del Sistema Final	108
VIII.2.2 Precio de un sistema comercial similar	111
APÉNDICE	112
Planos de las piezas fabricadas	113
Código del arduino	117
Glosario	119
Diseño Asistido por computador (CAD)	119
Fabricación aditiva	119
Impresión por extrusión de filamento	119
Filamento ASA	120
Filamento PLA	120
Filamento ABS	120
Arduino	120
Arduino IDE	120
Library Manager	120
LoRa	121
Gateway	121
ThingSpeak	121
Matlab	122
The Things Stack	122
Administrador de la energía solar	122

Sensores	123
Sensores de Temperatura	123
Sensores de Gases	123
Sensores de Humedad	124
I2C	124
Pull-Up	124
Cambio climático	125
Efecto invernadero	125
Energía Renovable	125
Panel Solar	126
Normativas ISO	126
Normativa ISO 4892	126
Clasificación de protección IP	126
Caja Estanca	126
Estación Meteorológica	127

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas son esenciales para la vida en la Tierra, ya que regulan el clima, sustentan la biodiversidad, producen oxígeno y absorben dióxido de carbono. Sin embargo, enfrentan amenazas constantes debido a actividades humanas, desastres naturales y el cambio climático, poniendo en riesgo su estabilidad y capacidad para sostener la vida. Entre estas amenazas, los incendios forestales destacan por su capacidad destructiva, afectando no solo el entorno inmediato, sino también la calidad del aire y el equilibrio ecológico global.

Esta problemática exige soluciones innovadoras que prioricen la prevención, en lugar de limitarse a mitigar los efectos de incendios ya activos. La implementación de tecnología avanzada, como sistemas de detección temprana basados en sensores, se presenta como una estrategia prometedora para monitorear condiciones ambientales y evitar la formación de incendios.

En este trabajo, se propone un sistema de nodos sensoriales con tecnología Arduino y fabricación aditiva, diseñado para detectar factores de riesgo en tiempo real. Su enfoque de bajo costo y código abierto busca facilitar su adopción a gran escala, accesibilidad y fácil implementación. De esta manera, se contribuye a la preservación de los ecosistemas y se brindan herramientas accesibles para su protección a largo plazo.

Otra ventaja sobre los equipos convencionales y la adquisición de sistemas a través de distribuidores y fabricantes, es que el modelo *open-source* que se plantea en este proyecto busca ofrecer soluciones optimizadas que logren reemplazar los sistemas actuales en el mercado y garantizar una serie de ventajas a nivel económico, ergonómico, logístico y de mejora continua.

I.1 Antecedentes

Los incendios forestales son una de las mayores amenazas globales para los ecosistemas, afectando bosques, litorales, montañas y estepas. Cada año, miles de hectáreas son destruidas, provocando la pérdida de biodiversidad, la destrucción del hábitat de especies y la emisión de contaminantes que impactan la salud pública y el equilibrio ecológico. A pesar de la existencia de métodos tradicionales como cortafuegos o equipos de emergencia, estos suelen aplicarse cuando el incendio ya está activo, limitando su eficacia y generando daños irreparables (EcologiaHoy, 2024).

A lo largo de la historia, los incendios han ocasionado tragedias significativas, como el incendio de Roma en el 64 d.C. o los recientes incendios en California, donde 800,000 hectáreas han sido arrasadas en una década (Cal Fire, 2018). Casos como el Black Saturday Bushfires en Australia, con 173 vidas perdidas, reflejan la magnitud del problema (Stewart, s.f). En España, entre Enero y Octubre de 2024, se registraron 13 grandes incendios que consumieron 42,000 hectáreas, y el promedio anual entre 2005 y 2015 fue de 100,796 hectáreas afectadas, con impactos ambientales y socioeconómicos significativos (Ministerio

para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, s.f). El sector agroalimentario, que representa el 11% del PIB español (UN Global Compact, 2018), también sufre consecuencias indirectas, al igual que el turismo, la ganadería y la protección del patrimonio. En términos ambientales, se destaca la importancia de los ecosistemas como generadores de oxígeno. Un kilómetro cuadrado de bosque puede producir mil toneladas de oxígeno al año, un recurso esencial para la vida humana (Cadenaser, s.f).

Frente a estos desafíos, surge la necesidad de sistemas de prevención más accesibles y escalables. Según Jankavic (2024), los métodos actuales suelen ser costosos y poco viables en regiones con recursos limitados. Por ello, se propone un sistema basado en nodos sensoriales con tecnología Arduino y fabricación aditiva, diseñado para recopilar datos climáticos y detectar condiciones propicias para incendios. Este enfoque, de bajo costo y código abierto, no solo facilita la implementación en áreas vulnerables, sino que también promueve el monitoreo climático a largo plazo y la adaptación tecnológica a diversas necesidades (Arduino, 2018). Este proyecto pretende ser una solución innovadora para la prevención de incendios y la sostenibilidad de los ecosistemas, fomentando su preservación a través de la tecnología y la colaboración abierta.

Se debe mencionar que la implementación de estos sistemas también busca reducir el tiempo de reacción ante un incendio, de esta manera, se protege el medio ambiente y se reducen las pérdidas forestales.

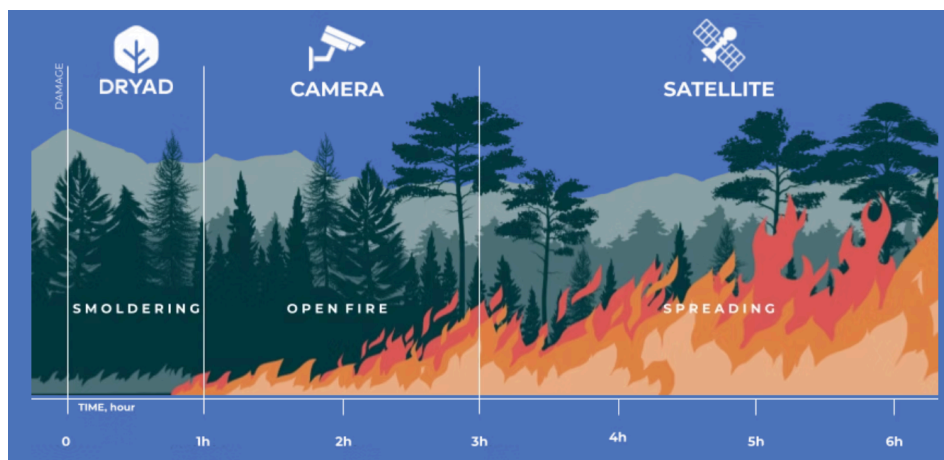


Figura 8: Ejemplo de propagación de un incendio forestal. DRYAD (s.f)

I.2 Justificación

El propósito inicial de este proyecto es ofrecer una solución contra los incendios forestales. Se desea proteger el medio ambiente y evitar cualquier daño que los incendios puedan ocasionar en zonas rurales. De esta manera, se busca preservar los ecosistemas y patrimonio de España. Por esas razones, los incendios fuera de control representan una

amenaza contra todo lo mencionado previamente. Además, se tiene como meta colaborar de alguna manera con la agenda de desarrollo sostenible de la ONU para el año 2030 y de esta forma hacer del planeta un lugar mejor.

Algunos de estos objetivos son:

- Salud y Bienestar
- Industria, Innovación e Infraestructura
- Ciudades y Comunidades Sostenibles
- Producción y Consumo Responsable
- Acción por el Clima
- Vida de Ecosistemas Terrestres

“La implementación de un dispositivo con una placa Arduino permite la medición de la radiación solar de manera económica y eficiente. Este enfoque es particularmente útil en investigaciones científicas y monitoreo ambiental, donde los recursos pueden ser limitados.” Jeffrey (2017), Hackster.io.

Otro de los objetivos de este proyecto, además de ofrecer una solución ante las amenazas climáticas, es demostrar que los métodos de fabricación aditiva y los sistemas de Arduino pueden ser utilizados para todo tipo de entorno, desde operaciones industriales, hasta soluciones médicas, incluso, trabajos específicos para el hogar. Al promover una mayor cantidad de proyectos, el desarrollo de la fabricación aditiva y la implementación de sistemas Arduinos pueden expandirse y abarcar más sectores científicos, lo que a largo plazo puede garantizar una mejora continua de los métodos de fabricación y de los sistemas de Arduino, potenciando la escala y las habilidades de ambos nichos.

Fabricar nuestro propio sistema nos brinda unas ventajas sobre los fabricantes convencionales, como la disponibilidad de repuestos, correcciones del modelo sin tener que sustituirlo por completo, la adaptación del modelo a cualquier necesidad y la libertad de rediseño en tiempo real sin la espera de las soluciones de otros.

Como bien se mencionó, en el resumen del proyecto, uno de los objetivos que busca alcanzar es proteger las áreas rurales designadas por el programa de becas ofertado. Entre estas zonas pilotos están:

- P1 Arenas de San Pedro
- P2 Carucedo
- P3 Jerez de los Caballeros
- P4 Santibañez el Alto
- P5 Fundão
- P6 Sant Julià de Lòria
- P7 La Massana



Figura 9: Mapa de las Zonas Piloto del proyecto Senforfire Fuente: Senforfire (s.f)

I.3 Delimitación y alcance

La delimitación de este proyecto fue establecida por el CSIC en Madrid, donde se determinaron y evaluaron los procesos de prototipado e instalación del proyecto. Como parte de la evaluación del proyecto y sus métodos de elaboración, se tuvo en cuenta las capacidades de tanto la fabricación aditiva, como los sistemas de Arduino, debido a que se buscaba reducir gastos y garantizar la fiabilidad y factibilidad del proyecto dependiendo del presupuesto que ha sido empleado por la organización.

Además de los límites logísticos y de los materiales, se seleccionaron zonas específicas en donde se implementarán estos modelos. Como se ha indicado anteriormente, estas zonas piloto, mostradas en la figura 1, permiten visualizar el alcance territorial del proyecto y cómo la diferencia geográfica interestatal puede afectar en la recopilación de información.

I.4 Objetivos de la Investigación

I.4.1 Objetivo general:

- Elaborar un sistema meteorológico a partir de la fabricación aditiva y la utilización de Arduinos junto a una configuración de sensores destinados a la detección y prevención de incendios forestales a través de tecnologías de fabricación aditiva.

I.4.2 Objetivos específicos:

- Justificar la necesidad del proyecto exponiendo las razones y necesidades que motivan el desarrollo de un sistema de detección de incendios.

- Identificar y elegir los sensores esenciales para la recopilación de datos necesarios para la detección efectiva de incendios.
- Desarrollar la programación del Arduino basándose en los sensores seleccionados y diseñar un modelo adaptado a las necesidades del sistema utilizando herramientas CAD.
- Determinar materiales adecuados y técnicas de impresión, fabricar el prototipo del case, e incorporar los sensores.
- Analizar el sistema final y elaborar una comparativa económica considerando todos los gastos de elaboración, comparándolos con otras técnicas de fabricación.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

Este capítulo busca contextualizar de manera teórica y técnica las decisiones tomadas para diseñar e implementar el sistema de detección y prevención de incendios forestales. Para ello, reúne los conceptos y herramientas tecnológicas utilizados en el desarrollo del prototipo, con base en principios de sostenibilidad, tecnología accesible y eficiencia operativa en entornos rurales.

II.1 Incendios forestales y tecnología al servicio de la prevención

Los incendios forestales tienen un impacto ecológico, social y económico importante. La detección y prevención tempranas son una estrategia clave porque es improbable contener el fuego, una vez se propaga, sin generar daños. La contención, además, debería realizarse en los primeros 45 minutos, que son críticos, posteriores a la ignición como indica la Figura 8. Por lo tanto, es de crucial importancia el desarrollo de sistemas que puedan anticiparse y monitorear las condiciones que pudiesen derivar en incendios como lo son la temperatura, los gases inflamables y la humedad relativa.

II.2 Plataforma Arduino

Arduino, una plataforma de hardware libre, constituye el eje central del sistema. Además de ser ampliamente utilizada en el desarrollo de sistemas embebidos, es una opción adecuada para proyectos de monitoreo ambiental por su accesibilidad, comunidad de soporte y flexibilidad de integración con diversos sensores. De la plataforma, se escogió el modelo MKR WAN 1310 debido a su bajo consumo energético, dimensiones compactas y compatibilidad con comunicaciones LoRaWAN (Long Range Wide Area Network).

Arduino permite la programación mediante el entorno Arduino IDE. Además, facilita el desarrollo de soluciones escalables en el ámbito del Internet de las Cosas (IoT), lo cual resulta adecuado para el monitoreo en tiempo real de condiciones climáticas en zonas de difícil acceso al permitir la integración, interpretación e intercambio de datos entre diversos equipos.

II.3 Comunicación mediante redes LoRaWAN

El sistema de detección y prevención de incendios está orientado a entornos remotos y rurales. Por ello, se necesita una tecnología que proporcione conectividad inalámbrica de largo alcance y bajo consumo como la *Long Range Wide Area Network*. A través de este sistema, los nodos sensoriales transmiten datos hacia un gateway central, el cual posteriormente los redirige a plataformas de almacenamiento y visualización como *ThingSpeak*. El *gateway* utilizado en este proyecto fue el *Gateway Milesight UG67* porque no requiere de la infraestructura de red convencional al ofrecer cobertura suficiente para la recepción de los datos ambientales captados por los sensores. El tipo de conectividad permite desarrollar redes distribuidas de sensores con alta autonomía energética.

II.4 Selección de sensores ambientales

Para la medición de variables críticas para la detección de incendios se escogieron los siguientes sensores especializados. En primer lugar, el SCD41 de Sensirion, un sensor fotoacústico que mide los niveles de dióxido de carbono, la temperatura y la humedad relativa. También, el MiCS-6814 de SGX Sensortech, un sensor multigas que detecta los niveles de dióxido de nitrógeno y amoníaco además de los niveles de dióxido de carbono. Se seleccionaron estos sensores por su disponibilidad, documentación técnica conocida y eficiencia en condiciones de campo. Además, presentan alta sensibilidad, estabilidad, compatibilidad con sistemas Arduino y se comunican mediante un protocolo I2C.

II.5 Fabricación aditiva y diseño estructural

La carcasa de los sensores fue desarrollada a través de diseño asistido por computador utilizando Autodesk Inventor y fabricación aditiva con impresoras 3D como la BCN3D SIGMAX R19 y la Bambu Lab Carbon X1. De esta manera, se logró una fabricación rápida y precisa realizando iteraciones sucesivas hasta optimizar el prototipo. Se utilizó el filamento ASA, Acrilonitrilo Estireno Acrilato, para la impresión por su estabilidad dimensional y durabilidad en la intemperie dada entre otras cosas por su resistencia a las altas temperaturas y radiación UV.

II.6 Ensayos

Los túneles de viento al aire libre tienen como ventaja sobre aquellos confinados que simulan condiciones más realistas de combustión al aire libre. Además de simular la ausencia de confinamiento característica de los incendios, permite abundancia de oxígeno. Se ha demostrado que los túneles de viento al permitir más réplicas que los ensayos de campo en condiciones controladas y garantizar la obtención más precisa de un mayor número de variables, son un instrumento de utilidad tanto en la investigación como en la gestión (Madrigal et al., 2014).

Para este trabajo de investigación se utilizó el túnel del viento del Laboratorio de Incendios Forestales del INIA-CIFOR, el cual consta de un recinto y un ventilador. Durante dos días de pruebas, el 4 y 5 de noviembre, se realizaron diversas quemas de diferentes tipos de materiales biológicos. El sistema meteorológico, que este trabajo de fin de grado busca desarrollar, con sus dos sensores se utilizó para registrar las variables producidas por el incendio: temperatura, humedad, NH₃, NO₂, CO, CO₂.

II.7 Normativas técnicas consideradas

Se tomaron en cuenta las siguientes normativas técnicas internacionales aplicables a componentes expuestos a condiciones ambientales adversas. La norma ISO 4892, la cual proporciona la normativa a seguir para realizar ensayos de resistencia a la radiación UV. La clasificación de protección IP65, la cual está relacionada con la protección contra el ingreso de polvo y salpicaduras de agua. Por último, la norma ISO 9227 que regula los ensayos de

corrosión en ambientes artificiales. Se utilizaron estas normativas como estándar para garantizar que la carcasa, y consecuentemente el sistema, estuviese aislada frente a humedad, impacto y contaminantes.

II.8 Tecnologías abiertas y sostenibilidad

Desde su concepción, el proyecto ha estado alineado con el paradigma *open-source* con el objetivo de permitir el acceso libre a los diseños, códigos y esquemas de conexión desarrollados. A través de esta democratización de la tecnológica, se busca favorecer la replicabilidad, incrementar la cooperatividad y reducir los costos.

Otro eje ético del proyecto es colaborar con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) definidos por la ONU. Específicamente, se busca avanzar los relacionados a la innovación, acción por el clima y protección de ecosistemas terrestres; contribuyendo al desarrollo de soluciones a los incendios forestales replicables en contextos vulnerables y de bajos recursos. Para ello, se deben implementar e integrar tecnologías de bajo impacto ambiental y alto valor funcional como las aquí propuestas.

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

III.1 Tipo de estudio

El presente trabajo corresponde a un estudio experimental y de investigación aplicada, orientado al desarrollo tecnológico y la prevención de incendios forestales, mediante el diseño y prueba de un sistema accesible, eficiente y sostenible.

- **Naturaleza del estudio:** Este es un estudio experimental porque incluye el diseño, desarrollo y validación de un prototipo físico que combina tecnologías como placas Arduino, sensores especializados y fabricación aditiva. Cada etapa del proyecto, desde la selección de materiales hasta las pruebas de funcionamiento, se basa en experimentación iterativa para garantizar que el sistema cumpla con su propósito en condiciones reales.
- **Enfoque aplicado:** En respuesta a la problemática de los incendios forestales, el proyecto adopta un enfoque práctico y orientado a la solución de problemas. Su propósito principal es prevenir y detectar incendios de manera temprana, utilizando tecnologías de bajo costo y código abierto, accesibles para aplicaciones en zonas rurales con recursos limitados.
- **Relevancia tecnológica y medioambiental:** Este estudio también se encuadra como un proyecto de desarrollo tecnológico, donde convergen áreas como la electrónica, la ciencia de materiales y la programación. Se busca ofrecer una herramienta que no solo optimice la detección de incendios, sino que también reduzca el impacto ambiental mediante el uso de tecnologías sostenibles.

En conjunto, este estudio experimental, práctico y tecnológico está alineado con la necesidad urgente de proteger los ecosistemas forestales frente al riesgo de incendios, brindando soluciones accesibles y replicables que contribuyan a la preservación ambiental y al bienestar de las comunidades rurales.

III.2 Método de estudio

Para la identificación y cumplimiento de los objetivos planteados en este trabajo, se aplicaron los métodos de observación y análisis. Para ello, partiendo de la investigación de las soluciones actuales para la detección de incendios en entornos relevantes, se identificaron sus limitaciones y áreas de mejora. También se analizaron, en base al estudio de recursos bibliográficos y casos de implementación, cuáles serían las herramientas, materiales y tecnologías necesarias para desarrollar un sistema de detección de incendios eficiente, que mejore la seguridad y la respuesta ante emergencias.

III.3 Ámbito de estudio

El ámbito de estudio contiene las pruebas realizadas en entornos controlados. En estos lugares se llevaron a cabo pruebas experimentales donde se determinaron la funcionalidad y desempeño del prototipo ante situaciones similares a la realidad.

- **Instalaciones del CSIC:** Aquí se desarrollaron las pruebas iniciales con el prototipo. Se colocó inicialmente en el estacionamiento de las instalaciones y luego sobre el techado del edificio. Con los resultados de estas pruebas, se determinó si el sistema funcionaba apropiadamente.
- **Pruebas experimentales en el INIA:** Para validar el sistema en condiciones más cercanas a un incendio real, se utilizó un túnel de viento en el que se simuló un incendio controlado. El sistema de medición fue colocado dentro de esta configuración para analizar su respuesta ante las variaciones de humedad, temperatura, gases emitidos (CO_2 , CO , NH_3) y la capacidad del sistema para transmitir datos en tiempo real.

Estos entornos de prueba permitieron verificar tanto la precisión de las mediciones como la resistencia del sistema a condiciones adversas, proporcionando datos clave para ajustar y optimizar el diseño del prototipo antes de su implementación en escenarios reales.

III.4 Diseño de la investigación

El diseño de la investigación se estructuró en etapas que combinan un enfoque experimental, descriptivo y aplicado, orientado al desarrollo y validación de un sistema tecnológico para la prevención de incendios forestales. Estas etapas se diseñaron para garantizar un avance progresivo desde la conceptualización del prototipo hasta su evaluación en condiciones controladas.

Fase 1: Análisis de antecedentes

Se llevó a cabo una investigación de antecedentes. Para ello, se consultaron diversas fuentes, incluyendo artículos científicos, GitHub, proyectos Open-Source, manuales técnicos y casos de estudio y productos de empresas que han implementado sistemas de detección de incendios o tecnologías similares. Estas referencias permitieron validar la selección de sensores, el diseño del sistema, la programación del Arduino, la fabricación del prototipo y el análisis de rentabilidad. Además, se recopiló información sobre técnicas de fabricación, materiales y costos asociados, lo que contribuyó a la correcta implementación y evaluación del sistema propuesto.

Fase 2: Justificación del proyecto

Se realizó un análisis de las razones y necesidades que motivan el desarrollo de un sistema de detección de incendios. Para ello, se llevaron a cabo estudios estadísticos relacionados con incendios en entornos similares. Además, se identificaron las limitaciones de los sistemas actuales de detección de incendios y se justificó la necesidad de un nuevo sistema más eficiente y adaptado a las necesidades específicas del entorno.

Fase 3: Identificación y selección de sensores

Se investigaron y evaluaron diferentes tipos de sensores (como sensores de humo, temperatura y gas) para determinar cuáles son los más adecuados para la detección efectiva de incendios. Se realizó una comparativa técnica basada en su precisión, costo, facilidad de integración y durabilidad. Finalmente, se seleccionaron los sensores que mejor se adaptan a los requisitos del sistema propuesto.

Fase 4: Desarrollo de la programación y diseño del modelo

Se desarrolló la programación del Arduino utilizando los sensores seleccionados, asegurando que el sistema pueda procesar y responder adecuadamente a los datos recopilados. Paralelamente, se diseñó un modelo 3D del case (carcasa) utilizando herramientas CAD, considerando factores como resistencia, volumen, materiales, costo y adaptabilidad a los componentes electrónicos. Este diseño se ajustó a las necesidades específicas del sistema para detectar incendios.

Fase 5: Fabricación del prototipo

Se determinaron los materiales más adecuados para la fabricación de la carcasa, considerando su resistencia al calor, durabilidad y costo. Se seleccionaron técnicas de impresión 3D para la fabricación del prototipo, y se procedió a su construcción. Una vez fabricada la carcasa, se integraron los sensores y se realizaron pruebas preliminares para verificar su correcto funcionamiento.

Fase 6: Análisis del sistema y rentabilidad

Se analizó el sistema final, evaluando su eficacia en la detección de incendios y su capacidad de respuesta en diferentes escenarios. Además, se elaboró una carta de rentabilidad que incluyó todos los gastos asociados a la elaboración del prototipo (materiales, sensores, impresión 3D, etc.). Este análisis se comparó con los costos de otras técnicas de fabricación y sistemas comerciales existentes, determinando la viabilidad económica del proyecto.

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para el desarrollo del proyecto se implementó la metodología ágil e iterativa, debido a la constante mejora y cambio del prototipo inicial. Por ende, debe de establecerse una serie de pasos estándar que conlleven al progreso del proyecto constantemente. De esta manera, se incentiva el futuro desarrollo de nuevas soluciones en base a este primer prototipo, para ofrecer nuevas alternativas que afronten el problema de los incendios y la sostenibilidad. Los pasos a utilizar en la metodología son:

- Descripción del problema
- Definir requisitos y problemas a solventar
- Desarrollo de un prototipo inicial
- Análisis funcionales del modelo
- Retroalimentación de resultados
- Realización de iteraciones optimizadas

III.1 Investigación del problema y soluciones potenciales

Para el desarrollo del proyecto se deben identificar los problemas al momento de gestionar un incendio forestal. El principal es detectarlo a tiempo, ya que la propagación de estos ocasiona daños exponenciales en la zona afectada, agravado por factores como las áreas de alta vegetación seca, vientos elevados, poca humedad y temperaturas. Para visualizar cronológicamente la formación de un incendio se detallan las siguientes etapas:

Etapas	Magnitud	Duración
Ignición	Pequeños incendios	0-45 minutos
Propagación inicial	Inicia la expansión acelerada	45 mins - 5 horas
Respuesta inicial	El incendio es detectado y se inician protocolos para extinguirlo	2 horas - 1 día
Máxima intensidad	El incendio alcanza su punto máximo de intensidad y expansión	1 día - 5 días
Contención	Se detiene el avance del fuego	1 día - semanas
Extinción	Se apagan las grandes llamas y se monitorea una posible reignición	Semanas - 1 mes
Recuperación	Inicio de la restauración y recuperación del medio ambiente	Meses

Tabla 1: Temporalidad de los incendios.

Los valores de la tabla superior pueden variar dependiendo de la topología del terreno, cantidad de nubes en el cielo, velocidad de los vientos, temperatura general del ambiente y estado de la vegetación (DRYAD SILVANET, sf.).

El análisis de la temporalidad de un incendio permite identificar los puntos claves para evitar el crecimiento exponencial de un incendio. El período más relevante corresponde a las primeras horas del incendio. Reducir los riesgos de la propagación inicial evita que el incendio alcance su máxima intensidad y de esta manera su alcance destructivo. Por esta razón, la base fundamental del diseño está relacionada con la vigilancia y alerta de posibles formaciones y etapas iniciales de un fuego forestal.

En este contexto, tenemos que el diseño debe contener:

- Sistema monitoreo: Sensores que interpretan los factores principales ante el desarrollo de un incendio.
- Sistema de alerta: Un protocolo de conectividad que permita comunicar los resultados de los sensores y poder interpretarlos en tiempo real.
- Propiedades resistentes ante los incendios: El módulo requiere de un diseño y materiales que permitan la captación de datos, mientras que protegen la electrónica contra todos los factores del aire libre que puedan dañar los componentes.
- Económico: Un sistema accesible pero que cumpla con las demandas de su tiempo de operación.
- Reparable: Un sistema que se le haga mantenimiento y que sea fácil de reparar en el caso de que ocurran contratiempos.
- Accesibilidad: Un modelo que pueda ser replicable o que sus piezas estén disponibles; de esta manera no habrá inconvenientes a la hora de reposición.

El análisis de las necesidades y requerimientos planteados demuestra que es necesaria una investigación de los sistemas o soluciones comerciales existentes con la finalidad de comprender las alternativas existentes. Por esa razón, la etapa de desarrollo y diseño comenzó con los análisis sensoriales (cantidad y tipos de sensores), análisis estructurales y el estudio de los costes y materiales y sus aspectos logísticos.

A través de la investigación se identificaron las siguientes soluciones comerciales:

- **RIKA RK95-01 y RK330-01**

Este modelo está constituido por un escudo de radiación solar y un sensor propietario de RIKA. El sensor es agregado a través de la conexión inferior de la base del escudo y es capaz de medir temperatura, humedad y presión barométrica. El sistema consiste de una base en conjunto con platos huecos, los cuales permiten la circulación del aire en el interior del

sistema. De esta manera, el sensor es capaz de recibir medidas adecuadas y a su vez estar protegido ante la radiación UV y otros elementos.

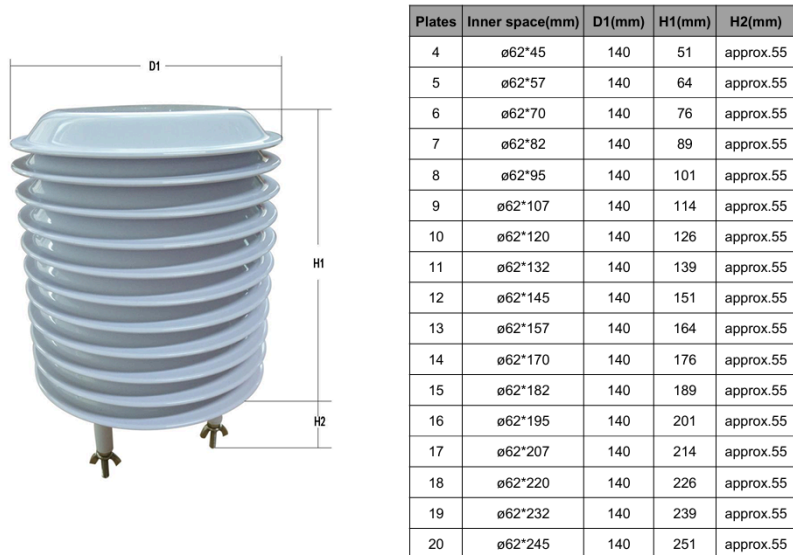


Figura 10: RIKA RK95-01



Figura 11: RIKA RK330-01

Ítem	Especificaciones técnicas		
	Temperatura	Humedad	Presión
Rango	-40-60t	0-100%RH	10-110kPa(100-1100 hPa)
Resolución	0.1°C	0.5%RH	0.1hPa
Exactitud	±0.5t	±3%RH	±1 hPa
Suministro	5VDC, 12-24VDC		
Señal de salida	4-20mA,0-5V,0-10V,RS485(MODBUS),11C0		
Consumo energético	<20mA		
Temperatura de operación	-40°C-+80°C		
Certificado de protección	IP65		
Capacidad	10-60 °C @20%-90%RH		
Peso	120g		
Material	ABS		
Escudo de radiación solar	RK95-01,11 platos		

Tabla 2: Especificaciones técnicas del sensor RIKA RK330-01

El escudo está elaborado con un polímero ABS resistente a los rayos UV y tiene certificación IP65 haciendo el módulo resistente a partículas sólidas y salpicadura de agua. El escudo es modular y permite la variación de platos acorde a la necesidad y ubicación. También, se puede adquirir el escudo sin necesidad del sensor, por lo se podría elaborar un sensor aparte al de RIKA con otras propiedades.

La empresa cuenta con diversas certificaciones para sus productos como de ISO 9001, RoHS y diversas certificaciones de la calibración de su instrumentación.

- **Silvanet Wildfire Sensor**

Es un sistema desarrollado por la empresa **DRYAD** de origen alemán, que consiste en la elaboración de una arquitectura de redes sensoriales por las cuales se mide en tiempo real distintos parámetros indicativos de una posible formación de incendio.



Figura 12: Silvanet Wildfire Sensor de DRYAD

Este dispositivo está enfocado a la detección temprana de incendios para poder minimizar su propagación y los potenciales daños que estos podrían generar. Está constituido por un sensor de gases de Bosch, el BME 688, el cual capta CO_2 , CO, VOC, H_2 , humedad, temperatura y presión del aire; con un rango de operabilidad que está dividido entre una de presión del aire de 300 y 1100 de hpa, una humedad del 0%-100% y un rango de temperatura entre los -40 y los 85 °C. Además, su conectividad consiste en una red LoRa que se conecta a un Gateway local, el cual envía los datos recogidos a un módulo denominado Gateway Border. Éste, normalmente instalado en los extremos de los bosques, traslada las medidas capturadas a un servidor que redirige los resultados a la nube, facilitando la medida en tiempo real.



Figura 13: Silvanet Mesh Gateway de DRYAD



Figura 14: Silvanet BorderGateway de DRYAD

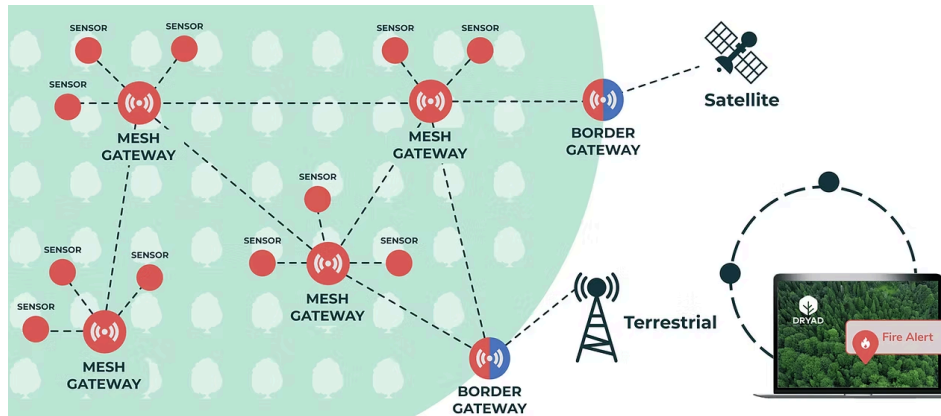


Figura 15: Silvanet arquitecturas de sus redes. DRYAD

- **VisionTIR**

VisionTIR es una empresa española enfocada en la fabricación de sistemas de visión multispectral con aplicaciones de monitorización, detección temprana de incendios y control de calidad, entre otros. Su sistema termográfico FireTIR tiene presencia en la vigilancia forestal, a través de las imágenes y equipos termográficos para captar en tiempo real. Además, contiene un sistema de prealarma para evitar falsas advertencias debido a la actividad humana, como por ejemplo, vehículos o maquinarias.



Figura 16: Sistema de cámaras duales FireTIR.

Una ventaja de este sistema es su localización directa sobre el incendio, brindando una alta precisión al momento de afrontar las incidencias y permitiendo la visualización del área, lo que garantiza la captura de la raíz del problema, sea por causas naturales, accidentes o actividad humana.



Figura 17: Captura de cámaras del sistema FireTIR

- **Drones**

Una alternativa similar a la de VisionTIR para el uso de cámaras para el reconocimiento y vigilancia ante incendios forestales es la introducción de los drones. Estos tienen la capacidad de sobrevolar el área afectada y capturar imágenes en diversos ángulos, pudiendo funcionar como herramientas de auxilio para gente que se encuentre en un incendio para indicar rutas de salida. También se les puede incorporar un sistema de extinción de incendios para combatir cualquier formación temprana de estos. Sin embargo, no pueden sostener un monitoreo constante, ya que, debido a su consumo energético, ofrecen un tiempo de vuelo corto. Por ejemplo, un dron de alta calidad como el [DJI MAVIC 3 PRO](#) alcanza los 43 minutos de vuelo, siendo insuficiente para el monitoreo de un día completo. Por ello, la recomendación es utilizar esta solución como complemento a otras propuestas, con el objetivo de garantizar datos precisos y tiempos de respuesta adecuados para minimizar daños.



Figura 18: Drones utilizados por bomberos. Fuente: Consorcio Provincial de Bomberos de Alicante.

III.2 Selección de la electrónica

El desarrollo de la electrónica parte de la selección de los parámetros a medir a través de los sensores respectivos. Para ello, se determinó que el sistema debe de capturar medidas de temperatura, humedad, CO, CO₂, NH₃ y NO₂, por su relevancia en la formación de un incendio. Por ejemplo, el sensor de temperatura permite analizar cambios bruscos de

temperatura para determinar si es posible una formación de incendio o si ya se ha formado. El CO se forma en el momento de combustión incompleta de compuestos orgánicos o algún combustible, como gas propano, combustible o petróleo, lo que indica la formación o inicios de un incendio. El CO₂ se genera cuando la vegetación afectada por los incendios libera el CO₂ almacenado. El NO₂ es otro gas producto de la combustión de componentes inflamables o en este caso bosques, cuya medida puede facilitar la identificación de un posible incendio.

Para la implementación del proyecto, se seleccionó un sensor Sensirion SEK-SCD41 y un MiCS-6814. El primero permite la medición del CO₂, temperatura y humedad, mientras que el segundo se encarga de captar el CO, NH₃ y NO₂.

- **SEK-SCD41**

La serie de sensores **SCD4X** están enfocados a la medición de CO₂. Se basan en los principios fotoacústicos NDIR (Infrarrojo no dispersivo), utilizando la tecnología patentada de Sensirion PASens y CMOSens, tecnologías que permiten reducir el tamaño del sensor gracias a su circuito integrado en un chip de CMOS. El sensor también puede medir humedad relativa y temperatura gracias al sensor SHT4X, que contiene un sensor capacitivo para la humedad y un termistor que cambia su resistencia al variar la temperatura. El sensor de medición de CO₂ viene calibrado de fábrica con los parámetros de la norma ISO9001:2015 y acreditado por el ILAC (International Laboratory Accreditation Cooperation). Por otro lado, el sensor SHT4X viene calibrado y certificado cumpliendo con la normativa ISO17025.

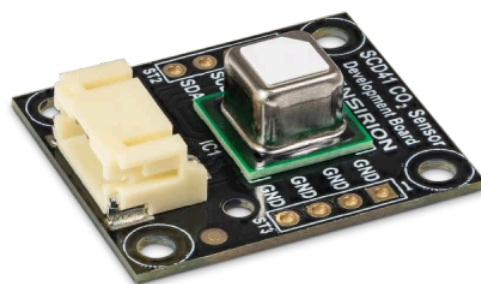


Figura 19: Sensirion SEK-SCD41

En las siguientes tablas se muestra el desempeño y características del sensor para cada medición:

Las condiciones de 25°C, 50 % humedad relativa, 1013 mbar de presión ambiental, operación continua en modo de medición periódica y 3.3V de voltaje de suministro son aplicables a todos los valores de la siguiente tabla a menos de que se especifique lo contrario (Sensirion).

Parametros	Condiciones	Valor
Rango de salida de CO ₂	-	0 - 40'000 ppm
SCD40 CO ₂ exactitud de medida	400 ppm- 2'000 ppm	±(50 ppm. 5% de lectura)
SCD41 CO ₂ exactitud de medida	400 ppm- 1'000 ppm	±(50 ppm 2.5% de lectura)
	1'001 ppm- 2'000 ppm	±(50 ppm 3% de lectura)
	2'001 ppm- 5'000 ppm	±(40 ppm 5% de lectura)
Repetibilidad	Típico	±10 ppm
Tiempo de respuesta	T63%, Típico, cambio de paso 400-2'000 ppm	60 s
Deriva de precisión adicional por año, a partir de los cinco años	Rango de concentración típico de CO ₂ que la precisión de medición especificada por el sensor	±(5 ppm + 0,5% de lectura)

Tabla 3: Rango de medida del CO₂ SCD41 (Sensirion).

El sensor integrado del SCD4X, su autocalentamiento, modo de operación y el entorno afectan el desempeño del sensor de humedad y temperatura. Para cumplir con las especificaciones, el desplazamiento de la temperatura del SCD4x dentro del dispositivo de consumo debe configurarse correctamente (Sensirion).

Parámetro	Condiciones	Valor
Rango de medición de humedad		0 % HR – 100 % HR
Precisión (típico)	15 °C – 35 °C, 20 % HR – 65 % HR	±6 % HR

	-10 °C – 60 °C, 0 % HR – 100 % HR	±9 % HR
Repetibilidad	Típico	±0,4 % HR
Tiempo de respuesta	T63%, modo de medición periódico típico	90 s
Deriva de precisión		<0,25 %HR / año

Tabla 4: Rango de medida de la Humedad SCD41

Parámetro	Condiciones	Valor
Rango de medición de temperatura		-10 °C - 60 °C
Precisión (típico)	15 °C - 35 °C	± 0,8 °C
	-10 °C - 60 °C	± 1,5 °C
Repetibilidad		± 0,1 °C
Tiempo de respuesta	T63%, modo de medición periódico típico	120 s
Deriva de precisión		< 0,03 °C / año

Tabla 5: Rango de medida de la Temperatura SCD41 (Sensirion).

Parámetro	Condiciones	Valor
Condiciones de funcionamiento de la temperatura		-10 – 60 °C
Condiciones de funcionamiento de la humedad	Sin condensación	0 – 95 % HR
Nivel MSL		1
Tensión de alimentación de CC		-0,3 V – 6,0 V
Voltaje máximo en pines SDA, SCL, GND		-0,3 V – VDD + 0,3 V
Corriente de entrada en los pines SDA, SCL, GND		-280 mA – 100 mA
Temperatura de almacenamiento a corto plazo		-40 °C – 70 °C
Temperatura de almacenamiento recomendada		10 °C – 50 °C
ESD HBM (almohadillas y tapa metálica)		2 kV
CDM de EDS		500 V
Intervalo de mantenimiento	Libre de mantenimiento cuando se utiliza el algoritmo ASC.	Ninguno
Vida útil del sensor	Condiciones de funcionamiento típicas	>10 años

Tabla 6: Condiciones de operación del sensor SCD41 (Sensirion).

El sensor tiene conectividad a través de la interfaz I2C por la cual se comunica el sensor con el Arduino. A través de las líneas SCL y SDA, se establece la frecuencia y los datos enviados, mientras que la alimentación del sensor es suplida por la conexión VDD y la tierra por la GND.

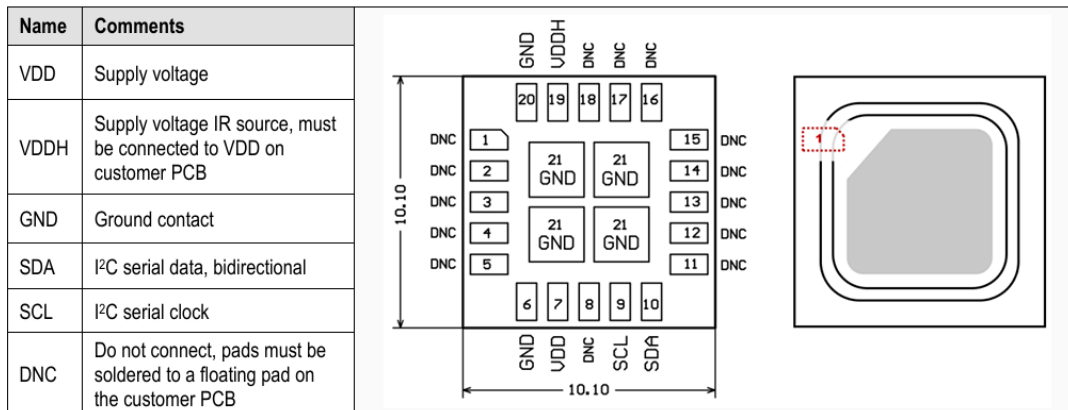


Figura 20: Interfaz de conectividad del sensor SCD41

- **MiCS-6814**

El **MiCS-6814** es un sensor fabricado por SGX Sensortech. Está basado en un MEMS (Sistema Mecánico Micro Eléctrico) que utiliza 3 chips de detección y funciona a través de unas resistencias y capas de sensibilidad independientes para cada chip que facilitan la captura de datos. Este sensor es utilizado normalmente para la detección de agentes contaminantes emanados por combustibles o la detección de gases en la industria agrícola. Este sensor cumple con las normativas ISO 9001, ISO 14001 y la ISO 45001. Sin embargo, no viene calibrado por lo que se requiere de un tratado previo antes de la instalación del equipo.

Uno de los sensores de detección que este sistema utiliza es el (OX) utilizado para gases en oxidación, mientras que el (RED) permite la captación de gases por la reacción redox y el último es empleado para la detección de NH₃.

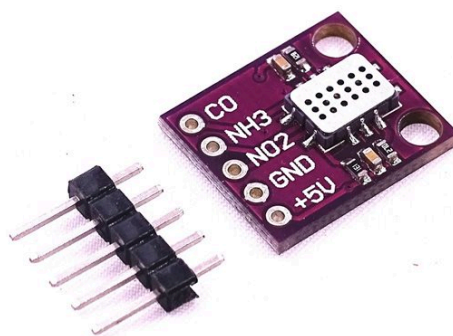


Figura 21: SGX Sensortech MiCS-6814

El sensor no viene calibrado. Por lo tanto, el sistema debe de programarse acorde a las indicaciones de Sensortech con el objetivo de traducir la señal de voltaje a ppm, para ello iniciamos mostrando los parámetros de operación para cada sensor de detección.

Sensor RED característico	Símbolo	Typ	Min	Máximo	Unidad
Detección de resistencia en el aire	R ₀	-	100	1500	kΩ
Rango típico de detección de CO	FS	-	1	1000	ppm
Factor de sensibilidad	S ₆₀	-	1.2	50	-

Tabla 7: Desempeño del sensor RED (para CO) SGX Sensortech MiCS-6814

Sensor OX característico	Símbolo	Typ	Min	Máximo	Unidad
Detección de resistencia en el aire	R ₀	-	0.8	20	kΩ
Rango típico de detección de NO ₂	FS		0.05	10	ppm
Factor de sensibilidad	Sr	-	2	-	-

Tabla 8: Desempeño del sensor OX (para NO₂) SGX Sensortech MiCS-6814

Sensor OX característico	Símbolo	Typ	Min	Máximo	Unidad
Detección de resistencia en el aire	R ₀	-	10	1500	kΩ
Rango de detección típico de NH ₃	FS		1	300	ppm
Factor de sensibilidad	Sr	-	1.5	15	-

Tabla 9: Desempeño del sensor de NH₃ SGX Sensortech MiCS-6814

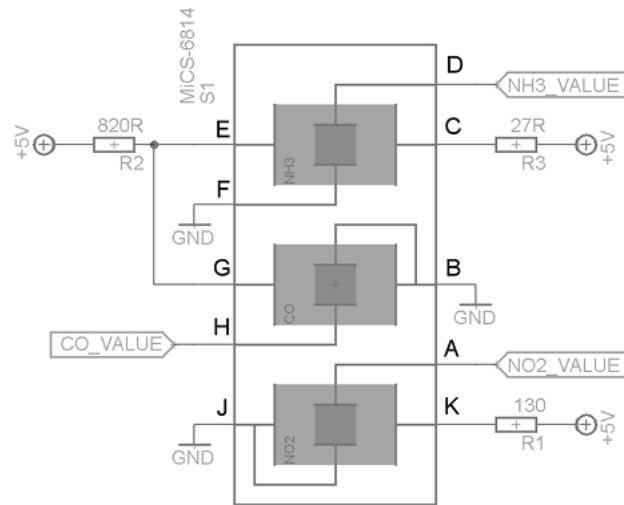


Figura 22: Esquema de alimentación del sensor SGX Sensortech MiCS-6814 y los tres elementos de medición.

- **Arduino MKR WAN 1310**

El **MKR WAN 1310** es un modelo de placa base de Arduino que utiliza redes LoRa lo que le permite conectarse a sistemas gateway que permiten acceso a la nube. Este modelo contiene un procesador desarrollado por ARM, el Cortex M0 32-bit SAMD21 en conjunto con un módulo de Murata CMWX1ZZABZ y un chip de seguridad ECC508. (docs.arduino.cc, S.f)

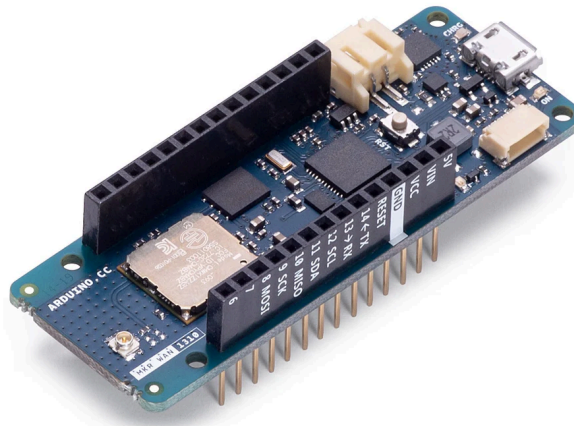


Figura 23: Arduino MKR WAN 1310

El dispositivo tiene la capacidad de ser alimentado a través del cableado USB con una batería. Este requiere de una alimentación de 5V para operar de manera correcta, mientras que el voltaje de operación del circuito es 3.3V. La tarjeta contiene 8 Pines digitales y 8 pines analógicos y, además, tiene un puerto de conexiones I2C. Los rangos de frecuencias portadoras del LoRa son (433/868/915 MHz). Las dimensiones del Arduino son: 67.64 mm

de largo, 25 mm de ancho y tiene un peso de 32 g, siendo ideal para espacios reducidos y envoltentes pequeñas.

Debido a los beneficios del MKR WAN 1310, como el costo, conectividad LoRa para la IoT, dimensiones, puertos de conexión (analógicos y digitales) y su facilidad de uso, se decidió utilizarlo para la instalación del sistema. De esta manera, los sensores se conectarán en la placa del Arduino y éste trasladará las señales capturadas a través del programa propietario de Arduino (Arduino IDE) al servidor una vez programado para la nube.

- **DFRobot DFR0535**

El [DFRobot DFR0535](#) es un administrador de energía solar, principalmente enfocado a proyectos IoT con necesidades de alta eficiencia. El DFR0535 tiene el papel de cargar un sistema a través de la energía solar, además de regular la energía suministrada. Para ello, utiliza el MPPT (Maximum Power Point Tracking). El módulo es capaz de proporcionar una corriente de carga de 2 A para una batería de litio de 3,7V con adaptador de CA (dentro de 30 V) o cargador USB, y tres convertidores CC-CC controlables ON/OFF individuales con salidas de 5 V 1,5 A, 3,3 V 1 A y 9 V/12 V 0,5 A.

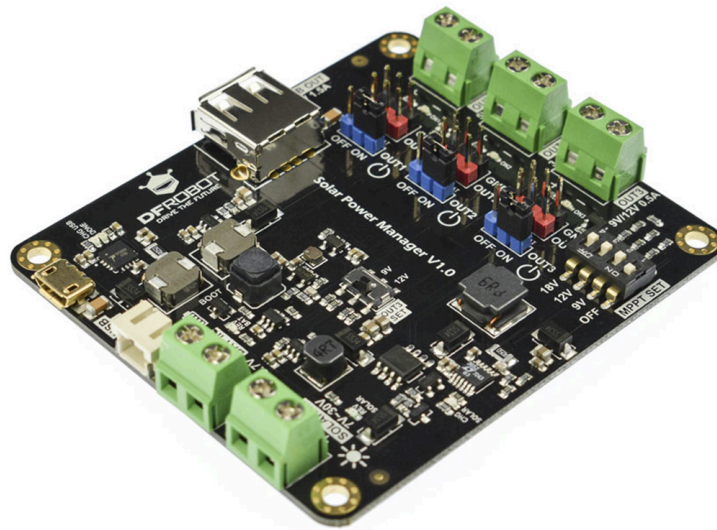


Figura 24: DFRobot DFR0535

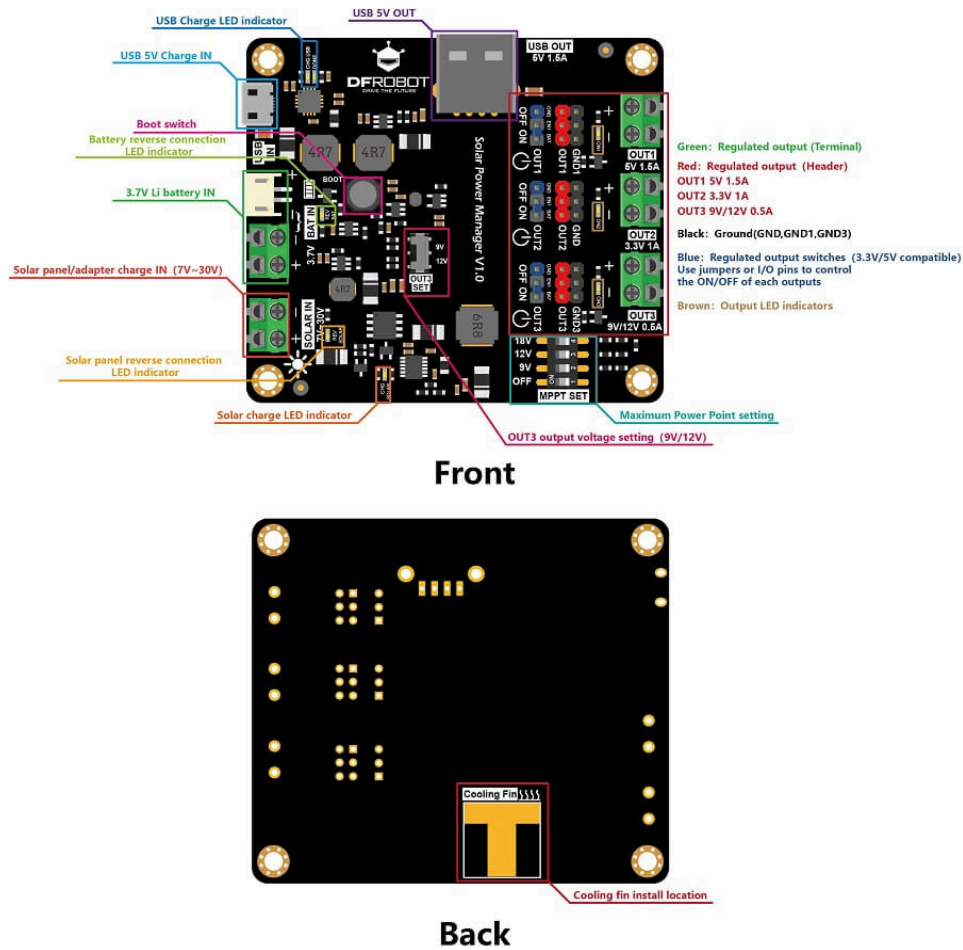


Figura 25: Board View del DFR0535

Este administrador de energía solar, gracias a su fiabilidad, garantizará que el equipo sostenga carga utilizando los dos sensores. Por otro lado, los beneficios de protección aseguran que el sistema sea más robusto contra errores de instalación o problemas en la alimentación.

De hecho, este módulo es capaz de emplear funciones de protección para el sistema, como la de protección de conexión inversa de la batería o panel solar, o protección contra altas temperaturas.

- **Fuentes de alimentación**

Para la alimentación del Arduino y los sensores del sistema es necesario instalar dos fuentes energéticas, una batería y un panel solar. La batería es de Li-Ion de 3.7V, 7.8Ah y 28.86Wh, de forma que el sistema se mantenga operativo en la tarde y la noche (debido a la ausencia de luz solar). El panel solar es de 12W, con el objetivo de que el sistema pueda operar y a su vez logre cargar la batería. De esta manera, el sistema sería totalmente independiente y no requiere de una alimentación fija para poder funcionar.

Características de la batería:

- Fabricante: **RS PRO**
- Rango de funcionamiento (-20 C, +60 C)
- Dimensión: 68x55x19mm
- Cables positivo y negativo de terminales crimpados.
- Tres células, 3.7V
- Capacidad de carga de 7.8 Ah
- 28.86 Wh



Figura 26: Batería recargable RS PRO

Características del panel solar:

- Fabricante: [TYCON SYSTEMS](#)
- Modelo: TPS-12-15W
- Rango de funcionamiento: (-40 C, +85 C)
- Dimensión: 370x360x17mm
- Capacidad de potencia continua: 3.75W
- Peso: 1.5Kg
- Potencia máxima: 15W
- Voltaje máximo: 17.6V
- Corriente máxima: 0.85A

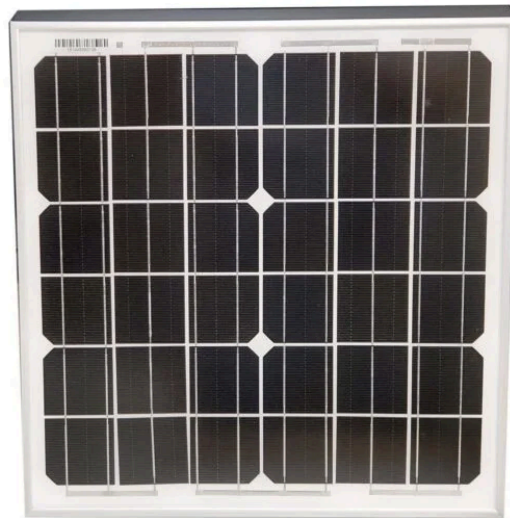


Figura 27: Panel solar Tycon Systems

La orientación que debe de tener el panel solar en Madrid para captar la mayor cantidad del sol durante el día es con una inclinación de 45 grados y en dirección hacia el hemisferio sur.

III.3 Programación de la electrónica

Para la programación del sistema se utilizó Arduino IDE, un programa basado en el lenguaje C/C++, que se utiliza para manejar o controlar hardware. El software utiliza un sistema de bibliotecas donde se facilita la comunicación del Arduino con los sensores instalados. Tras definir las variables y dispositivos necesarios para la ejecución del código, se inician las funciones que funcionan en bucle, incluyendo la captura y el envío de datos.

Profundizando un poco acerca de los pasos para la programación, cabe destacar lo siguiente:

1. Configuración inicial del sistema

Durante esta etapa se inicia la creación de un ID en el sistema para que el gateway a través de códigos reconozca al equipo y se establezca una conexión entre ambos dispositivos. Para ello se utiliza el AppKey y el AppEui, que le asignan un código único al Arduino que el sistema necesita reconocer para comenzar la conexión.

2. Adquisición de datos de los sensores

Los sensores conectados al Arduino capturan los datos del medio ambiente mediante el ajuste de distintos parámetros, como por ejemplo, los intervalos de medición, la duración y la frecuencia de la medición.

Para el caso del sensor MiCS-6814 se requiere de una conversión de la señal analógica (en milivoltios) a ppm (partículas por millón). Ésta se lleva a cabo con la siguiente ecuación:

$$ppm = Valor\ de\ captura * \left(\frac{ppm\ Max - ppm\ Min}{1023} \right) + ppm\ Min$$

En donde el *valor de captura* es el resultado de la medida analógica, el rango de valores *ppm máx-mín* establece los límites de las medidas de cada gas y el 1023 es la escala máxima de la lectura analógica del Arduino, en este caso 3.3V. Este cálculo se debe de realizar para cada gas medido, ya que tienen diferentes rangos de medición.

3. Transmisión de datos mediante LoRaWAN

Una vez procesados los datos, estos se empaquetan en un arreglo de 12 bytes para ser transmitidos a través del protocolo LoRaWAN. Tras conectarse con el gateway, estos datos proceden a ser enviados a la nube en donde se muestra el historial de captura.

El paquete de datos incluye las mediciones de CO₂, temperatura, humedad, CO, NH₃ y NO₂, comprimidas en un formato eficiente para minimizar el consumo de ancho de banda.

III.4 Selección del sistema Gateway

Una vez programado el Arduino se introduce el sistema a la nube a través de The Things Network (TTN) con el servidor de The Things Stack (TTS). Para empezar, se deben registrar los equipos con las Appkeys descritas en el código, para lo que se debe crear una cuenta en TTN. Posteriormente, se crea el registro de la configuración del arduino, donde luego se selecciona el dispositivo y los datos de éste. Una vez obtenidos los datos, se puede configurar la red para llevar esos datos a la nube, donde se tendría acceso desde cualquier dispositivo.

Una vez registrado el Arduino, se crea un webhook donde se transmite la información capturada. Para ello, se utiliza ThingSpeak para recibir, almacenar y visualizar los datos, por lo que se agrega el canal de ThingSpeak para cada nodo añadido a la red.

Para el desarrollo de la red, se utiliza un gateway [Milesight UG67 LoRaWan](#), el cual tiene un chip de LoRa SX1302 con un rango de 15 km sin interferencia, pero con 2 km de cobertura en un área urbanizada. El módulo tiene protección IP67, lo que garantiza protección ante polvo, agua y hasta sumersión de 1 metro de profundidad. Además, el sistema trabaja bajo un rango de temperatura de -40 °C hasta +70 °C.

El Gateway también cuenta con un CPU elaborado por ARM, el Cortex-A53 64-bit, que posee cuatro núcleos a una velocidad de reloj de 1.5GHz; una capacidad de memoria de 2GB DDR4 de RAM y un almacenamiento eMMC de una capacidad de 32GB. El sistema admite expansión del almacenamiento a través de una tarjeta Micro SD o un puerto para una SSD NVMe M.2.

Es importante mencionar que el rango de conexión del Arduino es bastante superior, ofreciendo hasta 5 Km en un área urbanizada, 10 Km en una suburbana y hasta 80 Km en lugares ininterrumpidos, por lo que facilita la aplicación teórica de una red de sensores, colocando el Gateway en las afueras del perímetro.



Figura 28: Milesight UG67 LoRaWan Hotspot

El Milesight cuenta con varios sistemas de conexión, como cableado de ethernet, Wi-Fi y antena celular. Sin embargo, utilizaremos la interfaz de LoRaWAN, la cual contiene las siguientes características:

LoRaWAN	
Antena	2 x Antenas internas + 2 x 50 Ω Conectores externos N-female
Canal	8 (Semi/Dúplex completo)
Banda de frecuencia	CN470 / IN865 / EU868 / RU864 / US915 / AU915 / KR920 / AS923-1 y 2 y 3 y 4
Sensibilidad	-140dBm Sensibilidad @292bps
Potencia de salida	27dBm máx.
Protocolo	V1.0 Clase A/Clase B/Clase C y V1.0.2 Clase A/Clase B/Clase C

Tabla 10: Características de la interfaz del LoRaWAN

La visual que se obtiene en la nube puede ser configurada acorde a las necesidades del usuario. Para este caso, se representaron las tablas de las diferentes medidas a lo largo del tiempo en el portal de ThingSpeak, como se muestra a continuación:

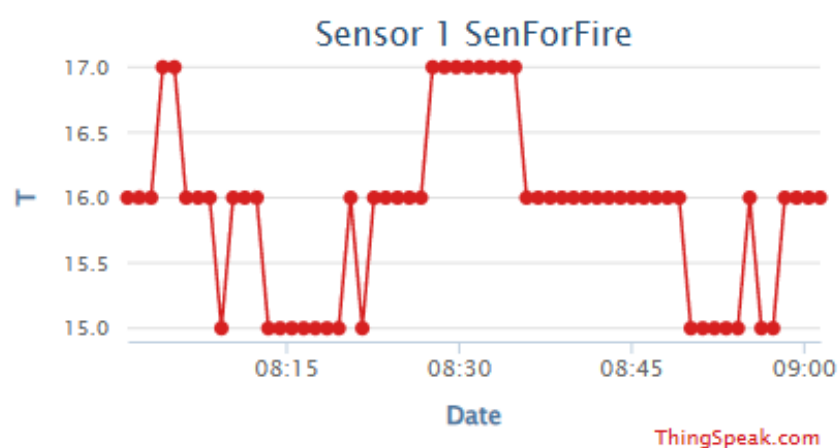


Figura 29: Muestra de temperatura en el portal de Thingspeak

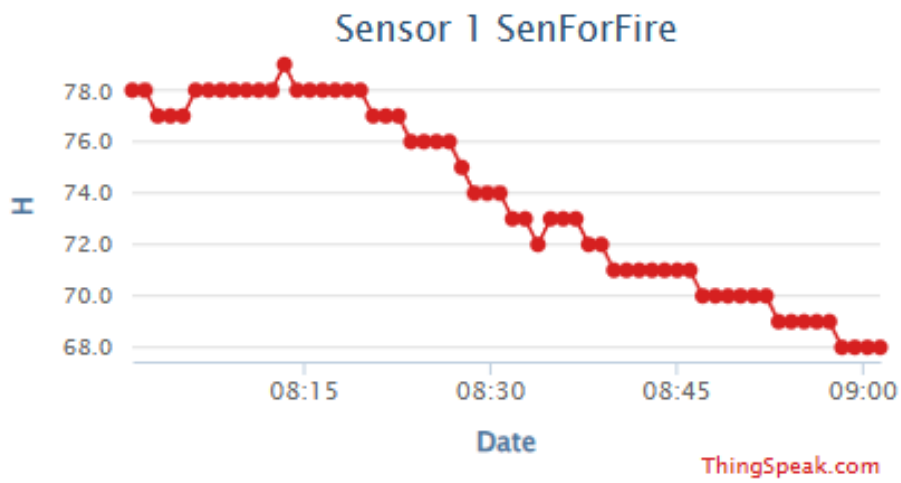


Figura 30: Muestra de Humedad en el portal de Thingspeak

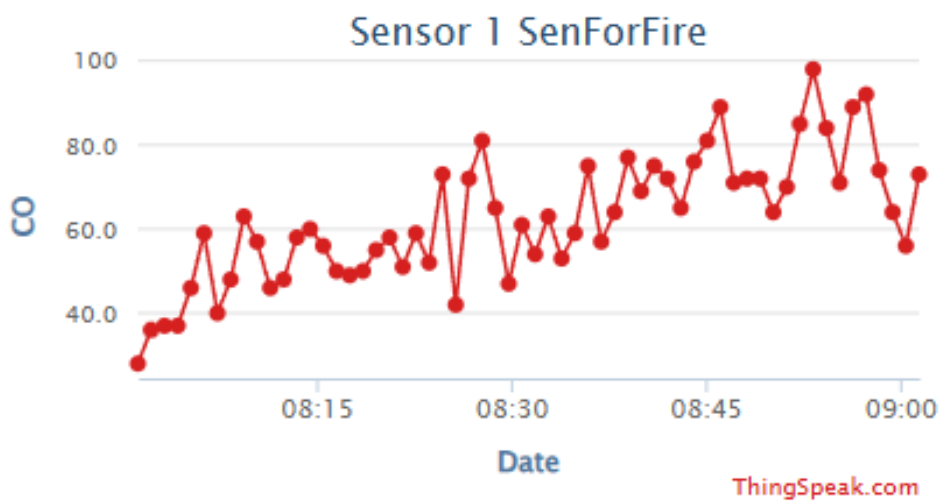


Figura 31: Muestra del CO en el portal de Thingspeak

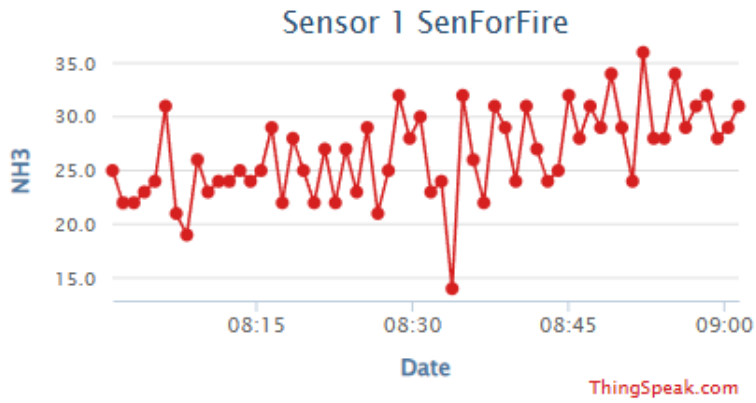


Figura 32: Muestra de NH₃ en el portal de Thingspeak

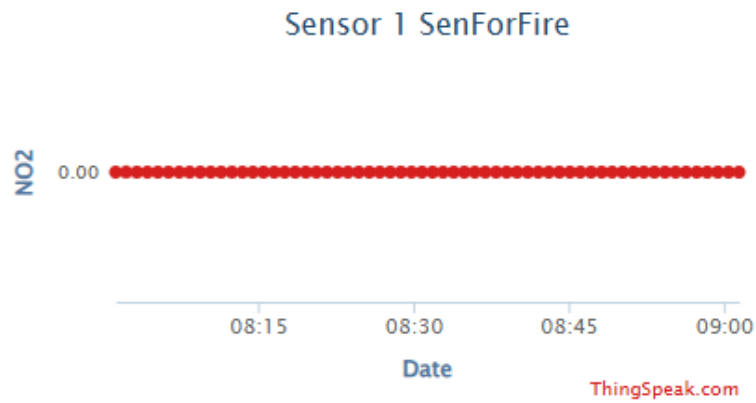


Figura 33: Muestra de NO₂ en el portal de Thingspeak

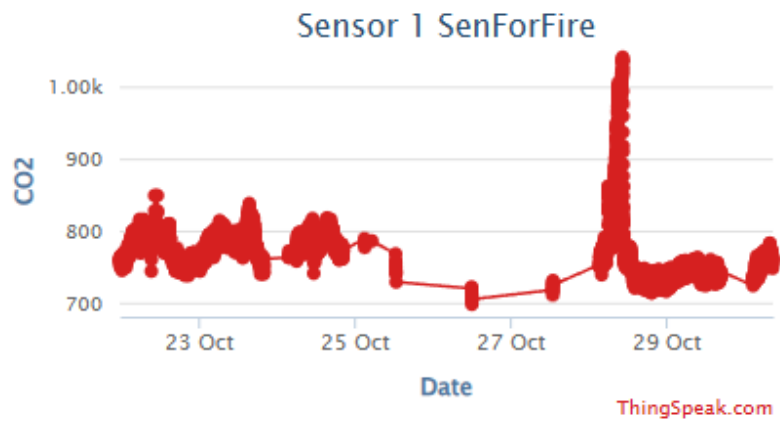


Figura 34: Muestra de temperatura en el portal de Thingspeak

III.5 Selección de los materiales para la envolvente

Para la elaboración de la carcasa, se requiere de materiales que puedan soportar los factores de la intemperie, siendo uno de los más importantes la radiación UV ejercida por el sol. Dado que la fabricación aditiva por extrusión de filamento utiliza plástico, se determinó que el polímero a utilizar debe de cumplir con una serie de normativas ISO, simulando las propiedades de un producto ya existente en el mercado.

Entre las normativas están los IP ratings para la protección de la electrónica que se encuentra dentro de la carcasa, que debe garantizar protección ante sólidos y líquidos. Se han considerado diferentes normativas, como la norma ISO 9227 regula la resistencia ante la corrosión a la que estos materiales se ven expuestos, la ISO 14001, que va orientada a la sostenibilidad ambiental, promoviendo el desarrollo sostenible de la carcasa y la ISO 9001, cuyo objetivo es la implementación de sistemas de calidad. Por otra parte, la envolvente que va a contener a los sensores requiere de una buena ventilación y que no retenga el calor, evitando errores en la medida.

Dadas las condiciones anteriores, el proyecto inicia la búsqueda de un material que logre cumplir con los requerimientos previamente descritos. Para ello, se ha tenido en cuenta información fundamental obtenida a través de artículos científicos y de otros proyectos que han facilitado la selección de materiales. En base a esta información, se tomó la decisión de seleccionar el ASA como material de impresión, ya que ofrece unas propiedades bastantes similares al ABS, con menor rigidez que el PLA y con una resistencia al calor y radiación solar bastante mayor a cualquiera de estos dos anteriormente nombrados.

Entre las fuentes empleadas, cabe destacar el siguiente estudio: HardwareX por J.S Botero-Valencia, M. Mejía-Herrera y Joshua M. Pearce (2022). Este estudio corrobora que el ASA ofrece una protección y durabilidad adecuadas en un entorno similar a las zonas piloto. Para demostrarlo, desarrollaron un escudo de radiación solar por impresión 3D, empleando diferentes filamentos, como PLA y ASA, y estudiaron qué configuración ofrecía una mejor precisión de medida, comparando los resultados con un sistema que no tenía un escudo de radiación solar.

Asimismo, realizaron ensayos de compresión para estudiar la degradación del material bajo diferentes condiciones climáticas, variando el tiempo expuesto a la intemperie. Se comprobó que los filamentos ASA garantizaban una mayor resistencia ante la compresión tras diferentes tiempos de exposición a la intemperie, como se observa en las siguientes figuras:

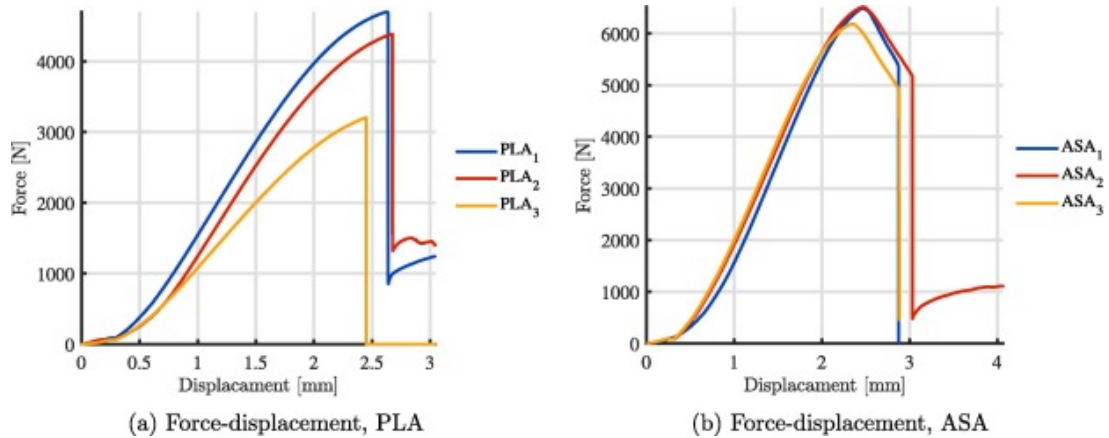


Figura 35: Gráficas de los test de compresión tras la exposición contra condiciones climáticas. (HardwareX, 2022)

El estudio también analizó el rendimiento de ambos filamentos ante la transmitancia (normalizada), corroborando que el filamento ASA, además de ofrecer una mayor resistencia a compresión y una menor degradación, posee una menor transmitancia, lo cual nos da un buen indicio para ser aplicado en el trabajo.

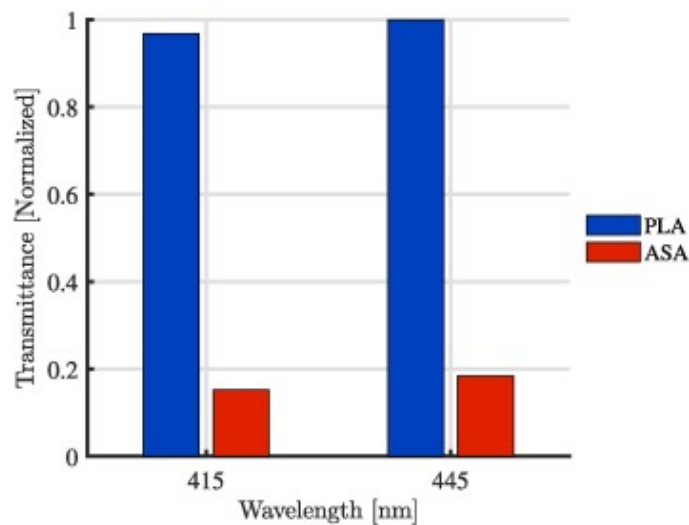


Figura 36: Gráfica de los niveles de transmitancia (HardwareX, 2022)

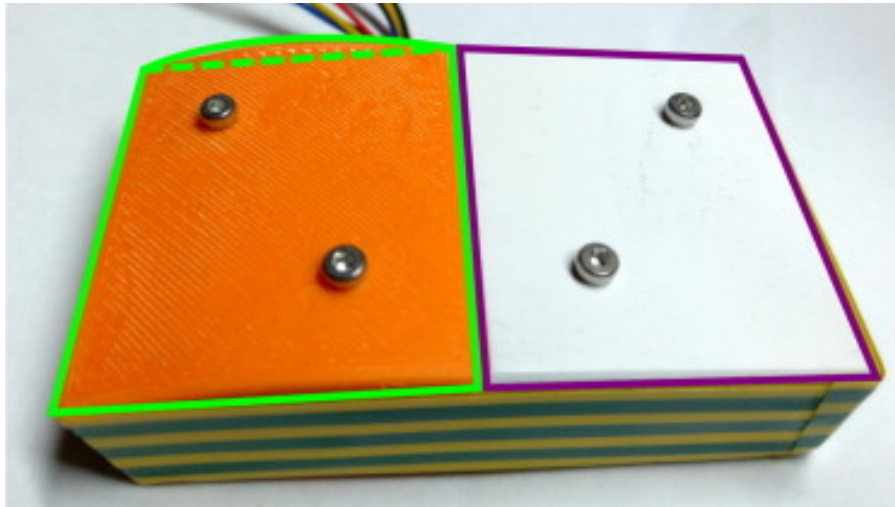


Figura 37: Comparación de filamentos y su deformación (PLA naranja, ASA blanco) (HardwareX, 2022)

La siguiente tabla muestra los Datasheets de Stratasys con las propiedades físicas y mecánicas bajo una misma orientación de impresión (XZ) de tres filamentos, el PLA, ABS y ASA, que están en consonancia con los resultados del estudio previamente descrito.

Prueba	Metodo	<u>ASA</u>	<u>PLA</u>	<u>ABS</u>
HDT@66 PSI	ASTM D648	102.2 C	53	103.8 C
HDT@264 PSI	ASTM D648	97.9 C	51	99.9 C
Conductividad Térmica	ASTM E1952 @30	0,1642 W/m*K	NA	0.14-0.21 W/m*K
Impacto Unnotched	ASTM D4812	732 (140) J/m	192 J/m	423 (96) J/m
Límite elástico de tracción	ASTM D638	26.9 (1.4) Mpa	45 Mpa	32.5 (1.7) Mpa
Resistencia a flexión @ 5%	ASTM D790	60.6 (2.3) Mpa	84 Mpa	58.1 (2.2) Mpa

Tabla 11: Propiedades de los filamentos.

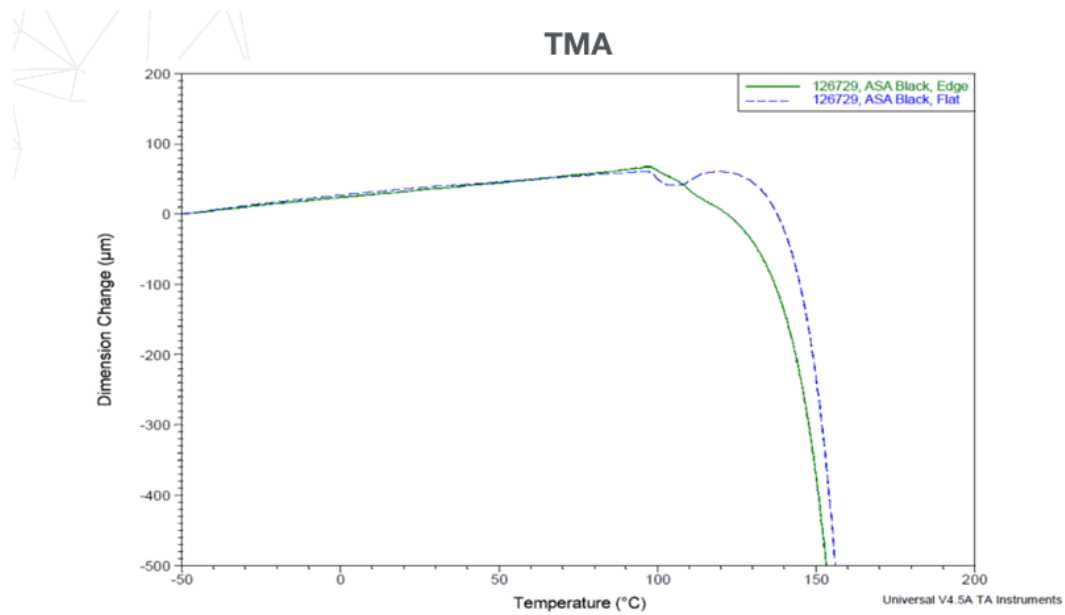


Figura 38: Cambio de dimensión conforme a la temperatura ASA, Stratasys.

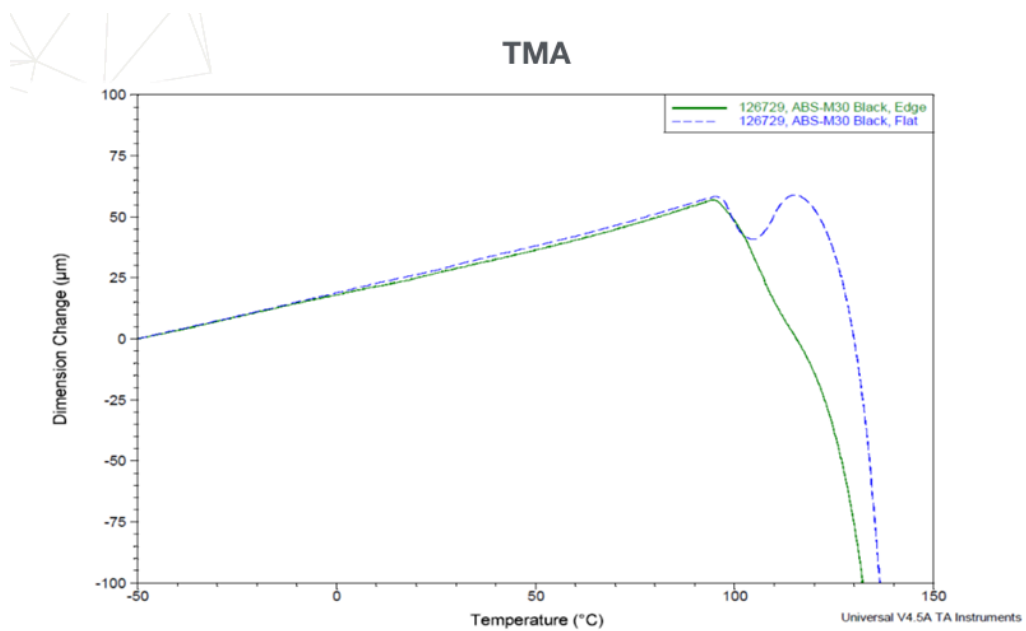


Figura 39: Cambio de dimensión conforme a la temperatura ABS, Stratasys.

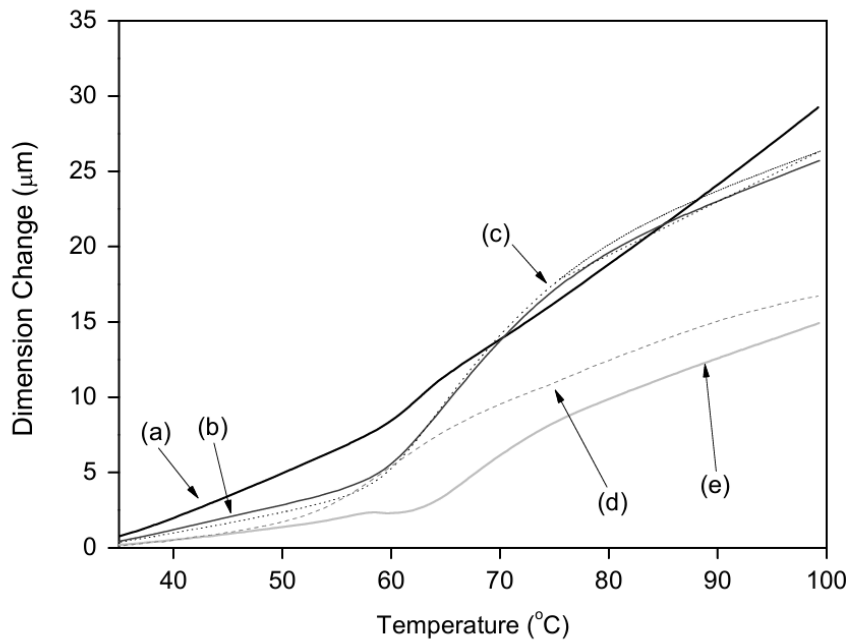


Figura 40: Cambio de dimensión conforme a la temperatura PLA, Lee, J. (2010)

Propiedad	Valor, Métrica
Densidad	1,05 g/cm ³
Alargamiento a la rotura	26%
Dureza	104
Máxima resistencia a la tracción	47.6 Mpa

Tabla 12: Propiedades de ASA, Xometry

Propiedad	Valor, Métrica
Densidad	1,24 g/cm ³
Alargamiento a la rotura	5.2%
Dureza	83
Máxima resistencia a la tracción	49.5 Mpa

Tabla 13: Propiedades de PLA, Xometry

Propiedad	Valor, Métrica
Densidad	1,06 g/cm ³
Alargamiento a la rotura	48%
Dureza	69-118
Máxima resistencia a la tracción	46 Mpa

Tabla 14: Propiedades de ABS, Xometry

Con los valores previamente obtenidos podemos concluir que el ASA ofrece un buen balance entre sus propiedades mecánicas y físicas para ser utilizado en el proyecto. Además, Stratasys menciona las buenas propiedades del filamento y su resistencia UV, por lo que es ideal para afrontar los factores degenerativos de la intemperie.

Como ejemplo de la resistencia térmica del ASA tenemos los primeros resultados de impresión con el filamento.

Por otro lado, la electrónica del Arduino, administrador energético y la batería requieren de una instalación aparte o alejada de los sensores, con el objetivo de protegerlos y evitar que las medidas como la temperatura se vean influenciadas por la actividad de estos dispositivos. Debido a esto, para el prototipo se utilizó una caja estanca eléctrica de Spelsberg, la [Abox-i 060-L](#). La caja tiene unas dimensiones de 110x110x67 mm, posee una protección IP65 y tiene propiedades resistentes contra la radiación UV ya que está elaborada a base de policarbonato y reforzada con fibra de vidrio.



Figura 41: Caja estanca eléctrica Abox-i 060-L Spelsberg.

Otras características de la caja son:

- Certificaciones VDE (DIN EN 60670-1/-22 (VDE 0606-1/-22), DLG (Resistencia contra el amoníaco) y DNV (Class: Ships and Offshore Installations).
- Un peso de 0.2282 kg
- Resistencia a impactos IK08

Ya con las especificaciones establecidas para desarrollar la envolvente, se procede a programar el Arduino para iniciar el proceso de prototipado.

III.6 Elaboración de la carcasa

Para la elaboración de la carcasa se debe empezar con un diseño CAD. Después de elaborar el diseño, se exportan las piezas en formato STL para iniciar la etapa de impresión mediante los softwares Cura y Bambu Studio. Comenzando con el diseño se establecen dimensiones, materiales y número de piezas. Inicialmente se contempló desarrollar una carcasa que contenga toda la electrónica junta (Arduino, controlador energético y sensores), pero, tras analizar las desventajas que esto presentaba, se decidió dividir la electrónica en sistema de captación y sistema de comunicación y alimentación. El primer prototipo muestra las primeras iteraciones del diseño CAD, pero cabe mencionar que futuras iteraciones podrían ofrecer distintas soluciones y ampliar el repertorio de funciones y sensores.

III.6.1 Diseño CAD

Para los diseños en CAD, se utilizó Autodesk Inventor. Este programa es un software de diseño capaz de elaborar bocetos 2D y piezas 3D, con herramientas que permiten asignarles a las piezas diseñadas materiales, desarrollar simulaciones sobre estas e incluso ajustar tolerancias y ensamblajes. El programa facilita la creación de prototipos e incluso permite ajustar el diseño acorde al tipo de fabricación a implementar para formar la pieza.

Inicialmente partimos de la elaboración de un Sketch en un plano 2D, en el cual se empiezan a dibujar las geometrías necesarias para dar forma a una pieza. Una vez culminado el sketch, se implementan las herramientas de extrusión, loft y revolve para desarrollar la pieza deseada. Este proceso se realiza hasta que se culminen las piezas requeridas para el ensamblaje. En este proceso, se insertan las relaciones de contacto y conexiones entre piezas con el objetivo de corroborar que todas las piezas cumplan con un cierto nivel de tolerancia y no existan conflictos entre piezas.

Al desarrollar una pieza en Inventor se puede guardar la pieza en distintos formatos. Por ejemplo, el formato IPT (Inventor Part), el cual contiene todas las especificaciones e instrucciones de elaboración de la pieza, lo que permite realizar modificaciones en caso de correcciones o nuevas iteraciones facilitando el acceso a la documentación de los pasos de fabricación en el software.

Para la etapa de impresión se utiliza el formato STL, este es un formato de transmisión de datos estándar por excelencia de la industria de creación rápida de prototipos. Además, es el formato que se debe utilizar al interactuar con Quickparts. Este formato aproxima la superficie de un modelo sólido con triángulos. Para un modelo simple, como el cuadrado que se muestra en la Figura 42, se puede aproximar a sus superficies con doce triángulos, como se

muestra en la Figura 2 dentro de la Figura 42. Cuanto más compleja sea la superficie, más triángulos se deberán emplear, como se muestra en la Figura 3 dentro de la misma Figura.

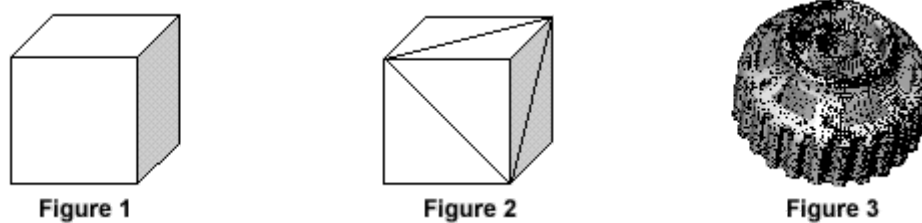


Figura 42: Formato de piezas digitales.

Casi todos los sistemas de CAD actuales pueden generar un archivo STL. Para el usuario, el proceso a menudo es tan simple como seleccionar Archivo, Guardar como y STL. A continuación, se detallan los pasos para generar archivos STL de alta calidad mediante varios de los principales sistemas de CAD actuales. En todos los casos, debe exportar el archivo STL como un archivo binario. Esto permite ahorrar tiempo y disminuir el tamaño del archivo.” 3dsystems (s.f).

Otra de las razones por las que se utilizan los archivos STL es porque serán utilizados para la exportación de los diseños CAD a los software de impresión 3D.

Una vez diseñadas todas las piezas se procede a realizar un ensamblaje con cada una de ellas. Esto permite dimensionar al sistema completo y comprender cuáles son algunos de los puntos por los cuales se acoplan entre sí y con el soporte. En esta etapa se utiliza un archivo IAM, el cual es un formato de archivo que se genera a partir de la realización de un ensamblaje, es decir, se utilizan varios componentes como por ejemplo, múltiples piezas IPT o STL y se realiza un armazón y esto genera un único archivo que contiene todas las restricciones de posiciones y uniones entre esas diversas piezas.

Una manera más concreta de describir el formato de archivo IAM es a través del artículo de File extensión (S.f) en el cual se explica que:

“Los archivos IAM son creados por Autodesk Inventor para almacenar elementos llamados unidades funcionales. Los archivos IAM contienen datos que definen la posición de un elemento determinado y sus relaciones con otros elementos (por ejemplo, alineación de tornillos de montaje, ajustes de rodamientos, etc.). Autodesk Inventor permite al usuario diseñar o modificar elementos funcionales guardados en archivos W IAM. De esta manera el usuario puede descomponer un módulo y utilizar sus elementos para un nuevo proyecto. El usuario también puede expandir unidades funcionales, cambiar su ubicación o agregar nuevos elementos a los módulos.”

El ensamble está conformado por una base inferior, los platos intermedios, el plato superior, 4 tornillos sin fin de 25cm de longitud, 8 tuercas, 8 arandelas y una base de acople, que se utilizaría en casos que ameriten instalar el sistema en extremos del poste.

Algunos de los puntos capturados del primer modelo es que se puede reducir la dimensión global del sistema. De la misma manera se reduce cantidad de material y tiempo de impresión. Por otro lado, en la base inferior se estimó incorporar la antena y electrónica arduino, pero por inconvenientes de dimensión y evitar que la batería se viera expuesta a cambios en el medio ambiente, estos fueron llevados a una caja estanca con protección IP65, ofreciendo una mayor seguridad y garantía de funcionamiento, por lo que resultó en un sistema que contiene únicamente los sensores y el cableado.

- **Base del escudo:**

Es donde se alojan los sensores. Se instalan en la punta de la base con silicona, cinta adhesiva y para la segunda iteración se tiene previsto utilizar tornillos. También tiene un hueco donde se ancla una antena y 4 agujeros por donde se acoplan el resto de las piezas a través de unos tornillos sin fin.

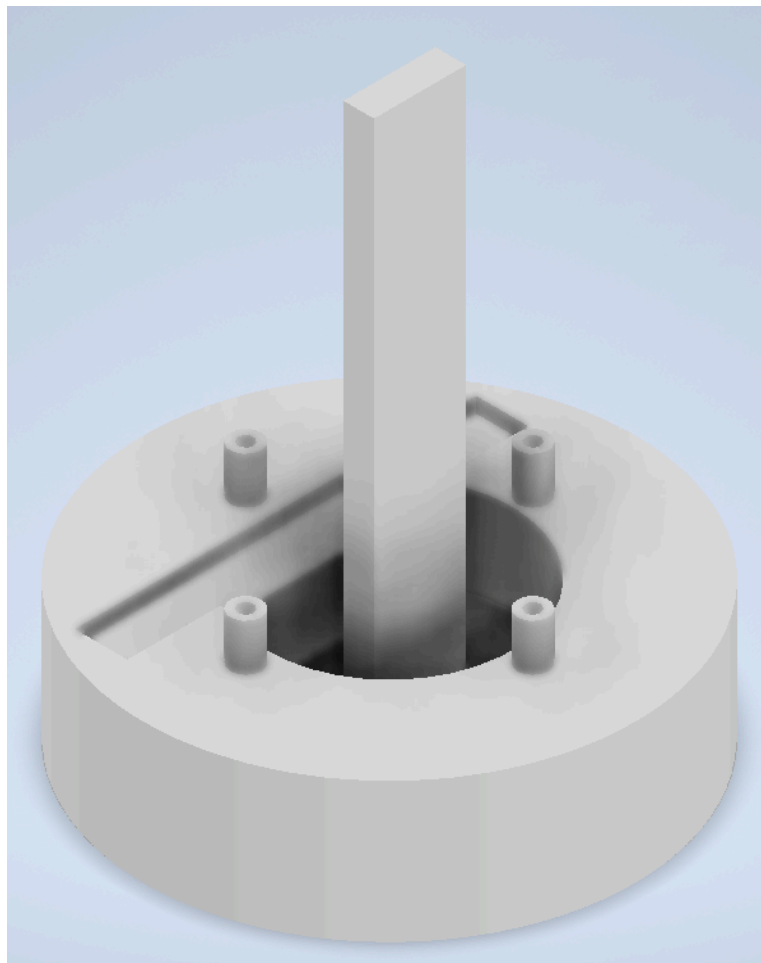


Figura 43: Base del escudo

- **Plato**

Son los que recubren a la barra vertical de la base, estas permiten el paso del aire, pero evitan la entrada de otros elementos, como el agua, granizo, vegetación, etc.

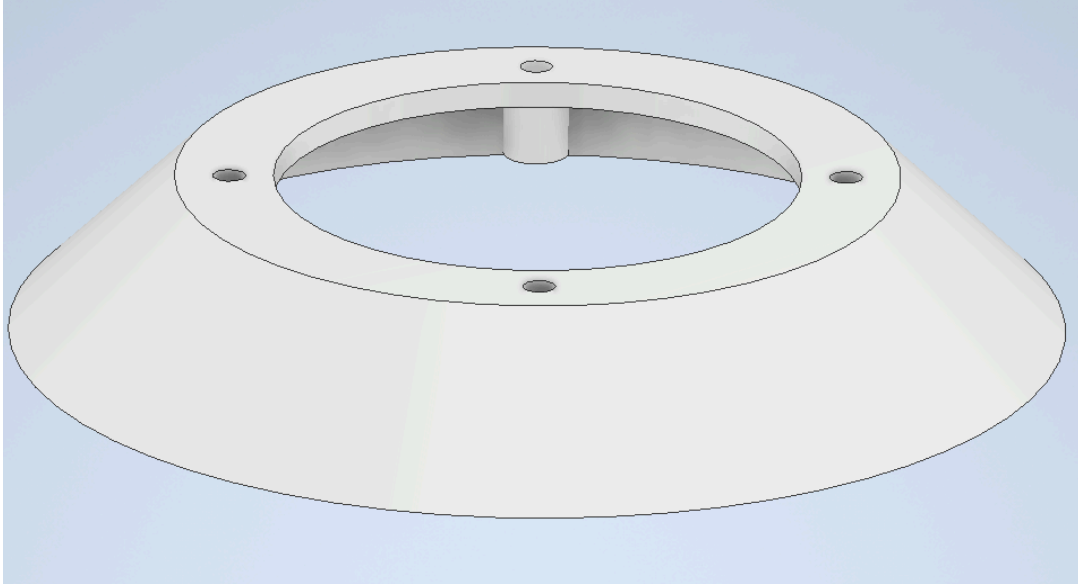


Figura 44: Plato

- **Plato superior**

Es el plato que conforma el tope del sistema, este tiene las mismas dimensiones que los platos intermedios solo que sin un agujero central.

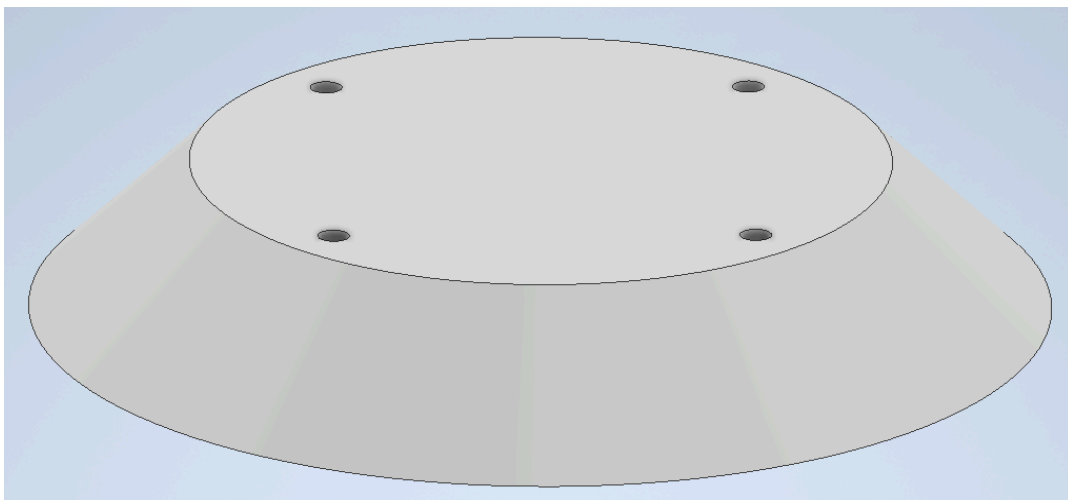


Figura 45: Plato superior

- **Base de acople**

Se coloca bajo la base del escudo, sirve para facilitar el ajuste entre el escudo y un soporte.

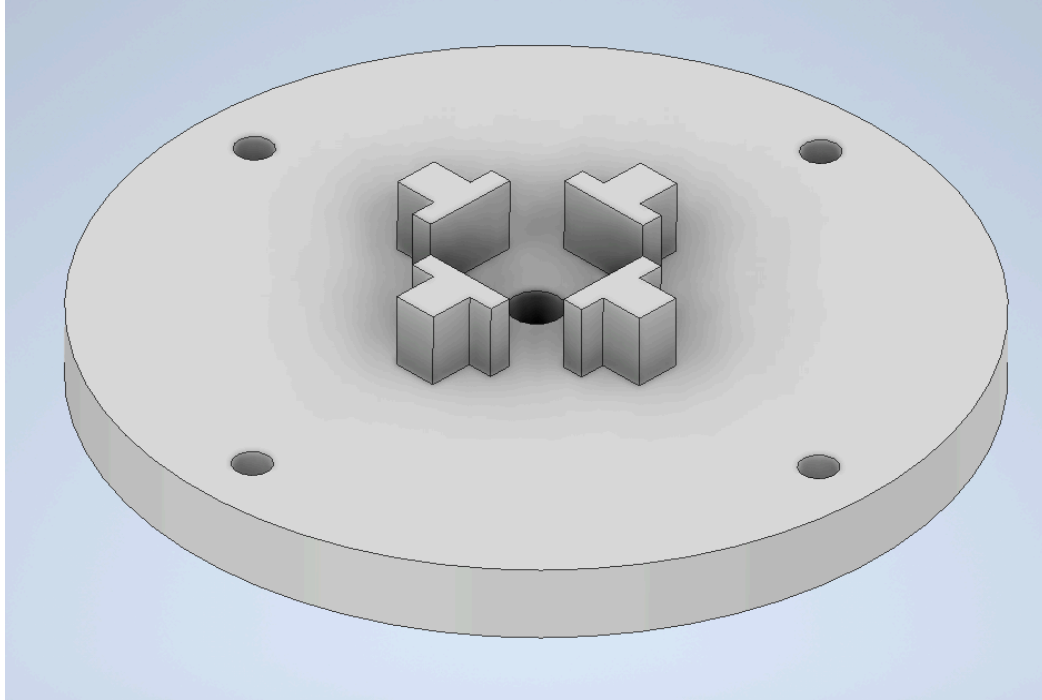


Figura 46: Vista inferior de la base de acople

Tras haber culminado, se procede a realizar un análisis de cargas, con el cual se determina si las propiedades del escudo son adecuadas para la instalación. El resto de las pruebas se llevarán a cabo con el modelo real y su aplicación en el campo.

- Ensamblaje completo

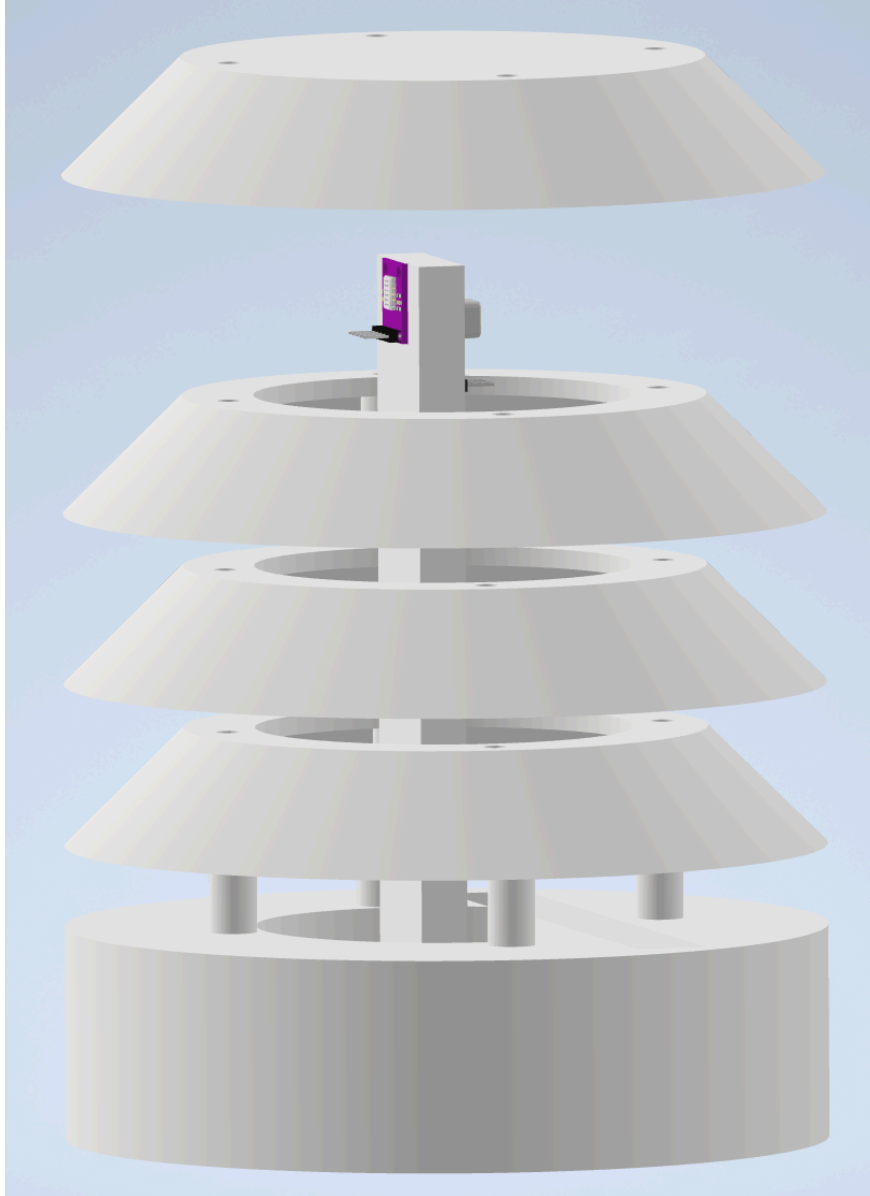


Figura 47: Ensamblaje (vista sin todos los platos).



Figura 48: Colocación de los sensores en la base (se fijó con adhesivo y luego se hicieron muescas de atornillado).

- **Mejora de la base**

Debido a que la base original no tiene una estructura o un diseño que pueda sostener a los sensores, se desarrolló una segunda iteración en la cual se pueden insertar ambos sensores y además tiene un ángulo de inclinación para permitir que el agua u otros elementos que pudiesen ingresar en el sistema se drenen por la gravedad. También, el soporte donde se colocan los sensores es más robusto ofreciendo una mayor resistencia frente a impactos.

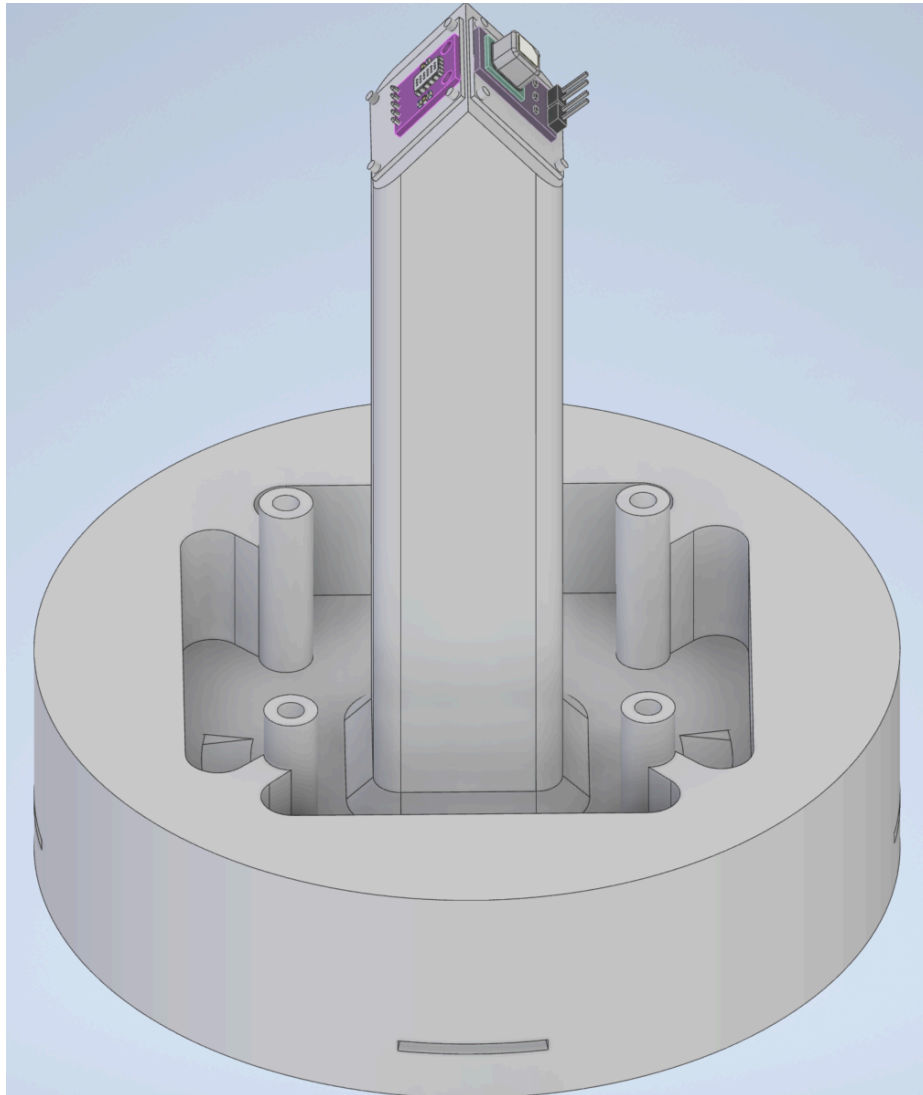


Figura 49: Ensamblaje (vista sin todos los platos).

IV.5.1.1 Simulaciones

Las piezas diseñadas en inventor fueron probadas en simulaciones de carga, donde se les aplicaba una carga de 200 N. Sin embargo, es importante mencionar que se utilizó plástico ABS ya que era el material disponible más semejante al ASA, por lo que se espera una leve discrepancia entre las simulaciones y la realidad.

En las siguientes imágenes se puede observar que el punto más frágil de las piezas es donde se alojan los sensores, debido al momento que se genera conforme la carga se aleja del centro de gravedad. No obstante, como se muestra en la figura del ensamblaje, este componente está

cubierto por los platos, asegurando de esta manera que las cargas no estarán aplicadas en esta parte de la base.

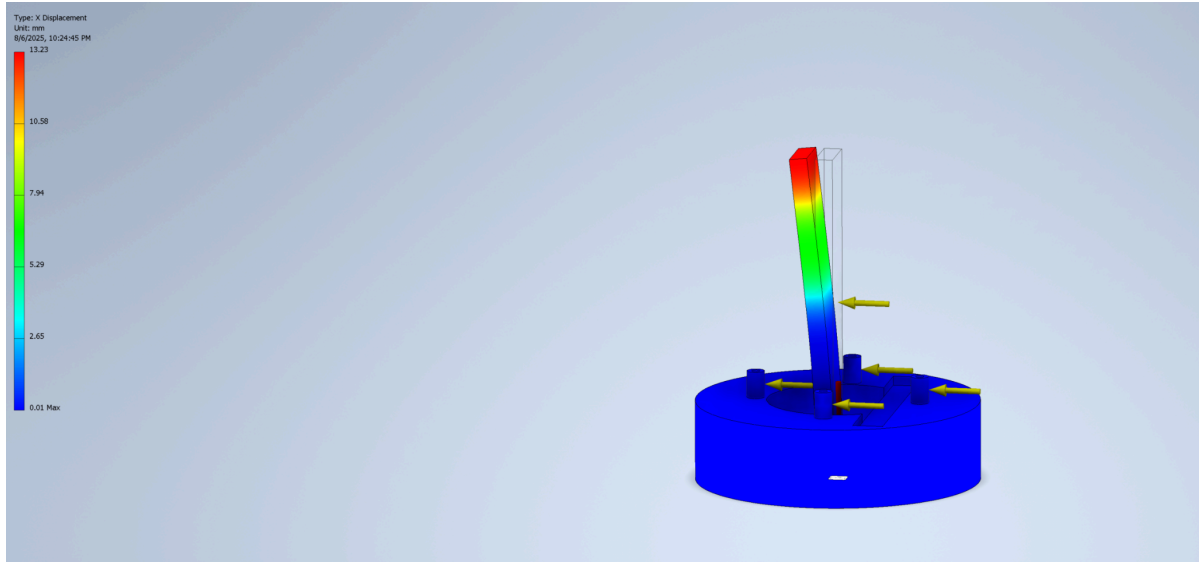


Figura 50: Simulación de carga de base.

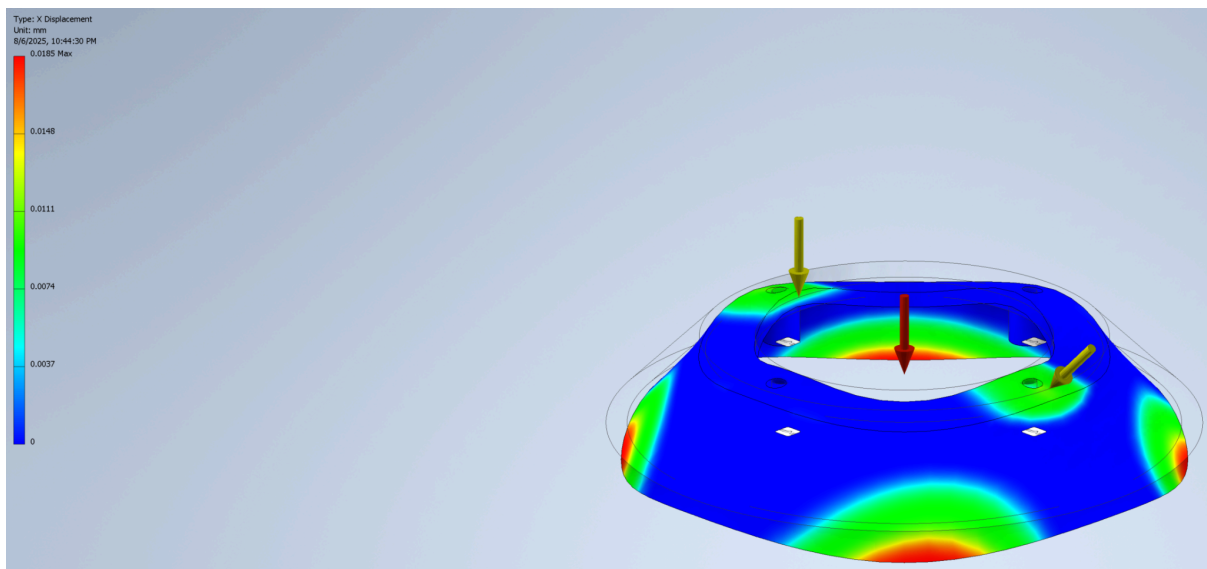


Figura 51: Simulación de carga de plato.

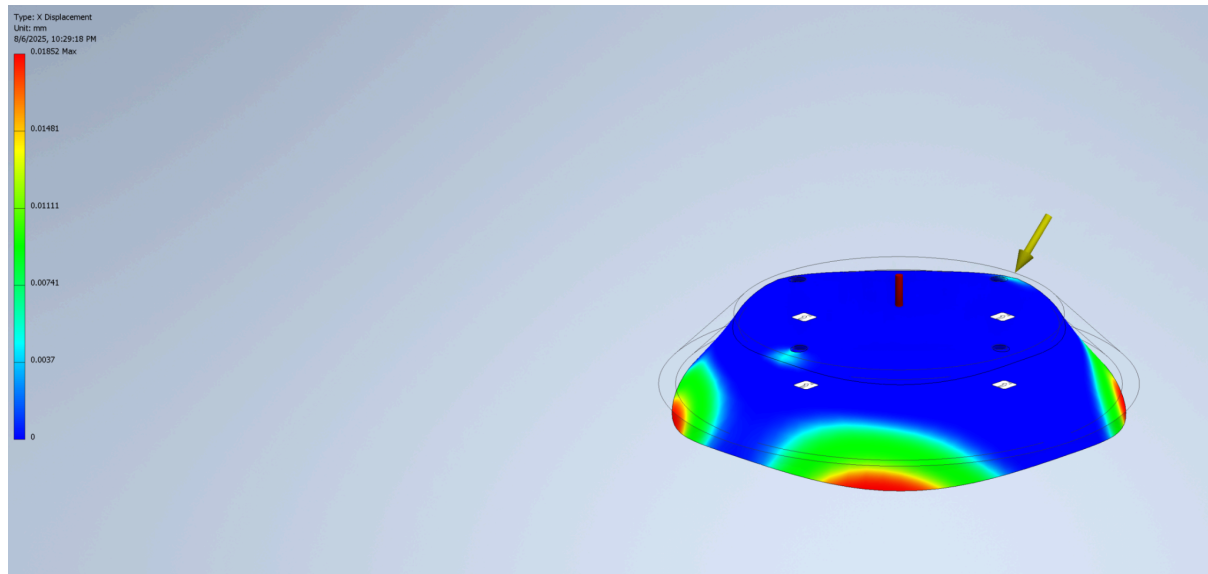


Figura 52: Simulación de carga de tapa superior.

III.6.2 Impresión del escudo

Para la impresión de los platos y la base de acople se utilizó la impresora BCN3D SIGMAX con el software CURA. La impresora cuenta con dos boquillas de extrusión con engranajes independientes, tiene un volumen de impresión de 420mm x 297mm x 210mm y la temperatura máxima de impresión que genera la boquilla y la mesa son 290 °C y 100 °C, respectivamente.

Como se describió previamente, la base del escudo fue impresa en la Bambu X1. Esta impresora utiliza el software Bambu Studio. Además, cuenta con una boquilla reforzada, y las temperaturas máximas a las que puede operar la boquilla y la mesa son 300 °C y 120 °C, respectivamente. También cuenta con un lidar y un scanner los cuales permiten a la impresora calibrar y ubicar la posición de la boquilla con respecto al punto de origen. Otra función del lidar es escanear la primera capa de impresión, lo cual resulta en una mejor uniformidad al momento de imprimir.

Para utilizar el filamento ASA, se tuvieron que ajustar las características de impresión. Se destaca que no se emplearon soportes, y que se imprimió a una temperatura de 255 °C para la boquilla y 90 °C para la cama de impresión. Es importante mencionar que no se puede enfriar para evitar contracciones súbitas que estropeen el proceso de impresión, por lo que se recomienda mantener ventilada el área de impresión, sin el uso de aire ni ventiladores.

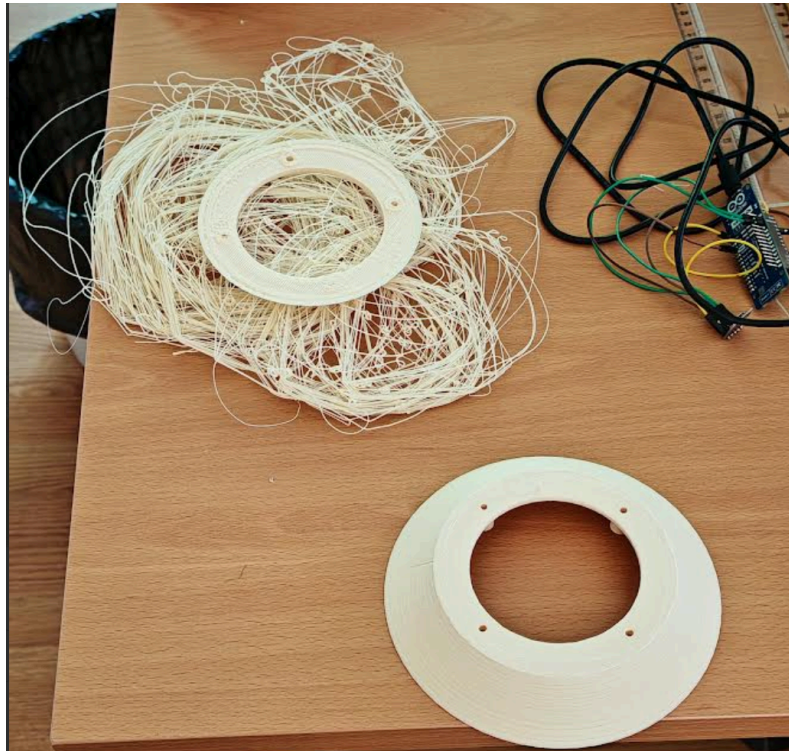


Figura 53: Problemas con la temperatura de cama y boquilla de impresión

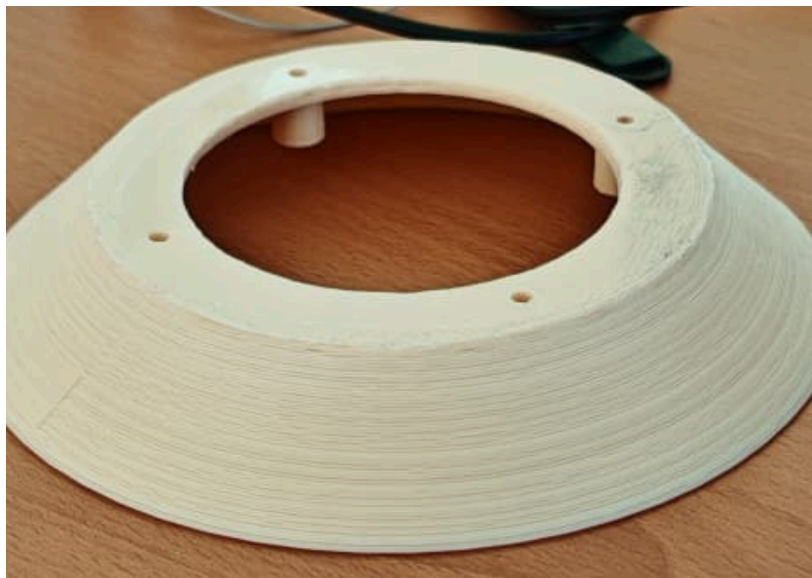


Figura 54: Problemas de porosidad porque se enfriaba muy rápido la pieza durante su impresión

Para la base del escudo se optó por un relleno del 45%, una impresión vertical para evitar el uso de soportes. Para el caso de los platos y la base de acople se ajustó a un relleno de 20% con la finalidad de reducir el tiempo de impresión y el peso total del ensamblaje. Éstos se imprimieron invertidos para evitar el uso de soportes.

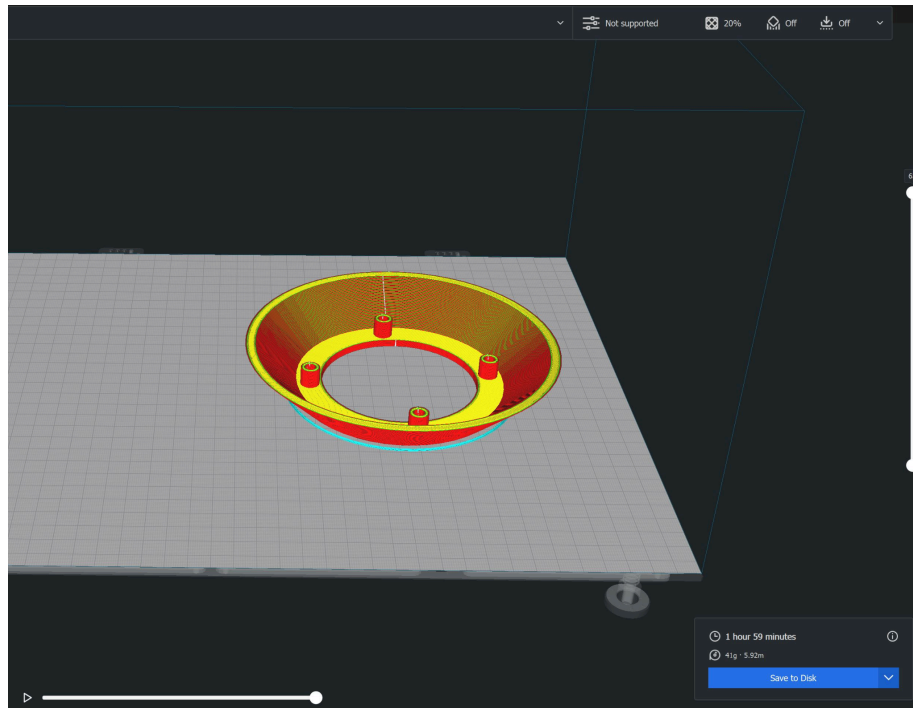


Figura 55: Impresión de platos, BCN3d Cura.

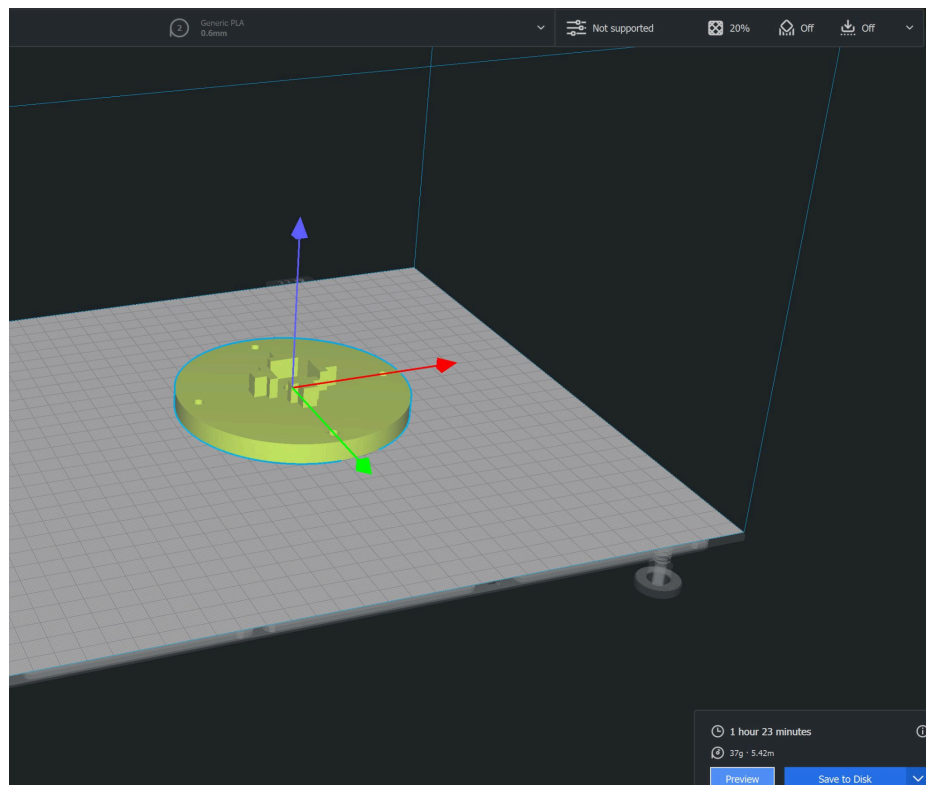


Figura 56: Impresión de la base de acople, BCN3d Cura.

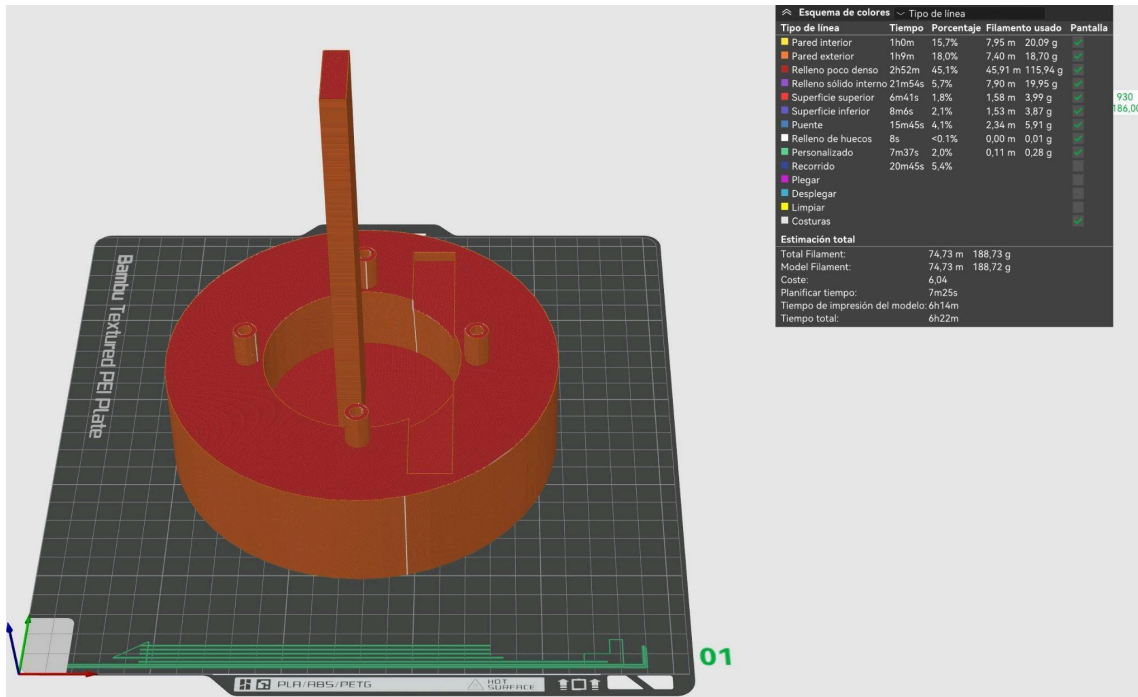


Figura 57: Impresión de la base, con el software de Bambu Studio en la Bambu Lab X1.

III.7 Soporte del sistema

Previo al desarrollo del sistema se establece en donde será instalado. Existe una gran variedad de sistemas meteorológicos, entre los cuales se encuentran sistemas anclados a árboles, colgando en estructuras y con soportes de postes. Para el desarrollo de este sistema, se optó por utilizar un soporte ajustable el cual permite variar la altura, ángulo y distancia del sensor con respecto al poste. Además de esto, el poste está conformado por diversas piezas facilitando su ensamble o futuras modificaciones. Este soporte fue diseñado a través del portal de [ITEM](#), el cual contiene un Engineeringtool (similar a un software CAD) que permite a los usuarios seleccionar perfiles, materiales, piezas y articulaciones para llevar a cabo el bastidor o armazón deseado. El soporte desarrollado está constituido por una barra de aluminio anodizado, con un sistema de rieles o ranuras por donde se pueden acoplar unas pestañas que garantizan la fijación de otros componentes. El tubo principal tiene un perfil de 40mm x 40mm con una longitud de 2000mm, mientras que los brazos son ajustables y se pueden seleccionar dependiendo de la distancia a la que se pretenda instalar el sistema.

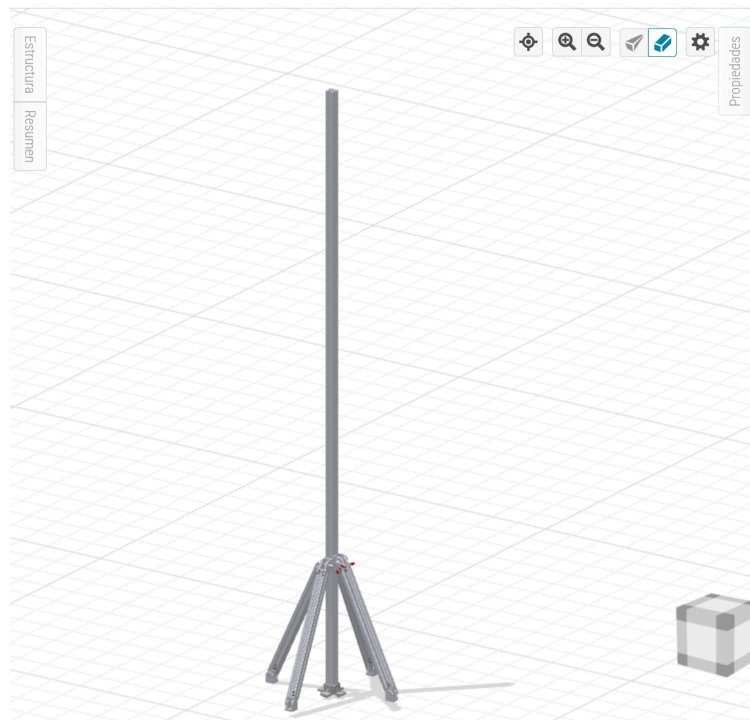


Figura 58: PROJECTVIEWER software, ITEM



Figura 59: poste ensamblado.

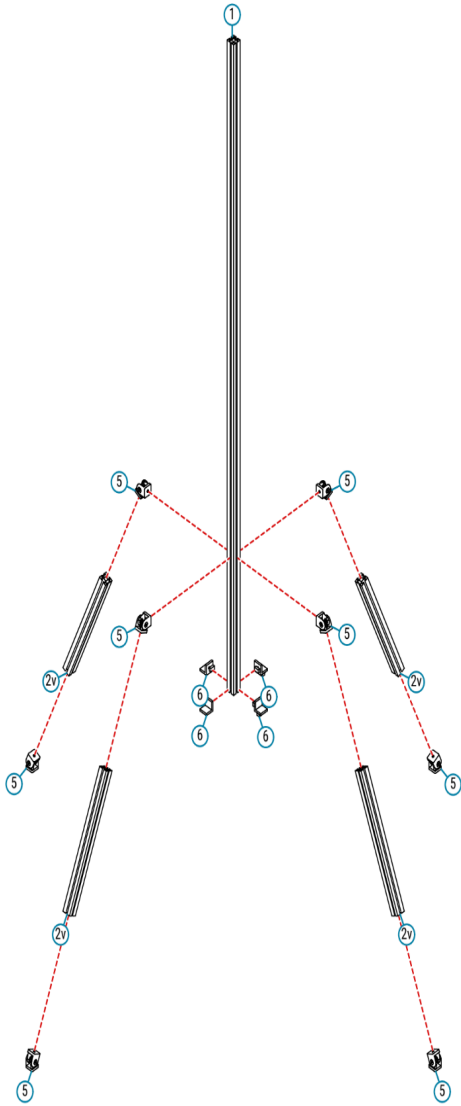


Figura 60: Composición del soporte.

III.8 Prototipo Físico

Durante el desarrollo del prototipo se realizaron diversos cambios conforme las necesidades y obstáculos surgían. Inicialmente el sistema que se desarrolló únicamente contaba con solo el sensor de temperatura, CO₂ y humedad, además tanto la batería como el panel solar eran de menor capacidad energética. Por otra parte, la base donde se colocaba la electrónica y el panel solar estaba unificada. Esto condicionó el sistema a empatar los cables de conexión que iban desde el Arduino hasta el sensor.



Figura 61: ensamblaje del primer prototipo para las pruebas en el CSIC.

Debido al bajo rendimiento de la batería se realizó un cambio por la descrita en la selección previa junto con el administrador energético. Esto fue hecho con la intención de suplir la demanda de ambos sensores.

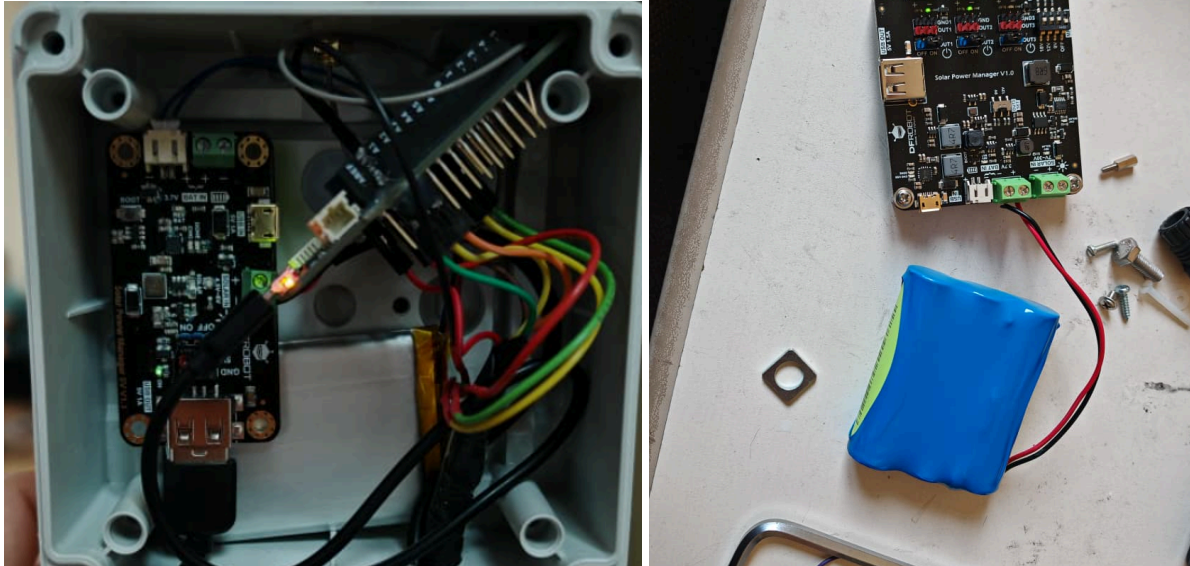


Figura 62: Administrador y batería antigua

Tras haber desarrollado las piezas por Inventor y haberlas impreso, se procede a armar el prototipo. Se debe mencionar que fue preciso ajustar las dimensiones de algunas piezas mediante el uso de una lija, debido a que el material tendía a contraerse en las primeras impresiones que se llevaron a cabo, perjudicando levemente las tolerancias del diseño.

Una vez fabricado el prototipo inicial, se llevó a cabo el proceso de pruebas con la finalidad de evaluar el rendimiento de la carcasa, sensores e incluso el soporte. Durante un tiempo, el equipo se colocó en el estacionamiento de las instalaciones del CSIC, pero tras completar el soporte y la inclusión del sensor MiCS-6814, se ubicó sobre el techo del edificio.



Figura 63: Composición del soporte.

III.9 Pruebas realizadas

Las pruebas del prototipo se llevaron a cabo con el fin de verificar que el filamento cumpliera con las demandas climáticas que conlleva estar expuesto al aire libre por tiempo prolongado. Para simular estas condiciones, se comenzó exponiendo el material a alta temperatura con un horno de precalentado, el Bungard RMP 210. Luego, tras haber impreso el primer modelo, se evalúa su funcionamiento en el estacionamiento del recinto. De esta manera se verifica que los sensores estén capturando datos climáticos certeros. Finalmente, se colocó el prototipo en el techo del edificio, donde se vio más afectado por las variaciones de la altura, viento y mayor tiempo en exposición frente al sol. Una vez probado en las instalaciones, el sistema se examinó en el INIA, donde se simulaban casos hipotéticos de incendios.

Estas pruebas funcionan para comprobar la resistencia de la envolvente, el funcionamiento de la electrónica y la eficiencia energética. Además, las medidas del sistema pueden ser estudiadas y comprender el comportamiento de los factores ambientales a lo largo del tiempo.

III.9.1 Horno de precalentado



Figura 64: Bungard RMP 210.

Para las aplicaciones en el campo del sistema, se inicia con las pruebas de los materiales en el laboratorio del CSIC. Para ello, se utilizan los datos obtenidos de los filamentos y se elabora una prueba de precalentado para filamento que será utilizado (ASA) en un horno para verificar que cumpla con el parámetro de temperaturas elevadas.

Para ello, se procedió a calentar el material a 60 °C durante 2 horas, tras lo que se analizó cualquier cambio sufrido por la pieza: contracción, cambio de propiedades mecánicas

como la rigidez, fisuras superficiales, expansión del plástico o daños entre las capas de la impresión.

Como resultado obtuvimos que la pieza había aguantado excepcionalmente sin haber sufrido cambios en sus propiedades ni daños permanentes. Además, al retirar el material del horno no presentó signos de flexibilidad ni de haberse ablandado o perdido su forma, por lo que el polímero cumple con parámetros básicos de temperatura.

III.9.2 Pruebas de los sensores

Inicialmente, el sistema contaba únicamente con el sensor de Sensirion. Esto, a pesar de no medir los gases, le otorgaba una ventaja frente a la configuración de los dos sensores: una demanda energética reducida. Un factor fundamental para comprender más sobre el consumo energético de este sistema está relacionado con su programación, debido a que el sistema puede tomar medidas de manera variable, es decir, se puede programar para medir cada minuto, cada 5 minutos, cada hora o dependiendo de la frecuencia de captura deseada, condicionando el consumo energético acorde a la frecuencia. Por lo tanto, la eficiencia energética se ve muy afectada dependiendo de los siguientes valores:

- Cantidad de sensores
- Tamaño de batería
- Capacidad energética del sistema de alimentación (panel solar)
- Resistencias involucradas
- Temperatura de operación
- Frecuencia de captura

Las pruebas realizadas en el CSIC simularon el comportamiento que puede tener el sistema al ser desplegado por una gran cantidad de tiempo. Esto le permite al personal que monitoree los datos analizar las condiciones climáticas actuales, evaluar variaciones, desarrollar prevenciones frente a crecimientos inesperados e incluso realizar predicciones cuando se registren la cantidad de datos suficientes.

En las siguientes imágenes, se muestran como estaba colocado el sistema en las instalaciones del CSIC inicialmente. Luego el sistema se acopló al poste para elevarlo del suelo y al final, tras haber incorporado los componentes actualizados, se subió el poste a las instalaciones.



Figura 65: Configuración inicial con el sensor de Temperatura, CO₂ y Humedad



Figura 66: Configuración con el poste y la introducción del sensor MiCS-6814

III.9.3 Pruebas en el INIA

Los ensayos en el INIA fueron ejecutados entre Noviembre y Diciembre del 2024, durante los cuales se utilizó el túnel de viento de las instalaciones del INIA-CIFOR (Instituto de Ciencias Forestales), ubicado en la Avenida Padre Huidobro de Madrid, España. Aunque los datos se recopilaban a lo largo del mes, en este trabajo se analizarán los obtenidos durante el 4 y 5 de noviembre. El propósito de los experimentos era analizar el comportamiento de los sistemas de detección frente a la formación de pequeños incendios. En primer lugar, se encendía el combustible: primero uno más húmedo y luego otro más seco. Luego, durante algunas pruebas se utilizaba el túnel de viento para simular la corriente de humo que pudiera ser producto de estos incendios en condiciones ambientales. Con esto se buscaba reconocer cómo los sensores van capturando datos conforme a la creación de un incendio, qué tan eficientes son frente a estos escenarios y la capacidad de respuesta de los sensores ante la expansión de un incendio forestal. Para captar esta información durante las pruebas se utilizaron dos sistemas, el denominado **PRO1** y el **PRO2**. El primero es el que desarrollamos en este trabajo.

Durante las pruebas del 4 y 5 de Noviembre se efectuaron quemas o incendios controlados. El primer día se realizaron dos incendios. El primero a las 16:57 y se utilizó un combustible húmedo, lo cual resultó en una gran cantidad de humo, pero una leve generación de llama. Para la segunda quema, de las 17:21, se utilizó un combustible seco lo cual generó una llama elevada y gran cantidad de humo en una menor cantidad de tiempo. El sistema de detección se colocó a una distancia de 38 metros del incendio y no se utilizó el túnel de viento. Esta gran distancia puede estar detrás de la leve captura de los datos que se obtuvo. El 5 de Noviembre las pruebas comenzaron a las 12:45 y se realizaron en total tres quemas con un intervalo de treinta minutos entre cada una. Durante las quemas se varió la velocidad del ventilador del túnel del viento entre 0, 1, 2 y 3 m/s; cada velocidad se sostuvo durante 10 minutos. Se utilizaron diferentes materiales combustibles para variar la humedad entre ellos. Para esta prueba, el prototipo se situó a 12 metros de la quema. El resto del mes se realizaron más pruebas al aire libre con el propósito de probar otros sistemas meteorológicos y el comportamiento habitual de los sistemas.

Para las pruebas en las instalaciones del INIA-CIFOR se cambió la plataforma de registro de datos a Grafana Dashboards para facilitar la recopilación de datos con varios conjuntos de sensores y facilitar la búsqueda de estos en solo una plataforma.



Figura 67: colocación del combustible para las quemas (izquierda). Realización de la quema (derecha).



Figura 68: Turbina de viento

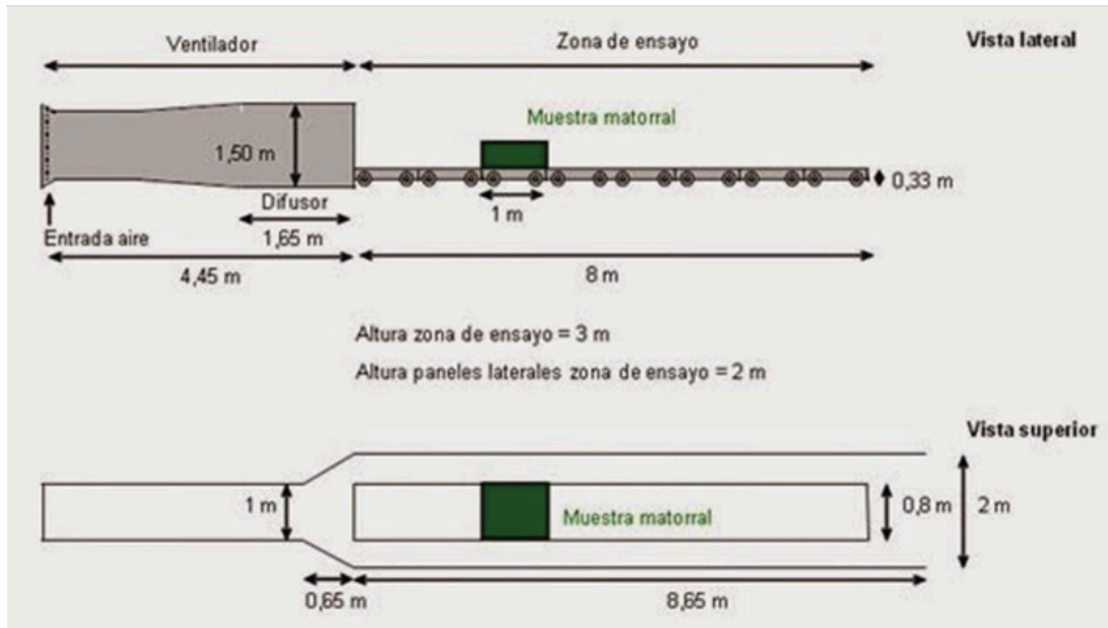


Figura 69: Túnel de viento del INIA-CIFOR. (Madrigal, 2024).



Figura 70: Prototipos ubicados a 12 m de la turbina durante la prueba (sistema de la izquierda es el de este proyecto) 5 de noviembre



Figura 71: Prototipos ubicados a 12 m de la turbina durante la prueba (sistema de la izquierda es el de este proyecto) 5 de noviembre



Figura 72: Prototipos ubicados a 38 m de la turbina durante la prueba. 4 noviembre

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

IV.1 Resultados de las pruebas en el CSIC

IV.1.1. Pruebas desde el 21/08/2024 hasta el 30/10/2024:

Las siguientes gráficas fueron construidas utilizando los datos captados por los sensores. Estos datos se exportaron a Excel para representar su comportamiento temporal. Para las primeras imágenes, desde la Figura 73 a la 78, se utilizaron datos recopilados durante un intervalo de tiempo de casi dos meses: desde el 21 de agosto de 2024 a las 0:00 hasta el 30 de octubre del mismo año.

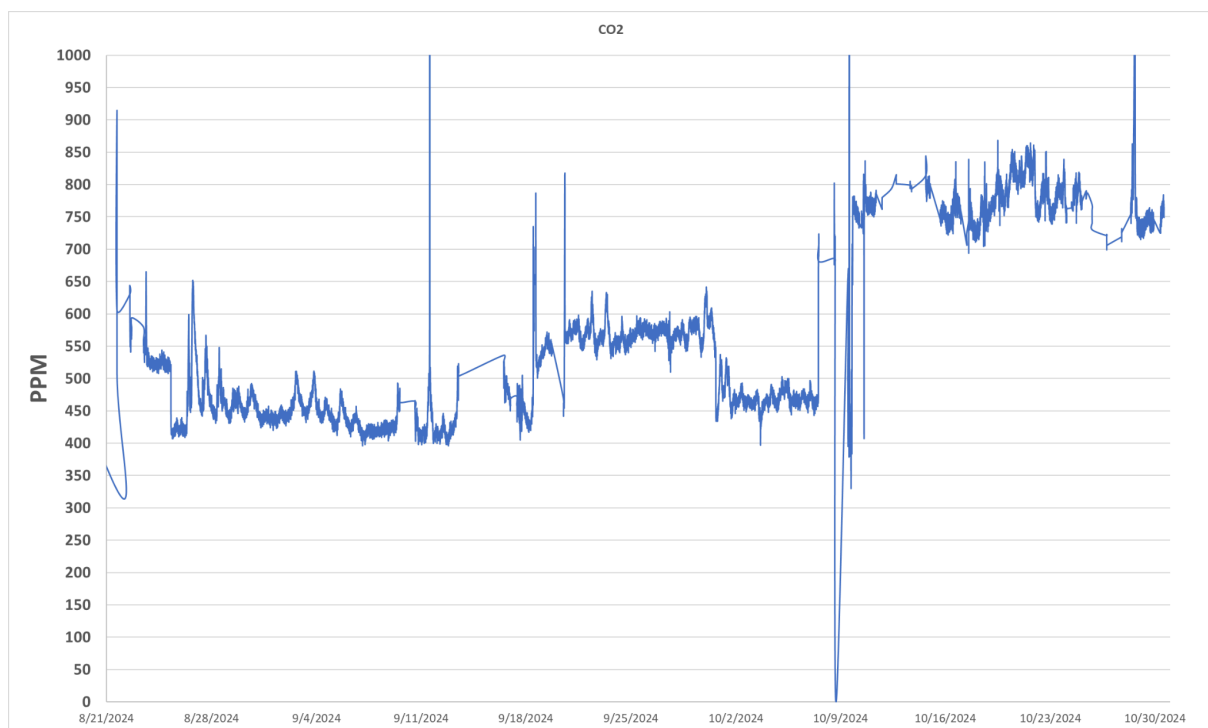


Figura 73: Gráfica de CO₂. Desde el 21 de agosto, hasta el 30 de octubre.

Al analizar los datos del CO₂ se aprecia un crecimiento escalonado conforme la salida del verano, esto se le atribuye a varios factores. Entre los más importantes se pueden considerar:

- Actividad vehicular en verano frente a invierno: Durante el verano el tránsito de vehículos disminuye. Las condiciones climáticas junto con los días de vacaciones resultan en que la población se retire de la ciudad, lo cual reduce las emisiones de CO₂. En invierno, debido a las bajas temperaturas la población opta por transporte público o propio sobre caminar por lo cual aumentan las emisiones de CO₂.

- Reducción de exposición solar: Al transicionar del verano al invierno, las horas de exposición solar disminuyen y con esto el tiempo de fotosíntesis de las plantas, por lo cual se reduce la capacidad que estas tienen de absorber el CO₂ y liberar oxígeno.

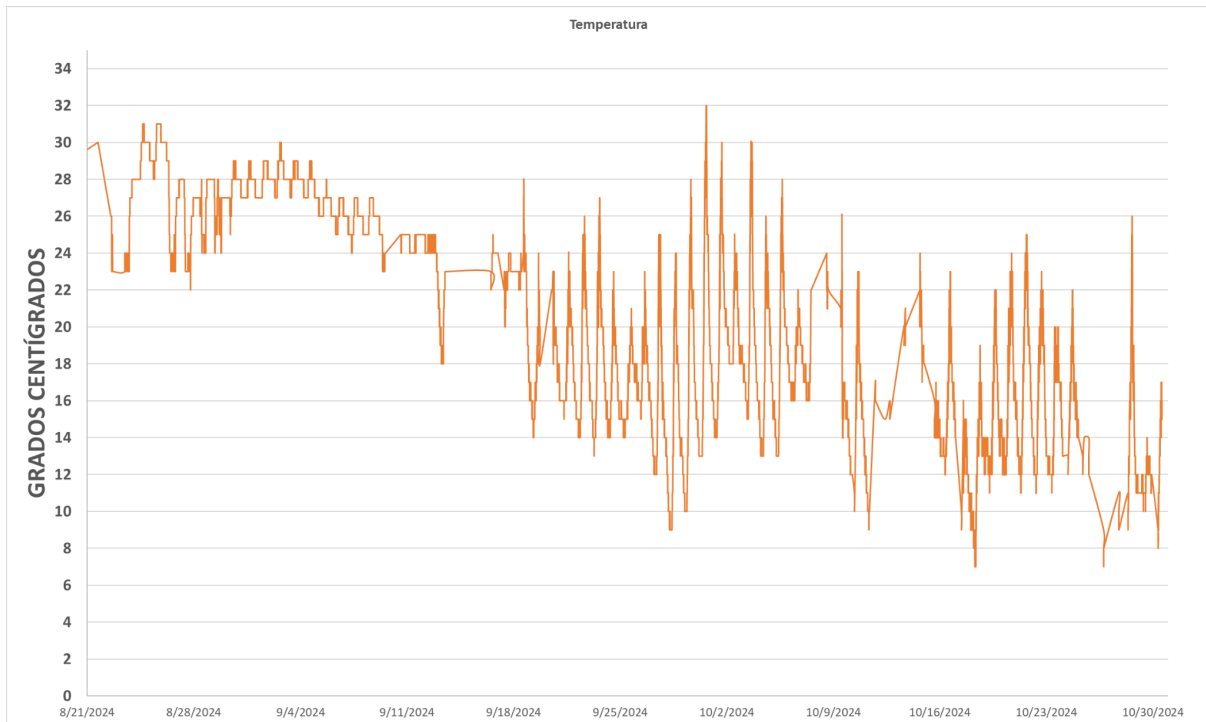


Figura 74: Gráfica de Temperatura. Desde el 21 de agosto, hasta el 30 de octubre.

Al revisar los datos de **temperatura** se evidencia una caída progresiva. La explicación más evidente de este factor se debe al cambio de estaciones. Por otro lado, dentro de este patrón descendiente tanto la temperatura como la **humedad** no son constantes. Ambas muestran picos conformados por los máximos y mínimos registrados en cada día, lo cual otorga una visual que permite comparar las condiciones climáticas de cada día y la evolución climática.

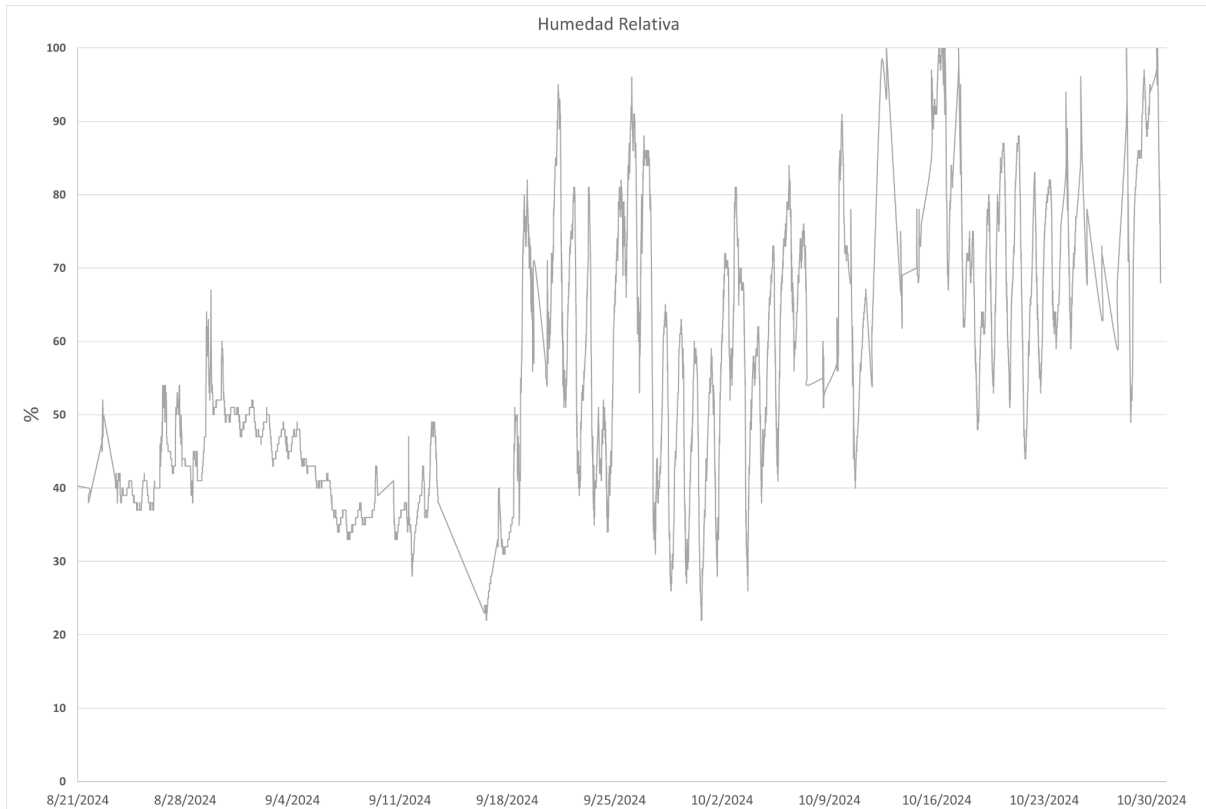


Figura 75: Gráfica de Humedad. Desde el 21 de agosto, hasta el 30 de octubre.

La **humedad** actúa de manera inversa a la temperatura, esto se debe a que la caída de la temperatura conlleva una reducción de la cantidad de vapor de agua en el ambiente, por lo cual se acumula agua en el ecosistema. Esta acumulación causa que los niveles de humedad relativa aumenten. La reducción de exposición solar a lo largo de los días permite que la retención del agua en el medio ambiente sea más efectiva, elevando de esta manera la humedad relativa medida.

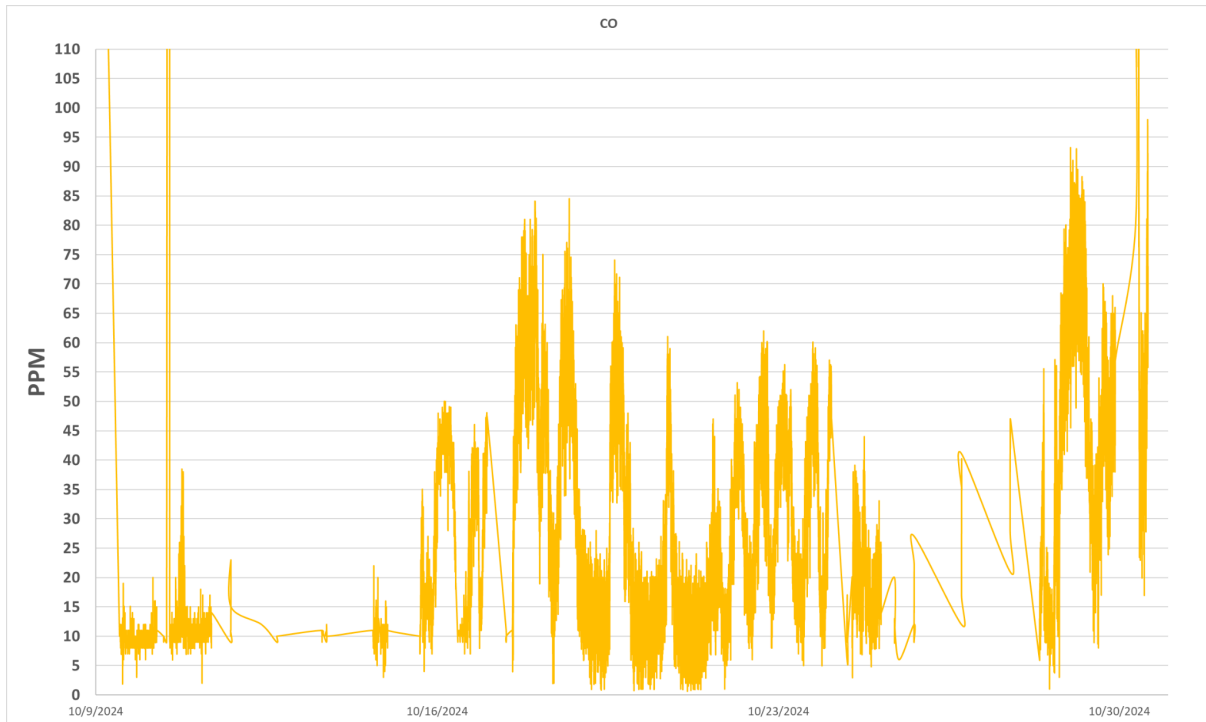


Figura 76: Gráfica de CO. Desde el 21 de agosto, hasta el 30 de octubre.

Al analizar los datos del **CO** se puede concluir que los niveles varían con unos intervalos mínimos de 20-30 ppm y máximos de 70-80 ppm. Esta variabilidad se puede explicar por el tránsito y actividad económica cotidiana de la ciudad. De manera similar al CO_2 , el **CO** alcanza sus picos más altos en la salida del verano cuando aumenta el tránsito y las actividades económicas. Otro ejemplo claro de la influencia que tiene la actividad económica cotidiana sobre los niveles del CO son las medidas obtenidas durante los fines de semana. Los datos, por ejemplo, de días Sábado como el 19 y 26 de Octubre coinciden con picos bajos. La explicación sería la reducción de tráfico y trabajos durante esos días.

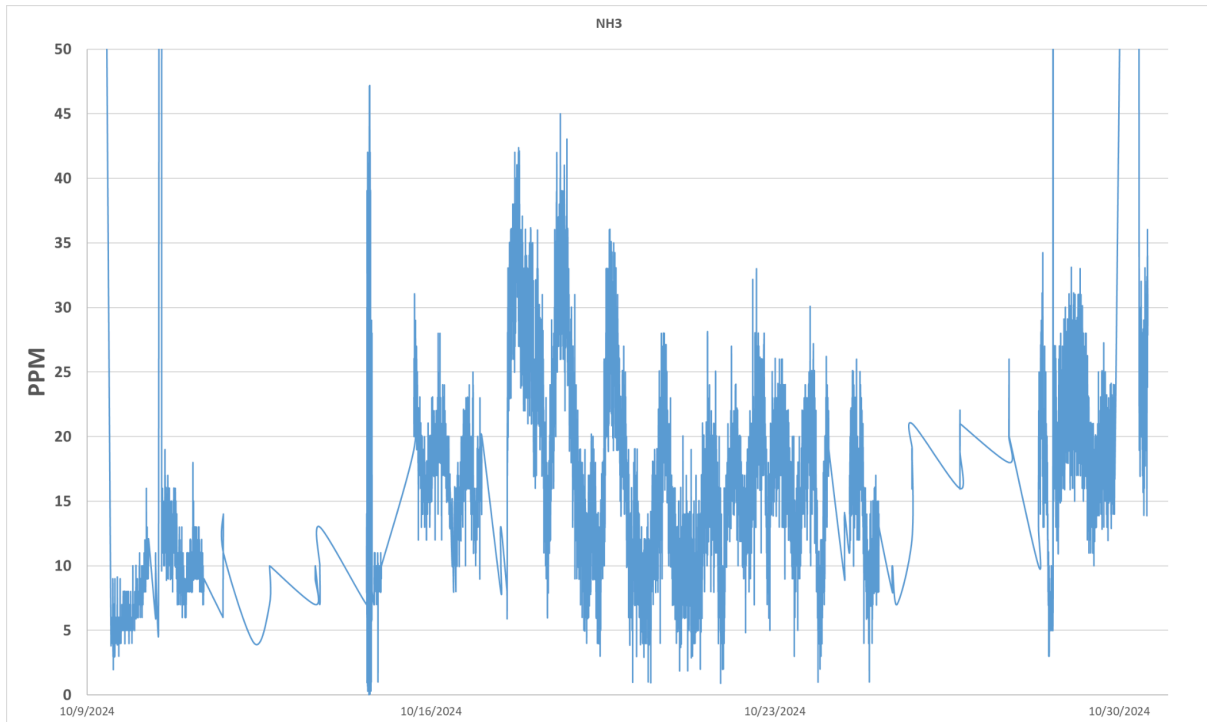


Figura 77: Gráfica de NH₃. Desde el 21 de agosto, hasta el 30 de octubre.

Como es esperado, los niveles de NH₃ son bajos. Los picos se pueden atribuir a la limpieza de las calles, emisiones de los vehículos y otros factores como el viento, la humedad, la lluvia y la radiación solar.

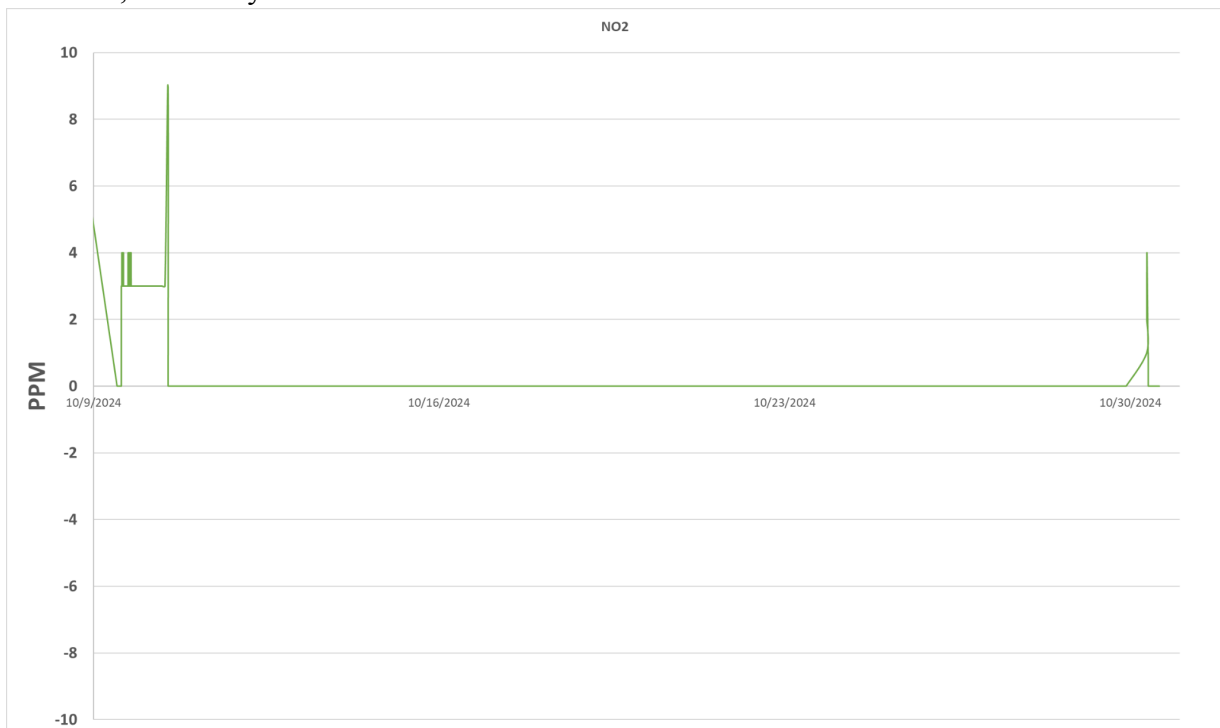


Figura 78: Gráfica de NO₂. Desde el 21 de agosto, hasta el 30 de octubre.

En el caso del **NO₂** no encontramos una variación perceptible, esto se puede atribuir a una errónea calibración o programación del sensor.

IV.1.2. Pruebas del 30/08/2024:

Dado que los datos contienen una gran cantidad de puntos de captura, se estableció un rango de tiempo desde las **00:02 horas del 30 de agosto, hasta las 23:59 horas del mismo día** para determinar cómo el sistema captura el cambio de los parámetros climáticos a lo largo de un día. Sin embargo, durante este periodo de tiempo solo se empleó el uso del sensor de Sensirion, por lo que únicamente se obtuvieron datos de **CO₂**, Temperatura y Humedad. Las próximas figuras ilustran los datos obtenidos durante este día.

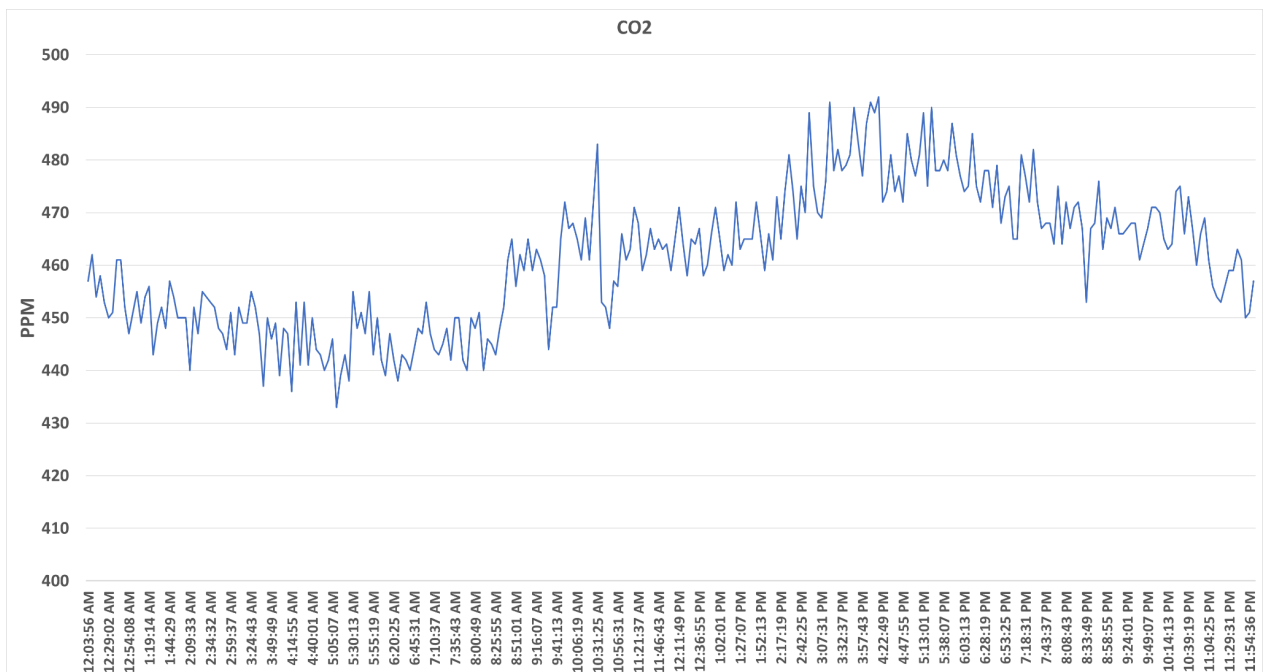


Figura 79: Gráfica de CO₂, 30 de Agosto

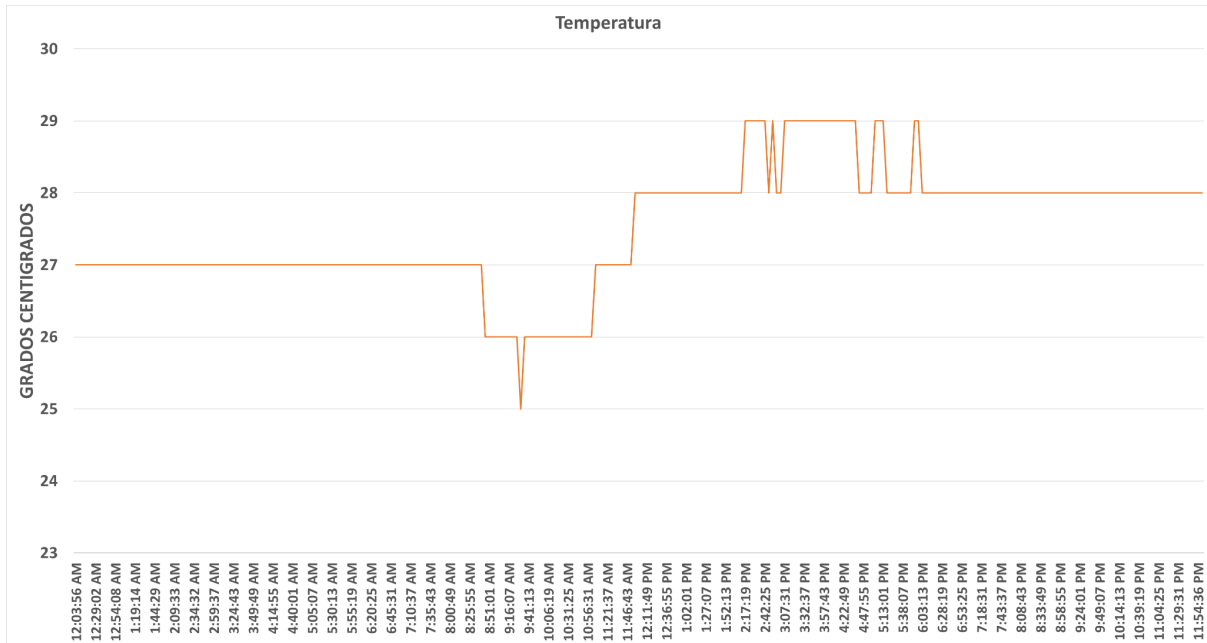


Figura 80: Gráfica de temperatura. 30 de Agosto

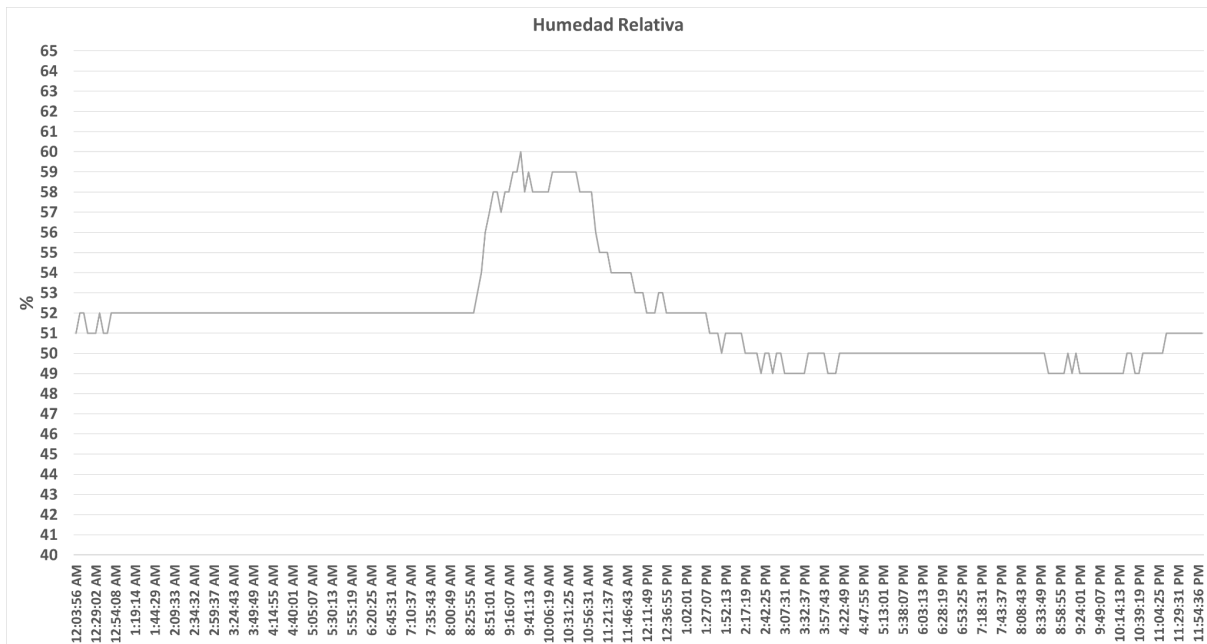


Figura 81: Gráfica de humedad. 30 de Agosto

Los datos de CO_2 reafirman que la actividad diaria, como el tránsito vehicular diaria afectan los niveles de este gas. Desde un mínimo de 440 ppm a las 00:02, los niveles de CO_2 aumentan a partir de las 8:30 am, hora a la que comienza el tránsito vehicular por la entrada a los colegios y trabajos. El máximo es alcanzado a las 16:00. El cierre del día, con su respectiva disminución de tránsito, se acompaña de una disminución progresiva de CO_2 .

A lo largo del día, se registraron las variaciones de temperatura esperadas con los máximos durante la tarde y los mínimos durante la madrugada y primeras horas del día. La **temperatura** inicia desde los 27°C, un valor esperado para el verano, y baja hasta los 25°C durante la mañana. La exposición al sol conforme el paso del día incrementa la temperatura durante el mediodía hasta alcanzar un máximo de 29°C a las 14:00. Al entrar en el anochecer vuelve a bajar a los 28 °C.

En la gráfica de la humedad, se puede observar un aumento brusco e inusual alrededor de las 8:00. Este pico se puede explicar por lo siguiente: el sistema estaba apoyado sobre una base de concreto poroso. Durante la noche disminuye la temperatura, lo cual produce el rocío a través de la condensación atmosférica. Estas gotas de agua se depositan sobre la base y permanecen inalteradas durante la madrugada porque no hay exposición solar para evaporar el líquido condensado. Sin embargo, tras la exposición al sol, estas comienzan a evaporarse y se dispara el sensor de la humedad relativa hasta el 60%. Este pico disminuye a lo largo del día y la tarde porque se cumple la relación inversa entre la temperatura y humedad.

IV.1.3. Pruebas de dos sensores del 16/10/2024:

Para las siguientes pruebas se incorporó el sensor MiCS-6814 para así obtener datos complementarios a los del SCD-41 como los niveles de CO, NH₃ y NO₂. Se utilizaron los dos sensores a lo largo del **16 de Octubre de 2024, desde las 00:00 hasta las 23:50** para observar el comportamiento del sistema cuando se utilizan dos sensores en vez de uno y además ofrecer un panorama más preciso de las las variaciones ambientales en el lapso de un día.

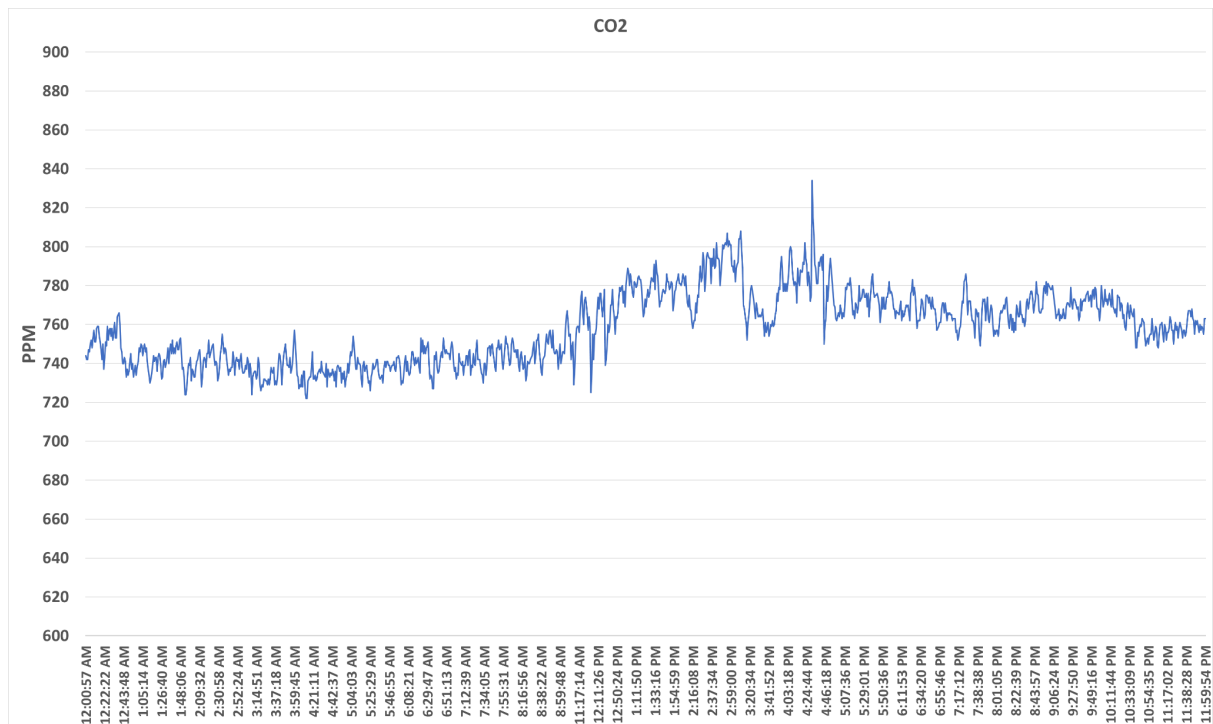


Figura 82: Gráfica de CO₂. 16 de Octubre.

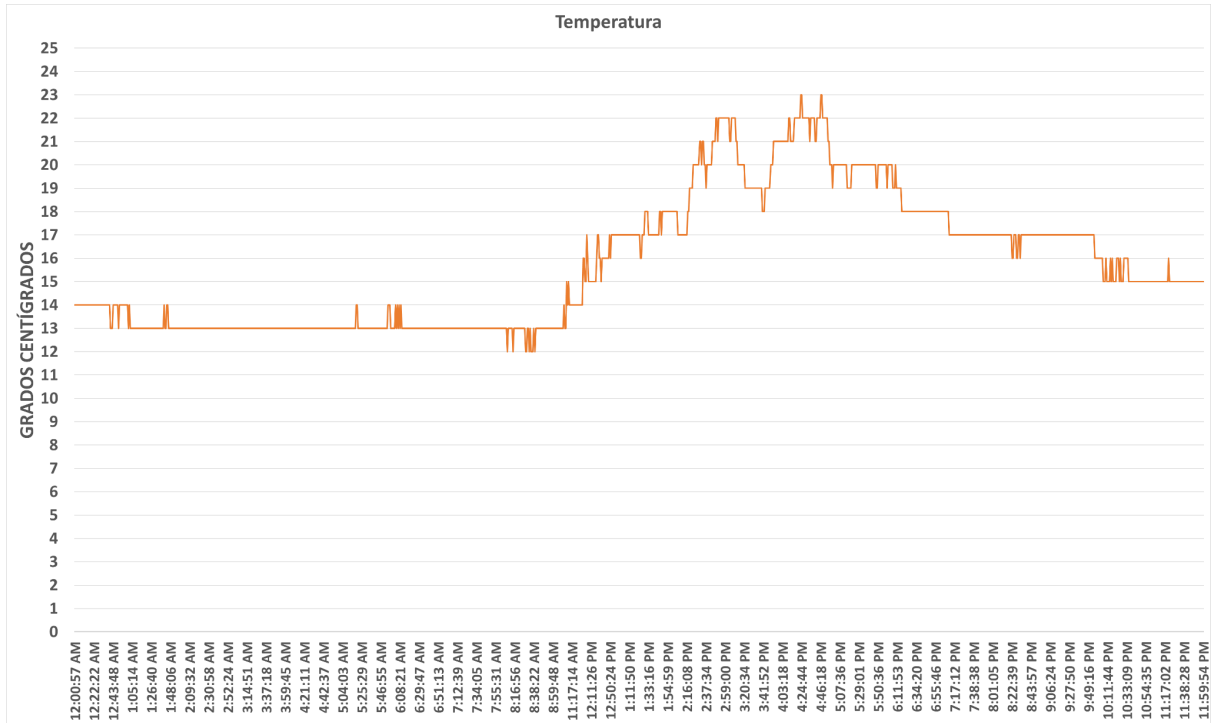


Figura 83: Gráfica de Temperatura. 16 de Octubre.

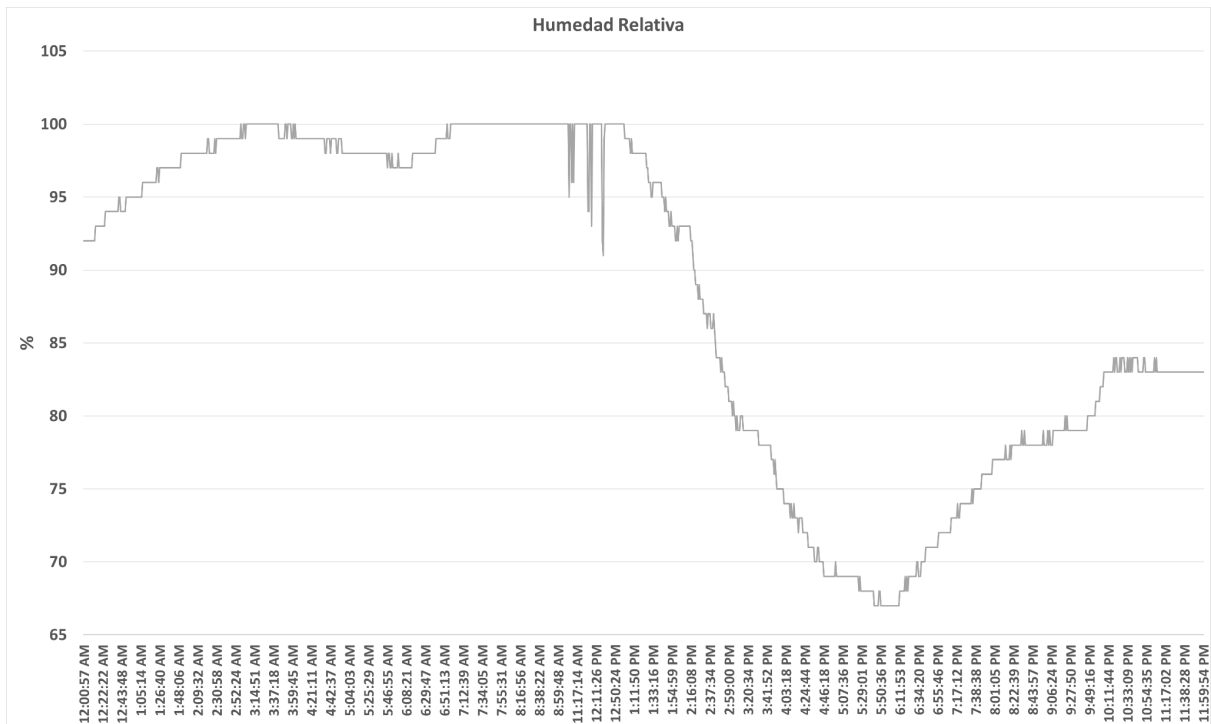


Figura 84: Gráfica de Humedad. 16 de Octubre.

Los cambios del CO₂, la temperatura y la humedad relativa durante el día son los esperados. Los valores de **CO₂** son mayores comparados a los del 30 de agosto comprobando la teoría de que las emisiones aumentan durante el invierno. En ambos casos, sin embargo, los niveles aumentan a lo largo del día consistente con la activación económica en la ciudad y la presencia de tránsito en ésta. A su vez, al terminar la tarde y los inicios de la noche comienzan a bajar nuevamente.

La **temperatura** del ambiente está alrededor de los 15°C debido a que las mediciones se realizaron en otoño. El valor más alto es de 24°C y se alcanza a las 16 horas del día gracias a la radiación solar. Con la llegada de la noche la temperatura desciende progresivamente a niveles cercanos a los 17°C.

Durante estas pruebas se registraron niveles elevados de **humedad**. Estos altos niveles pueden explicarse por las lloviznas constantes durante la medición. Además de elevar la humedad, estas lloviznas alteran la medición de los gases como el CO₂, NH₃ y NO₂.

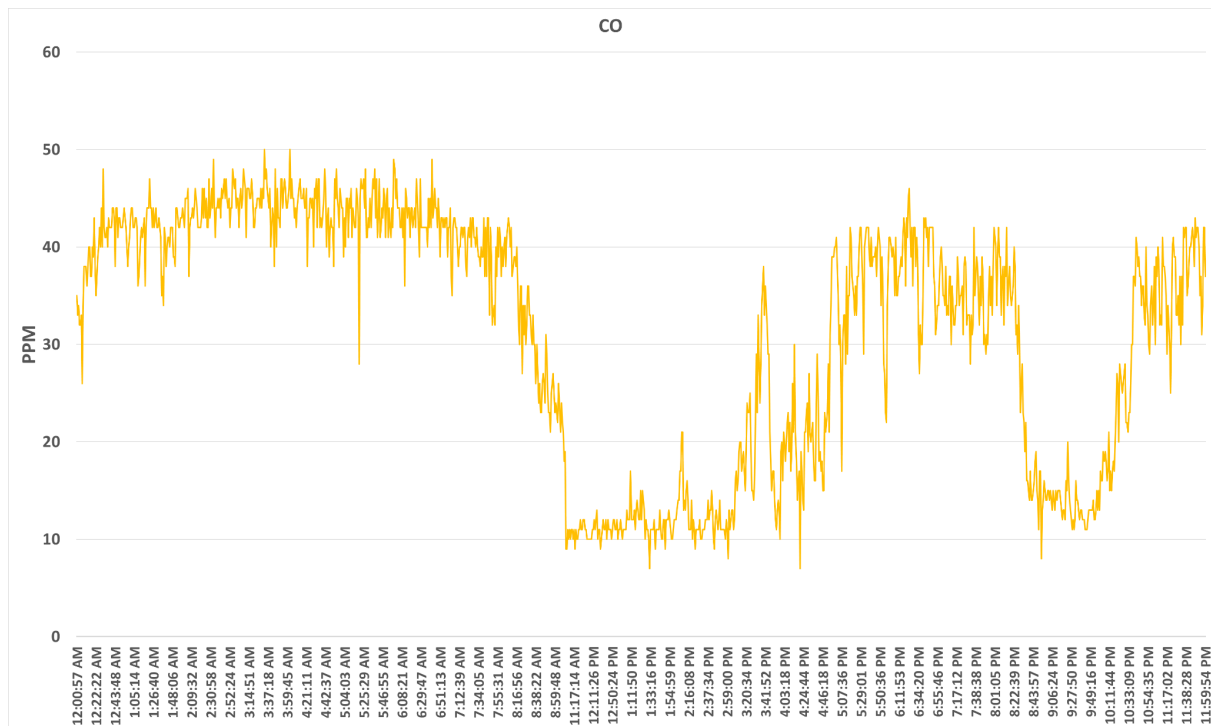


Figura 85: Gráfica de CO. 16 de Octubre.

Los datos del **CO** también son afectados por el comportamiento del tráfico y actividades económicas como se explicó anteriormente. Sus máximos, por lo tanto, son de 40-50 ppm durante el día y sus mínimos de 10-20 ppm en los horarios de menor actividad.

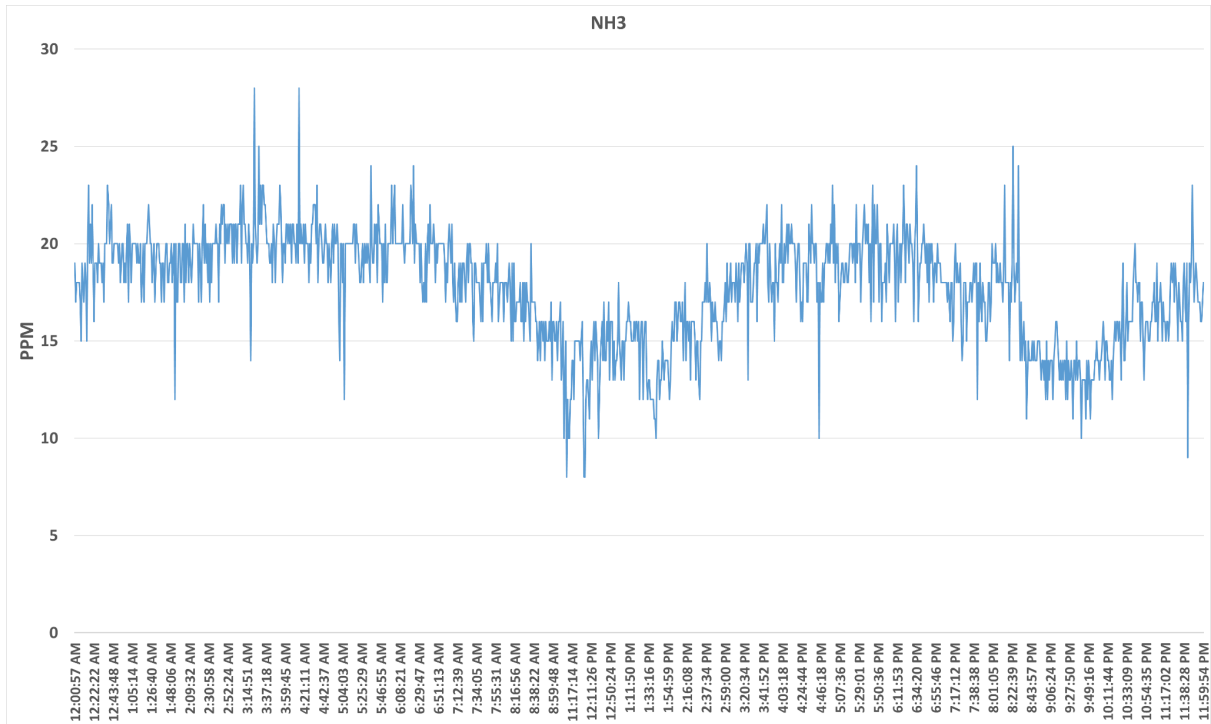


Figura 86: Gráfica de NH₃. 16 de Octubre.

Los resultados del NH₃ muestran un comportamiento similar al del CO, pero con valores de ppm más bajos. Los máximos fueron de 27 ppm y los mínimos de 8 ppm, los cuales coinciden también con las horas de mayor y menor tráfico, respectivamente, durante el día.



Figura 87: Gráfica de NO₂. 16 de Octubre.



Figura 91: medición del CO en ppm durante la quema del 4 de Noviembre.



Figura 92: medición del NH₃ en ppm durante la quema del 4 de Noviembre.



Figura 93: medición de NO₂ en ppm durante la quema del 4 de Noviembre.

En las gráficas de esta sección se presentan los datos obtenidos durante la quema del 4 de noviembre del 2024. El rango de tiempo durante el cual se realizó la quema, de 17:00 a 18:00, se encuentra enmarcado en un recuadro blanco para así facilitar la interpretación del comportamiento de estos sensores durante los incendios. Los resultados de estas pruebas no demostraron cambios significativos con respecto a lo registrado los días experimentales en las instalaciones del CSIC. Lo más probable es que esto se deba a la gran distancia que hay entre el sensor y el fuego junto con la baja magnitud del incendio. Básicamente, una quema controlada a 38 metros tiene poco impacto sobre las mediciones del sensor, por lo que prevalece el comportamiento ambiental usual.

Otro aspecto que resalta entre estas medidas son los bajos niveles de CO y NH₃. Estas presentan valores muy bajos con respecto a las medidas realizadas en el CSIC. Los máximos de CO y NH₃ registrados en estos días son de 17 ppm y 9 ppm respectivamente mientras que los registrados en el CSIC el 16 de octubre son de 50 ppm y 27 ppm. El cambio de ubicación puede explicar esta diferencia. Las instalaciones del INIA-CIFOR están más alejadas del centro de la ciudad, por lo cual hay una reducción del volumen de tráfico, una mayor circulación de viento y una dispersión más amplia de estos gases. Por otro lado, existe la posibilidad de que el sensor MiCS-6814 requiera nuevamente de la calibración para programar los datos recibidos de voltaje a ppm porque, como previamente se ha descrito, la diferencia es sustancial.

Sin embargo, se pueden destacar algunos resultados obtenidos. En la Figura 88 se detalla un crecimiento de los **niveles del CO₂**, no durante, sino después de las pruebas de las quemas. El incremento escalonado que se observa puede deberse a la expansión del gas después de la quema. En el caso de la **temperatura** se puede detallar un resultado contradictorio al revisar la Figura 80: pareciera que desciende la temperatura durante el incendio. Como se describe anteriormente, una posible explicación es la gran distancia del sensor al incendio haciendo casi imperceptible la variación de la temperatura. Los niveles de **humedad** confirman la hipótesis previamente planteada: la caída de la temperatura y menor exposición solar que acompañan el final del día hacen que aumenten los niveles de humedad al cerrar la tarde y adentrarse en el anochecer. Esto nos demuestra que el sensor si es efectivo midiendo variables ambientales.

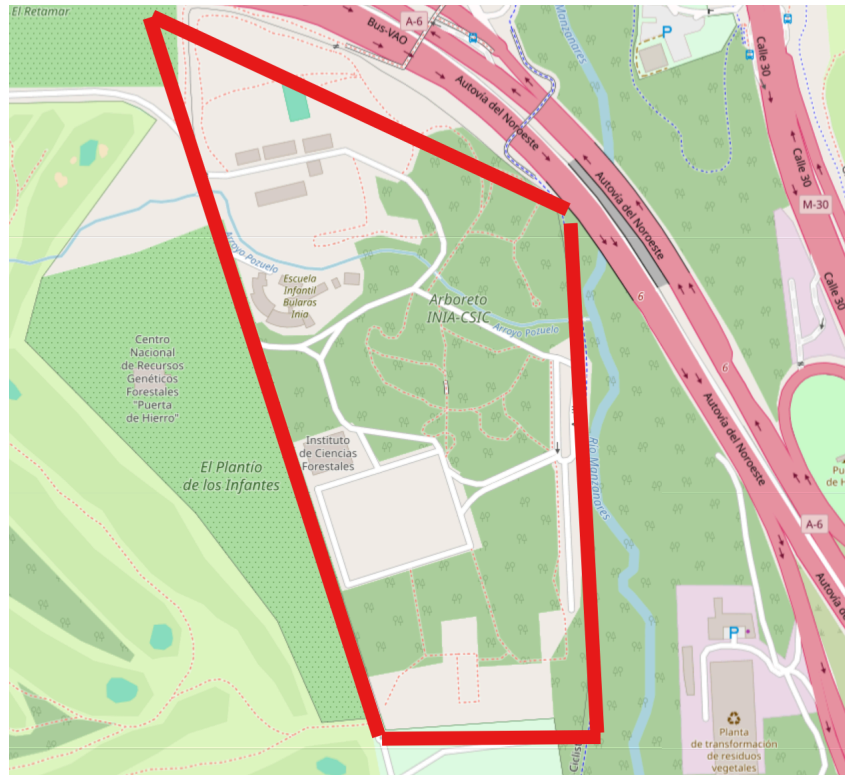


Figura 94: Imagen de GPS de las instalaciones del INIA-CIFOR (Rodeada de campos de golf y zonas abiertas)

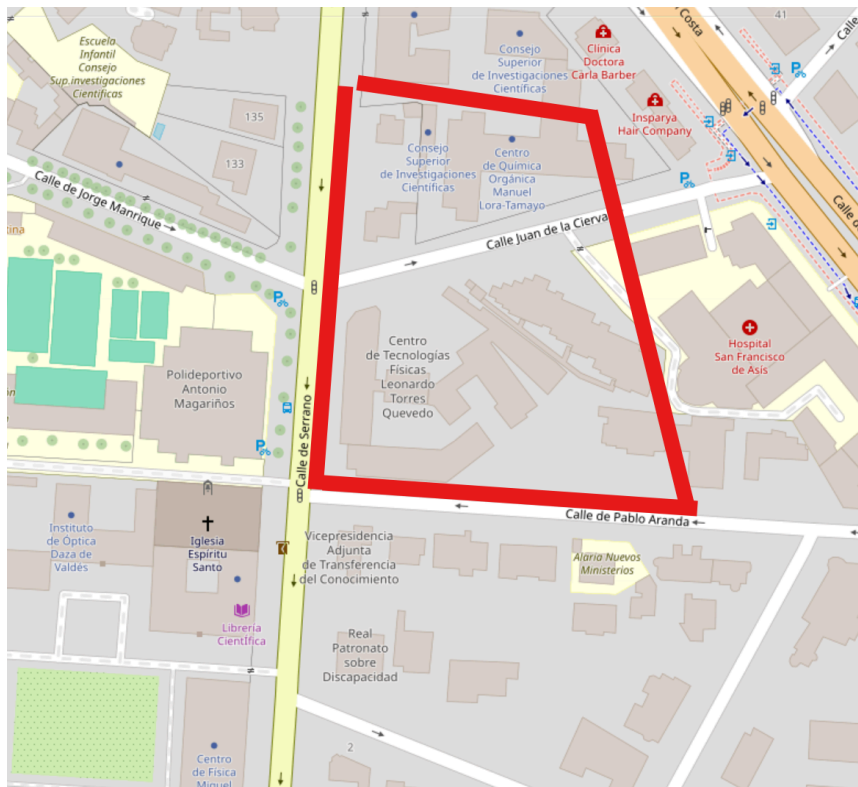


Figura 95: Ubicación de GPS de las instalaciones del CSIC (Rodeado de edificaciones, paradas de autobuses y hospitales)

IV.2.2 Resultados de la quema el 5 de noviembre



Figura 96: medición del CO₂ durante la quema del 5 de Noviembre.



Figura 97: medición de la temperatura durante la quema del 5 de Noviembre.

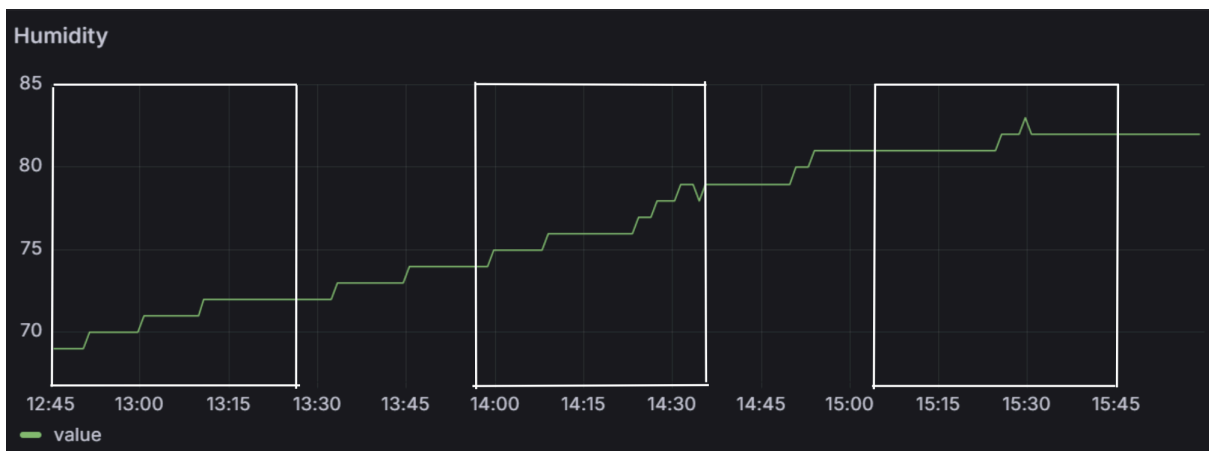


Figura 98: medición de la humedad durante la quema del 5 de Noviembre.



Figura 99: medición del CO durante la quema del 5 de Noviembre.



Figura 100: medición del NH3 durante la quema del 5 de Noviembre.



Figura 101: medición del NO₂ durante la quema del 5 de Noviembre.

En las figuras anteriores se ilustran los resultados obtenidos durante las pruebas del **5 de Noviembre**. En estas gráficas los recuadros delimitan cada una de las tres quemas que se realizaron ese día. Como se explicó en la sección III, las quemas se realizaron con intervalos de 30 minutos entre sí y durante cada quema se fue incrementando la velocidad de la turbina de viento cada 10 minutos, desde 0 m/s hasta 3 m/s. Los resultados fueron similares a los obtenidos durante el 4 de Noviembre: los valores de las variables ambientales no se ven impactados de manera significativa por las quemas. Una posible explicación es una baja sensibilidad del sensor. Sin embargo, se puede descartar esta hipótesis porque se ha demostrado anteriormente, en la sección IV.1, que el sistema mide adecuadamente el comportamiento climático durante un día o meses. Una hipótesis más refinada es que el sensor presenta una baja sensibilidad ante cambios bruscos del medio ambiente. Alternativamente, los resultados pudieran ser un fuerte indicativo de que la cantidad de combustible utilizado para estas quemas es muy poco, por lo cual no se genera una columna de fuego capaz de generar grandes cantidades de humo, irradiar más calor y alterar las variables medioambientales de manera significativa.

IV.2.3 Monitoreo del medio ambiente durante las pruebas entre el 4 y 6 de noviembre.

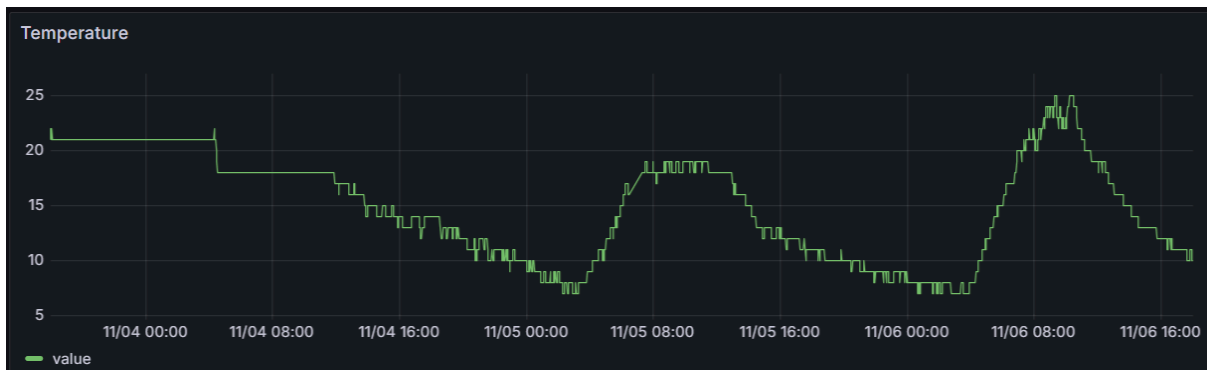


Figura 102: Monitoreo de la temperatura.



Figura 103: Monitoreo del CO₂.

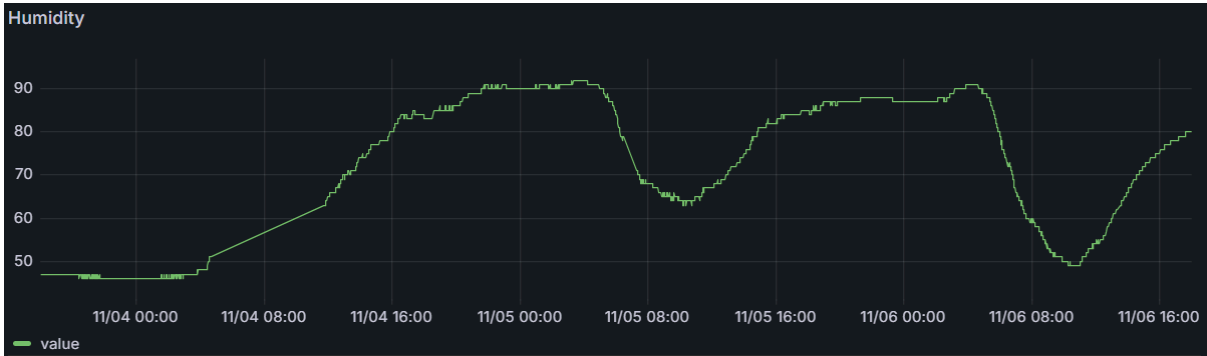


Figura 104: Monitoreo de la humedad.

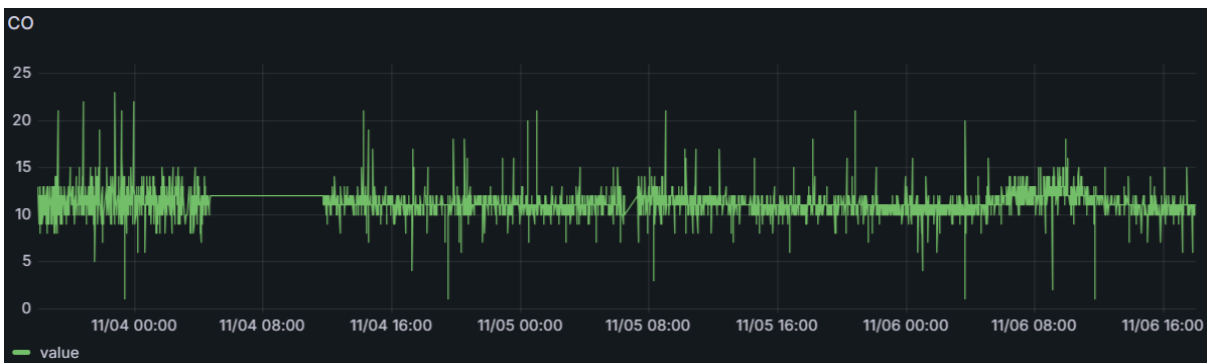


Figura 105: Monitoreo del CO.

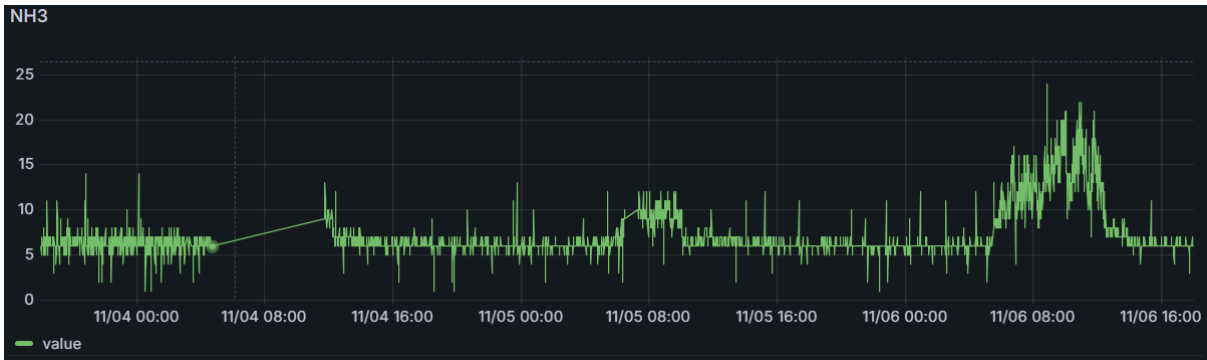


Figura 106: Monitoreo del NH3.



Figura 107: Monitoreo del NO₂.

Con el objetivo de demostrar que el sistema es capaz de captar datos correspondientes a las condiciones climáticas, se desarrollan las figuras anteriores que ajustan la visual de los datos a una temporalidad de tres días desde el 4 al 6 de noviembre. En estos gráficos se pueden observar los cambios de las condiciones climáticas esperados durante un día de invierno, es decir, el sistema captura correctamente estos datos.

Un resultado interesante es el de los sensores de CO y NH₃ que comienzan a registrar un crecimiento que coincide con la caída de la humedad. Esto se puede atribuir al aumento de volatilidad que ocurre al haber una menor presencia de humedad. Como establece el departamento de salud de Nueva York (2025), una alta humedad se mezcla con gases como el amonio, los hace más pesados y produce que se depositen en el suelo. En condiciones de baja humedad, por lo tanto, se mantendrán en estado gaseoso y pueden ser captados por el sensor.

IV.3 Evaluación de impactos: social, económico y medioambiental:

En España los incendios forestales son un problema grave y recurrente. Es por esto que un sensor orientado a la protección del medioambiente y ecosistemas a través de la prevención de incendios es una herramienta de alto impacto a múltiples niveles. A nivel económico, el diseño y uso de la fabricación aditiva facilita la reparación y reutilización, lo cual también tiene un impacto medioambiental favorable. El sensor, además, fue diseñado con criterios de eficiencia en el uso de energía, minimizando el consumo de recursos energéticos. La prevención de incendios, o incluso el control en etapas tempranas, representa un ahorro importante en costos de reparación. Además, se protegen las vidas y patrimonio de las personas en comunidades cerca de zonas forestales.

IV.4 Responsabilidad ética y legal:

El proceso de diseño y desarrollo de un sensor para la prevención de incendios requiere tener en consideración aspectos legales, éticos y ambientales para fomentar la confianza de los usuarios y contribuir a la seguridad pública y al cuidado del medio ambiente. La claridad en cuanto al alcance, mecanismo de funcionamiento del dispositivo y sus capacidades, son fundamentales, así como enmarcarlo dentro de los aspectos legales y éticos.

La Ley 26/2007 de Responsabilidad Medioambiental, de acuerdo con el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, tiene dentro de sus objetivos:

“Fomentar la adopción de medidas de gestión del riesgo para reducir los accidentes que puedan causar daños medioambientales y limitar sus consecuencias. Asegurar que se llevan a cabo las medidas de prevención, evitación y reparación de los daños medioambientales que se produzcan” (MITECO, 2019).

Al desarrollar un sistema que puede tanto prevenir el inicio como el avance de un incendio, el presente proyecto colabora con el cumplimiento de esta ley. Cuidar de nuestro planeta, sin embargo, no es solo una responsabilidad legal sino ética. El calentamiento global y sus consecuencias son el resultado de un manejo irresponsable y abuso de los recursos

medioambientales. Cuidar de los ecosistemas debería ser una prioridad social e individual. Esta convicción guía el desarrollo de este proyecto. Otros principios éticos que este proyecto busca defender son la protección de la vida humana y el bienestar de la comunidad. Sin embargo, las consideraciones éticas no sólo deben ser el alma del proyecto, sino que deben ser estándares a los cuales aspirar. La transparencia y la veracidad, por ejemplo, son cruciales: se debe ser honesto acerca de las capacidades y limitaciones del sensor en la documentación y promoción del producto. Por último, como se ha mencionado anteriormente la accesibilidad es un deber y principio de este proyecto: la solución está desarrollada en software libre lo cual da oportunidad de crecimiento, mejora y cooperatividad.

Para un futuro en el que el proyecto aquí presentado pueda ser patentado como producto serán importantes las siguientes consideraciones legales:

- Cumplir con la legislación vigente en España, como el Código Técnico de la Edificación (CTE) y normativas específicas locales sobre protección contra incendios.
- Asegurarse de que el dispositivo cumpla con las normativas de la Unión Europea en materia de productos y dispositivos de seguridad.
- Obtener las certificaciones necesarias que demuestren que el sensor cumple con las normativas de calidad y seguridad.
- Realizar pruebas y obtener acreditaciones de laboratorios especializados.
- Considerar la responsabilidad legal en caso de fallos del sistema que puedan resultar en daños o incendios.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES

El cuidado del medioambiente es fundamental para el desarrollo de la humanidad, por eso, el desarrollo de este proyecto ofrece una alternativa que monitorea los cambios que pueden amenazar los ecosistemas y su fauna. Al implementar sistemas como la fabricación aditiva y el código abierto, se promueve la sustentabilidad, el derecho a reparaciones, el fácil mantenimiento y la constante evolución de los sistemas. Esto abre la oportunidad a la reducción de desperdicios y administración de recursos, lo cual reduce la huella de carbono. Por eso, se considera que el incremento de futuros proyectos involucrando ambas técnicas tienen la capacidad de generar soluciones más ecológicas y sostenibles a lo largo del tiempo, eliminando la dependencia a las industrias para fabricar componentes y al transporte para recibir bienes. Además, estas técnicas fomentan el colectivismo y la mejora continua por los mismos usuarios que las utilizan, refinando cada día la implementación de estas para futuros proyectos.

Este trabajo de fin de grado demuestra que la implementación de soluciones de código abierto y fabricación aditiva permiten la implementación de nuevas iteraciones y adaptaciones según los cambios y necesidades que surgían durante el proyecto. La adaptabilidad de este sistema de trabajo permitió: añadir un nuevo sensor, desarrollar una base que sostenga ambos sensores y que a su vez pueda drenar el agua que pudiese entrar en la envolvente y cambiar el administrador de energía, batería y el panel solar.

Tras analizar los resultados de las mediciones, se puede afirmar que el sistema logra capturar de manera eficiente variables medioambientales certeras que coinciden con una transición de verano a invierno. De esta manera, se confirma que el sistema es capaz de reportar datos ambientales reales en vivo.

Dentro de las pruebas realizadas, el sensor fue capaz de medir:

- Como el CO_2 es influenciado por el incremento de tránsito vehicular y actividades económicas al inicio del día.
- La temperatura va descendiendo gradualmente con el cambio de estaciones.
- La variación de la humedad con respecto a la presencia del sol y como agentes externos como las superficies podían alterar brevemente la medida.
- Como las mediciones de CO alcanzaron sus máximos durante las activaciones de tráfico y los días laborales de la semana.
- El comportamiento del NH_3 respondía ante la lluvia o lloviznas además del cambio climático, incluyendo condiciones ambientales como la misma humedad.
- A pesar de haber capturado los datos previamente descritos existe la oportunidad de mejora y ajuste para corregir errores como el de las mediciones del NO_2 .

Otro aspecto fundamental es la revisión de futuras pruebas. Se puede inferir que los resultados en el INIA-CIFOR se vieron altamente impactados por el invierno y las pruebas realizadas no pudieron incidir en la capacidad de medida de los sensores ante un incendio. Algunas de las soluciones ante estos inconvenientes pueden ser:

- Realizar las pruebas en climas más estables, en donde el frío y el viento no afecten a la capacidad del incendio de irradiar calor ni a la sensibilidad de los sensores para capturar estos datos.
- Considerar la ejecución de pruebas durante la primavera, el verano y otoño porque la temperatura en estas estaciones es más alta y las probabilidades de formación de un incendio aumentan. De esta manera los incendios controlados que se ejecuten estarán en condiciones más favorables y posiblemente aumente su capacidad de generar más CO₂ y una mayor cantidad calor.
- Evaluar que los sensores estén correctamente calibrados al haber hecho la transición a otra plataforma.

CAPÍTULO VI. LÍNEAS FUTURAS

En secciones anteriores se contempla el potencial de la fabricación aditiva, las configuraciones de los diferentes Arduinos y los escudos solares. En esta sección se hará énfasis únicamente en el equipo final del proyecto y otras aplicaciones que podrían surgir en torno al desarrollo de nuevas soluciones dentro del marco de la fabricación aditiva y el código abierto.

Considerando que la fabricación aditiva y la programación de Arduino pueden ajustarse a diversos campos y necesidades, sistemas similares de monitoreo de temperatura, humedad y gases pueden funcionar a nivel industrial en espacios controlados sin requerir de un gasto mayor en marcas establecidas del mercado. Por otra parte, los componentes del sistema pueden modificarse hasta adecuarse a las necesidades de espacios específicos. Por ejemplo: se podrían incorporar un anemómetro, un pluviómetro y un medidor de la intensidad solar. Además, se puede expandir el repertorio de aplicaciones más allá de un sistema de monitorización meteorológica, agregando soluciones como las de un sistema de acción contra incidencias, protocolos de comunicación, e incluso la inteligencia artificial para la predicción ambiental.

Con el coste reducido de estos sistemas se puede considerar su uso en el hogar. Utilizando, por ejemplo, el sistema para detectar los niveles de CO en el hogar. En este caso, no se depende de la innovación de las empresas sino del propio usuario, promoviendo al desarrollo colectivo y canalizando una mayor cantidad de experiencia de usuarios a la hora de aplicar una mejora.

CAPÍTULO VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AlfaIoT Webmaster. (2022, March 21). *The Things Network (TTN), Una Red IOT global para la sociedad*. AlfaIoT.

<https://alfaiot.com/iot/the-things-network-ttn-una-red-iot-global-para-la-sociedad/>

Arduino. (n.d.). *MKR WAN 1310*. docs.arduino.cc.

<https://docs.arduino.cc/hardware/mkr-wan-1310/>

Autodesk Ireland Operations UC. (n.d.). *Software autodesk inventor: Obtener Precios y comprar El Producto Oficial Inventor 2026*. Software Autodesk Inventor | Obtener precios y comprar el producto oficial Inventor 2026.

<https://www.autodesk.com/es/products/inventor/overview?msockid=03f41410a047686115e7016da13c6962&term=1-YEAR&tab=subscription&plc=INVPROSA>

BBVA. (2025, July 28). *¿Qué son los paneles solares y cuál es su futuro?*. BBVA NOTICIAS.

<https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-son-los-paneles-solares-como-funcionan-y-cual-es-su-futuro/>

Caballero, A. (2023, September 21). *Efecto Invernadero: Causas y consecuencias en el clima*. Climate Consulting. <https://climate.selectra.com/es/que-es/efecto-invernadero>

de Naoum, K. (2022a, September 19). *All about ABS 3D printing filament: Materials, properties, definition*. Xometry RSS.

<https://www.xometry.com/resources/3d-printing/abs-3d-printing-filament/>

de Naoum, K. (2022b, September 19). *All about ABS 3D printing filament: Materials, properties, definition*. Xometry RSS.

<https://www.xometry.com/resources/3d-printing/abs-3d-printing-filament/>

Dryad Networks GmbH. (2024). *Silvanet - ai wildfire detection in minutes: Dryad networks*. Dryad. <https://www.dryad.net/silvanet>

File-extension.info. (2020, 19 de febrero). *¿Cómo Abrir Un Archivo IPT? Extensión De Archivo .IPT - File Extension .IPT*. File-extension.info.

<https://www.file-extension.info/es/format/ipt>

File-Extension.info. (2023, 29 de noviembre). *¿Cómo Abrir Un Archivo IAM? Extensión De Archivo .IAM - File Extension .IAM*. file-extension.info.

<https://www.file-extension.info/es/format/iam>

- Guest@HuaweisolarBlog. (2023, November 6). *Regulador de Carga Solar: Componentes Esenciales de la Energía Verde*. Huawei.
<https://solar.huawei.com/es/blog/2023/solar-charge-controller/>
- Huang, Y. (2019, October 21). *What is Lora Technology and how it works - an in-depth guide*. mokosmart.com. <https://www.mokosmart.com/lora-technology/>
- Madrigal, J., , Guijarro, M., , & Hernando, C., . (2014). El Túnel de Viento del INIA-CIFOR como dispositivo experimental para el estudio de los incendios forestales. *Cuadernos De La Sociedad Española De Ciencias Forestales*, (40).
<https://doi.org/10.31167/csef.v0i40.17361>
- Mauri, E., Jankavić, M. (2024). Planificación y prevención del riesgo de incendios forestales - Innovaciones en el Mediterráneo y otros territorios. European Forest Institute. DOI: <https://doi.org/10.36333/rs8es>
- Mallari, J. (2024, November 11). *How to setup I2C communication on the Arduino*. Circuit Basics.
<https://www.circuitbasics.com/how-to-set-up-i2c-communication-for-arduino/>
- Markforged. (n.d.). *What is Additive Manufacturing? Technology & Impact Guide*. Markforged.
<https://markforged.com/resources/blog/additive-manufacturing-101-guide-the-basics>
- MathWorks Inc. (n.d.). *MATLAB*. El lenguaje del cálculo técnico.
<https://la.mathworks.com/products/matlab.html>
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (n.d.). *Estadística general de Incendios Forestales (EGIF)*. miteco.gob.es.
<https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/incendios-forestales/estadisticas-datos.html>
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2019). *Responsabilidad Medioambiental*. miteco.gob.es.
https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/responsabilidad-medioambiental.html?utm_source=chatgpt.com
- Naciones Unidas. (n.d.). *¿Qué son las energías renovables?*. United Nations.
<https://www.un.org/es/climatechange/what-is-renewable-energy#:~:text=Las%20energ%C3%ADas%20renovables%20son%20un%20trabajo%20que%20los%20combustibles%20f%C3%B3siles>

Naoum, K. (2022, 29 de septiembre). All about ABS 3D printing filament. Xometry. Actualizado por Conniff, M. (2025, 22 de julio).

<https://www.xometry.com/resources/3d-printing/abs-3d-printing-filament/>

New York State Health Government. (2025, mayo). *Ammonia*. New York State Department of Health.

<https://www.health.ny.gov/environmental/chemicals/ammonia/index.htm>

The Nature Conservancy. (2004). *El Fuego, los Ecosistemas y la Gente*. Tallahassee.

Peret, J. (2024, September 25). *¿Cómo se propaga el fuego - factores clave detrás su propagación*. Dabedan.

<https://www.dabedan.com/como-se-propagan-incendios-factores-clave-prevencion/>

Qué Es Arduino Ide. TuElectronica.es. (n.d.).

<https://tuelectronica.es/que-es-arduino-ide/>

RTVE. (2024). *Mapa de incendios forestales en España en 2024*. rtve.es.

<https://www.rtve.es/mapa-incendios-forestales-2024>

Siemens Digital Industries Software. (n.d.). *Diseño Asistido por Ordenador (CAD): Siemens software*. Siemens.

<https://www.sw.siemens.com/es-ES/technology/computer-aided-design-cad/>

The Nature Conservancy. (2004). *El Fuego, los Ecosistemas y la Gente*. Tallahassee.

The Things Industries. (n.d.). *The Things Stack Documentation*. Home | The Things Stack for LoRaWAN. <https://www.thethingsindustries.com/docs/>

Titania Compañía Editorial. (2021, August 17). *Qué Es el sensor de humedad, Qué utilidad tiene y aplicaciones*. elconfidencial.com.

https://www.elconfidencial.com/tecnologia/2021-08-17/que-es-sensor-de-humedad-utilidad-aplicaciones_3220448/

Zambetti, N., Söderby, K., & Hylén, J. (2024, September 20). *Inter-Integrated Circuit (I2C) Protocol*. Docs.arduino.cc. <https://docs.arduino.cc/learn/communication/wire/>

¿Qué es un archivo .stl?. 3D Systems. (2019, October 14).

<https://es.3dsystems.com/quickparts/learning-center/what-is-stl-file>

¿Qué es una librería en arduino y cómo se instala?. Electronica.guru. (n.d.).

<https://electronica.guru/app01/4070/que-es-una-libreria-en-arduino-y-como-se-instala>

CAPÍTULO VIII. PLANIFICACIÓN TEMPORAL Y PRESUPUESTO

VIII.1 Planificación temporal

Para la planificación temporal del proyecto se puede contabilizar el inicio desde la investigación del mercado y la elaboración de la propuesta del diseño. El cierre del proyecto serían las pruebas desarrolladas que fueron explicadas en este trabajo. Sin embargo, el proyecto continúa en el CSIC y está en una constante mejora. Se prevé incorporar futuras soluciones para poder resguardar las zonas pilotos previamente mostradas.

Dentro de los hitos más fundamentales para llevar a cabo este proyecto están:

- Inicio del proyecto y análisis del impacto medio ambiental.
- Investigación del mercado y reconocimiento de soluciones comerciales actuales.
- Selección de componentes que debe de tener un sistema de monitoreo.
- Inicio del diseño.
- Revisiones del diseño.
- Aprobación del diseño.
- Pruebas de filamentos.
- Impresión de las piezas diseñadas.
- Selección de la electrónica.
- Pruebas del sistema en el CSIC.
- Pruebas del sistema en el INIA-CIFOR.
- Documentación y elaboración del

Diagrama de Gantt - Proyecto Jesús Martínez

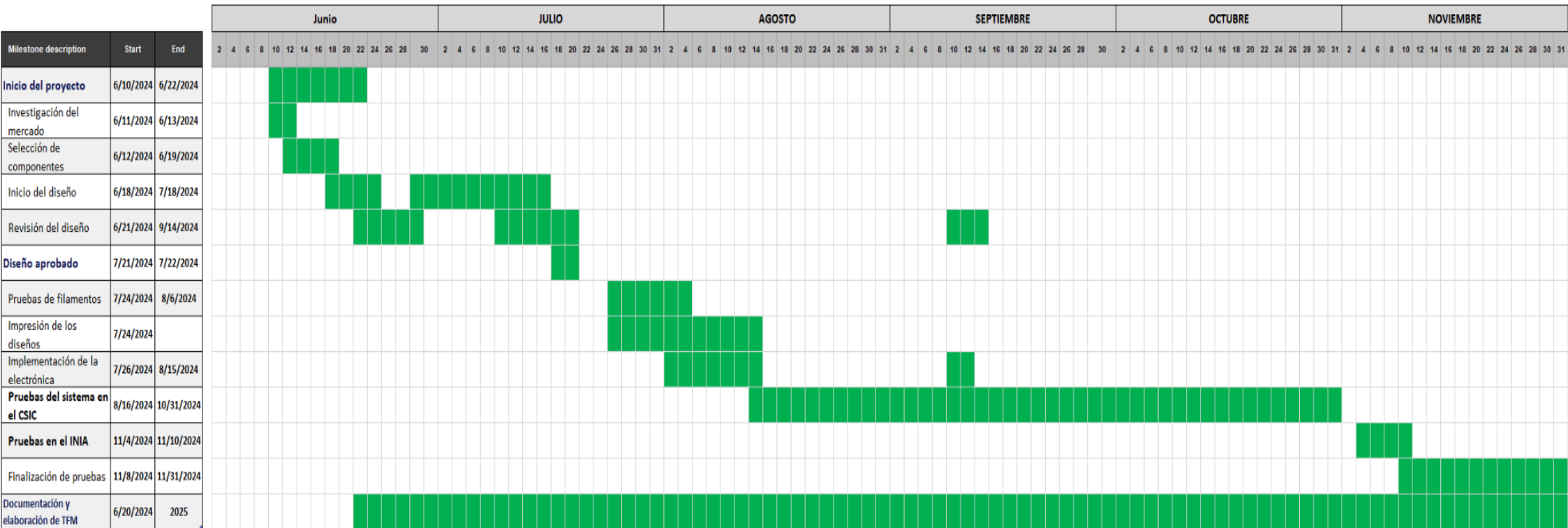


DIAGRAMA 1: DIAGRAMA DE GANTT DEL PROYECTO.

VIII.2 Presupuesto

VIII.2.1 Estructura de costos del Sistema Final

Para establecer una comparativa de costos solo se tendrá en cuenta el escudo de radiación solar, excluyendo el soporte, ya que este sería utilizado por ambos sistemas de detección. Por otro lado, se deben de considerar, tiempos de entrega y producción ya que esto influye en el tiempo de respuesta que podamos brindar en casos de mantenimientos, instalaciones o expansión de las redes de recolección de datos.

Para determinar los gastos involucrados en la creación del prototipo debemos considerar:

- Precio de sensores y electrónica
- Precio de impresión
- Precio de la batería
- Costo de producción

Partiendo de los costos de adquisición de los sensores tenemos lo siguiente.

Item	Cantidad	Precio Unit
Sensirion SCD4-1X	1	€ 56.50
MiCS-6814	1	€ 25.99
MKR WAN 1310	1	€ 41.25
DFR0535	1	€ 38.90
Bateria RS PRO	1	€ 37.09
Panel Solar	1	€ 59.95
	Total	€ 259.68

Tabla 15: Costos globales de los materiales del prototipo.

Estos costos representan tiendas ubicadas en España, por lo tanto, el costo y tiempo de envío será menor además de que la garantía en caso de fallas técnicas puede cubrir cualquiera de estos componentes dentro del territorio español.

Considerando el costo productivo se determinaron unas estimaciones de producción acorde a un estándar de costos elaborado por el MIT y estudiado en la asignatura de fabricación aditiva, en la cual se estima,

- El coste de filamento
- Volumen de impresión

- Coste de máquina
- Utilización de soporte
- Orientación
- Cantidad de piezas por impresión
- Cantidad total de piezas a imprimir
- Costos de mano de obra
- Costos de ingeniero
- Amortización de la máquina
- Tasa de interés
- Velocidad de impresión

Esto permite aproximar a la realidad el precio que le corresponde a cada pieza individualmente conforme a los factores previamente descritos y de esta manera conocer el precio de fabricación correspondiente de la carcasa.

Costo total	%	€
Materiales	64.8%	€ 561.53
Preparación	0.0%	€ -
Uso de maquinaria	20.1%	€ 9.30
Consumibles de construcción	8.6%	€ 7.50
Labor	6.5%	€ 5.63
Postproducción	0.0%	€ -
Costo total		€ 73.96
Costo promedio por parte		€ 6.16

Tabla 16: Estimación de costo del plato.

Por lo tanto, al utilizar 9 platos se calcula un precio total de: $6.16 \times 9 = 55.44€$

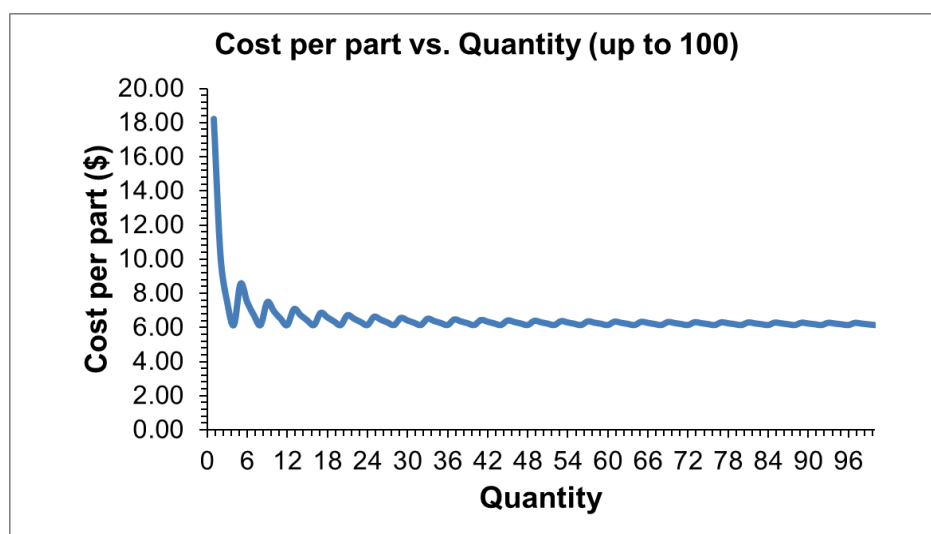


Figura 108: Gráfica de Costo por pieza vs Cantidad del plato.

Costo total	%	€
Materiales	64.7%	€ 50.58
Preparación	0.0%	€ -
Uso de maquinaria	20.7%	€ 8.94
Consumibles de construcción	8.4%	€ 7.50
Labor	6.3%	€ 5.63
Postproducción	0.0%	€ -
Costo total		€ 72.64
Costo promedio por parte		€ 6.05

Tabla 17: Estimación de costo de la tapa.

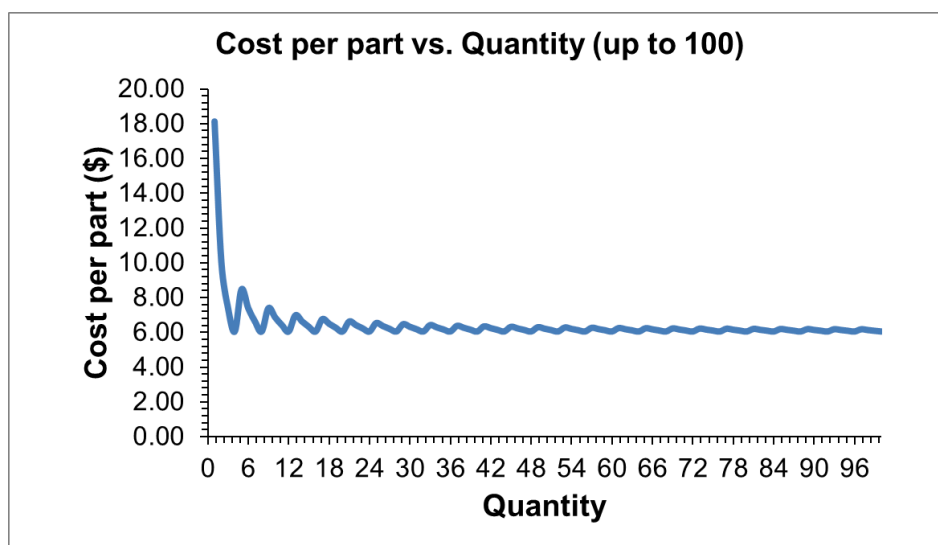


Figura 109: Gráfica de Costo por pieza vs Cantidad de la tapa.

El costo de impresión de la base donde se alojan los sensores fue calculada a través del mismo software de Bambu Lab el cual indicó un costo de 6.04€.

Filamento total	74,73 m	188,73 g
Filamento modelo	74,73 m	188,72 g
Coste	6,04€	
Planificar tiempo	7 m 25s	
Tiempo de impresión del modelo	6 h 14 m	

Tiempo total	6 h 22 m	
--------------	----------	--

Tabla 18: datos de la impresión de la base y su costo.

Al totalizar el costo total de un prototipo tenemos los siguientes costos:

$$\text{Total Electrónica} + \text{Total Piezas impresas} = 259.68 + 55.44 + 6.05 + 6.04 = 327.11\text{€}$$

VIII.2.2 Precio de un sistema comercial similar

Se realizó un estudio de mercado con el fin de comparar soluciones similares para el monitoreo del medio ambiente y prevención de incendios. Al investigar acerca de nuevos productos se encuentra una plétora de soluciones amplias con un precio que puede rondar entre los 250€ y 320€. Existe, por lo tanto, una gran variedad de productos más económicos que el presentado en este trabajo. Sin embargo, se desconoce su calidad. Además, tienen poca información acerca de los sensores que utilizan y de algún tipo de certificación.

El RIKA 330-01A es un modelo similar que tiene la capacidad de medir humedad, temperatura y presión atmosférica. Su precio es de 290€ por unidad, 37€ menos que el propuesto en este trabajo.



Figura 110: RIKA 330-01A

Especificaciones			
Artículo	Temperatura	Humedad	Presión
Rango	-40-60°C	0-100%RH	10-110kPa(100-1100hPa)
Resolución	0.1°C	0.5%RH	0.1hPa
Exactitud	±0.5°C	±3%RH	±1hPa
Suministrar	5VDC, 12-24VDC		
Señal de salida	4-20mA,0-5V,0-10V,RS485(MODBUS),IIC, SDI-12		
Consumo actual	<20mA		
	(Temperatura y Humedad) ≤ 5mA Customizable		
Temperatura de funcionamiento	-40°C.+80°C		
Protección de ingreso	IP65		
Almacenamiento	10-60°C@20%-90%RH		
Peso (sin embalar)	120g		
Material de la sonda	ABS		
Escudo de Radiación (opcional)	RK95-01, 11 platos		

Tabla 19: Especificaciones del sistema meteorológico RIKA 330-01A

Comparando el sistema final desarrollado para este trabajo con el modelo comercial de RIKA se puede concluir que nuestro sistema a pesar de ser más costoso incluye el sistema de alimentación energético, el panel solar, sensores de gas. Además, como se mencionó previamente no requiere de tiempo de envío ni de espera. Por estos factores, se puede inferir que el sistema desarrollado es más costo-eficiente para las aplicaciones de detección de incendios.

APÉNDICE

Planos de las piezas fabricadas

- Platos circulares interno:

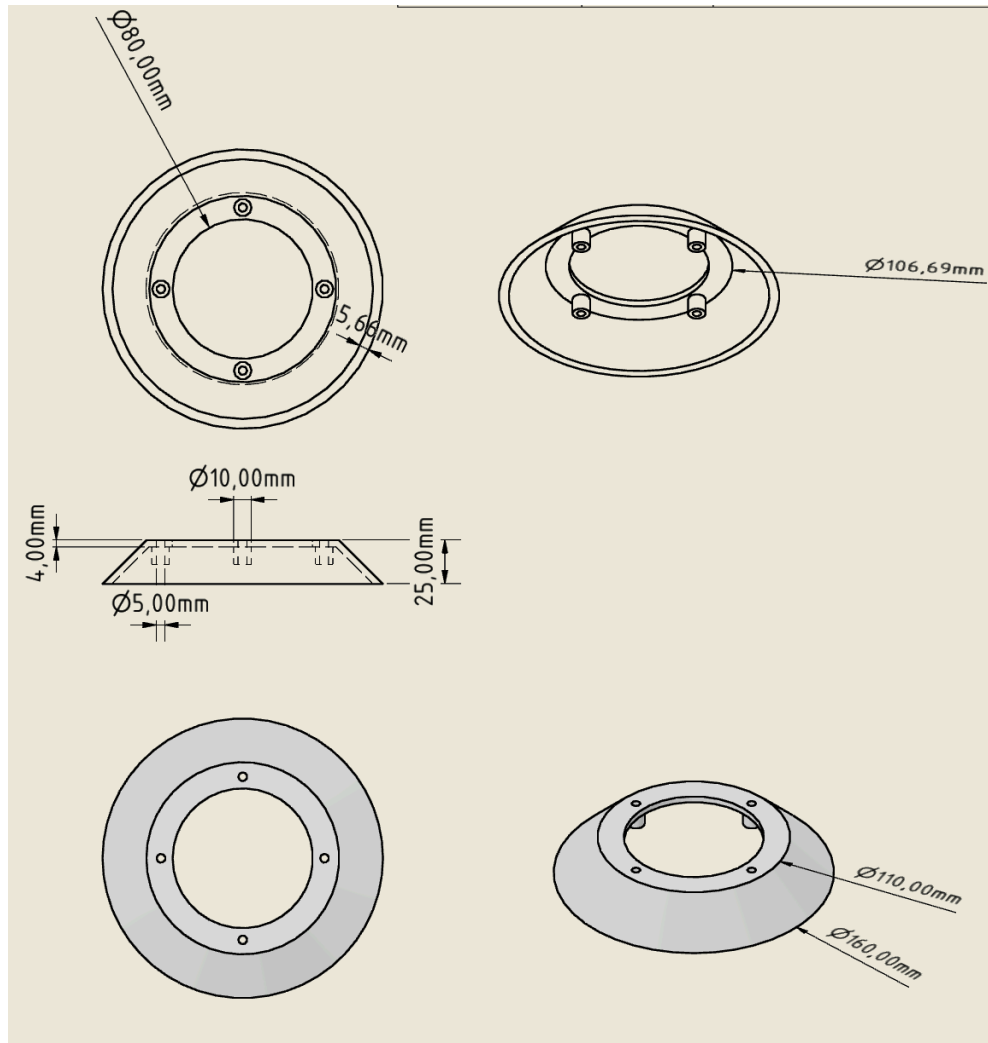


Figura 111: cotas del plato circular interno.

- Tapa Superior

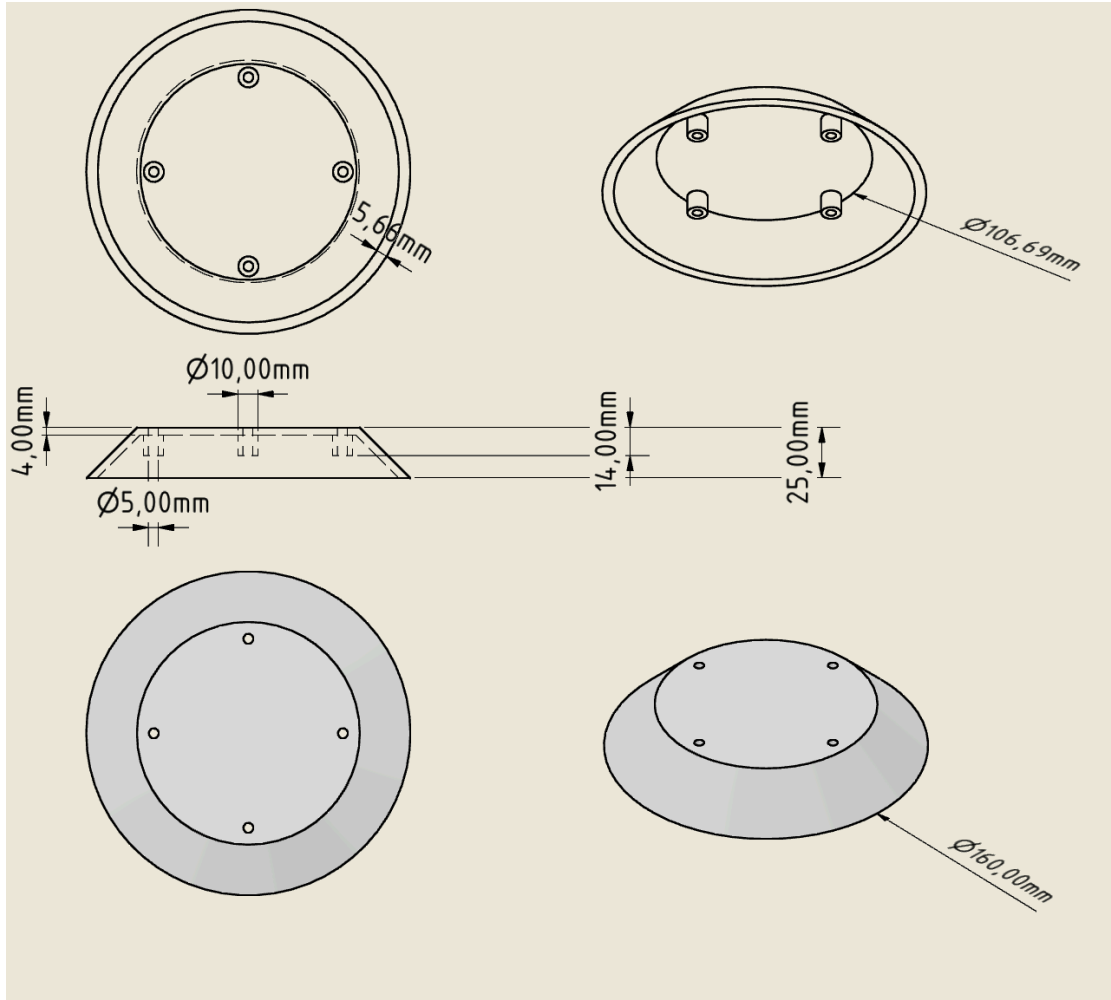


Figura 112: cotas de la tapa superior.

- Base de alojamiento de los sensores

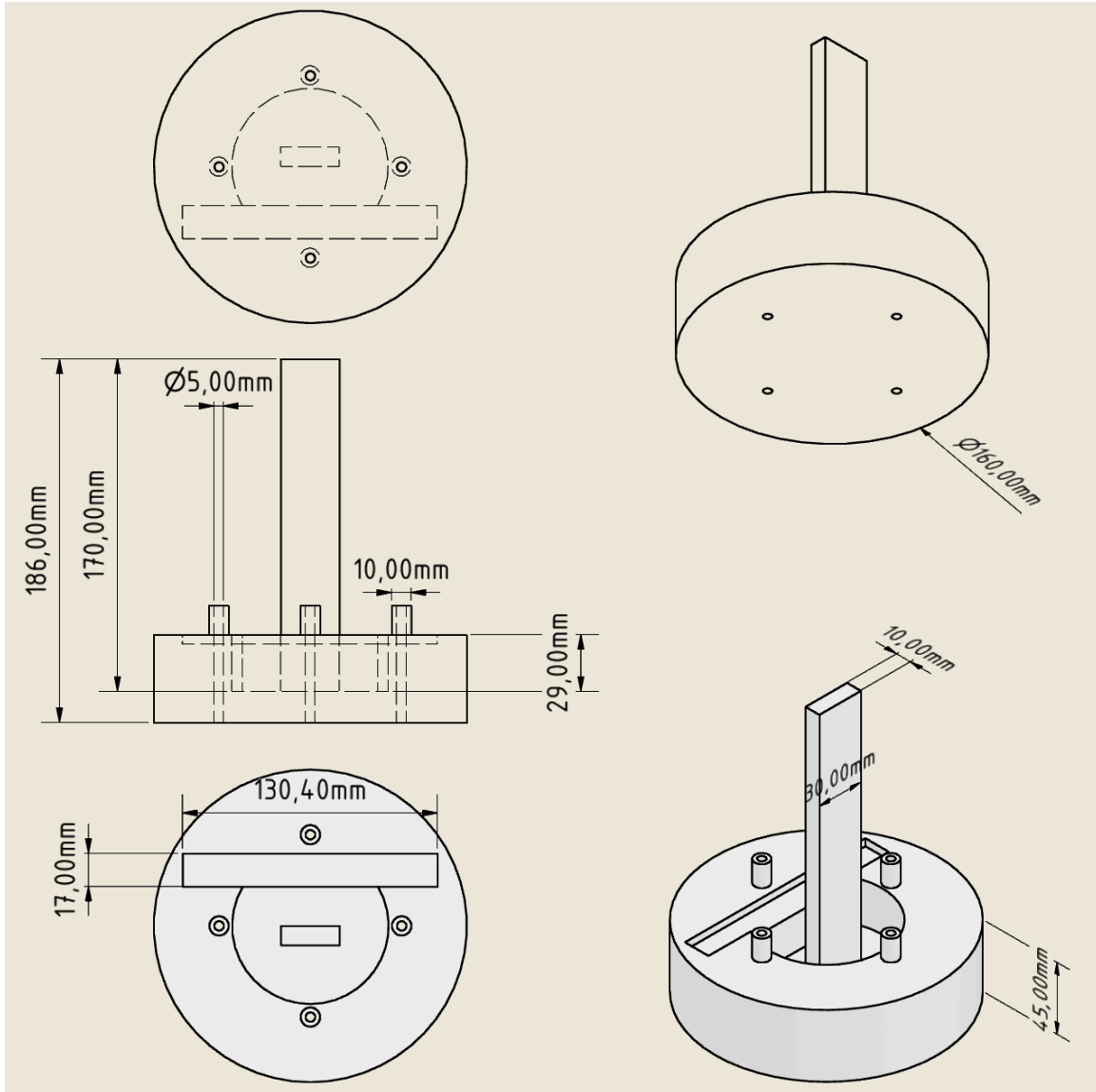


Figura 113: cotas de la base de alojamiento.

Código del arduino

El siguiente fragmento de código muestra cómo se adquieren los datos de los sensores:

```
uint16_t co2;
float temperature, humidity;
41
uint16_t a0_read, a1_read, a2_read;
void httpRequest() {
// Leer datos del sensor SCD4x
scd4x.readMeasurement(co2, temperature, humidity);
// Leer datos de sensores analógicos MiCS-6814
a0_read = analogRead(A0); // Canal CO
a1_read = analogRead(A1); // Canal NH3
a2_read = analogRead(A2); // Canal NO2
// Mapear valores de sensores analógicos
a0_read = map(a0_read, 0, 1023, 1, 1000); // CO en ppm
a1_read = map(a1_read, 0, 1023, 1, 500); // NH3 en ppm
a2_read = map(a2_read, 0, 1023, 0.05, 10); // NO2 en ppm
}
```

Para el caso del MiCS-6814 se requiere de una conversión de la señal analógica (en milivoltios) a ppm (partículas por millón), esta se lleva a cabo con la siguiente ecuación:

$$ppm = Valor\ de\ captura * (ppm\ Max - ppm\ Min / 1023) + ppm\ Min$$

En donde el valor de captura es el resultado de la medida analógica, el rango de valores ppm máx-mín establece los límites de las medidas de cada gas y el 1023 es la escala máxima de la lectura analógica del Arduino, en este caso 3.3V, este cálculo se debe de realizar para cada gas medido, ya que tienen diferentes rangos de ppm.

Transmisión de datos mediante LoRaWAN

Una vez procesados los datos, estos se empaquetan en un arreglo de 12 bytes para ser transmitidos a través del protocolo LoRaWAN, que luego procede a ser enviada a la nube.

El siguiente fragmento de código muestra cómo se realiza esta transmisión:

```
void httpRequest() {
byte buffer[12];
```

```
buffer[0] = int(co2) >> 8;
buffer[1] = int(co2);
buffer[2] = int(temperature) >> 8;
buffer[3] = int(temperature);
buffer[4] = int(humidity) >> 8;
buffer[5] = int(humidity);
buffer[6] = int(a0_read) >> 8;
buffer[7] = int(a0_read);
buffer[8] = int(a1_read) >> 8;
buffer[9] = int(a1_read);
buffer[10] = int(a2_read) >> 8;
42
buffer[11] = int(a2_read);
modem.beginPacket();
modem.write(buffer, 12);
modem.endPacket(true);
}
```

El paquete de datos incluye las mediciones de CO₂, temperatura, humedad, CO, NH₃ y NO₂, comprimidas en un formato eficiente para minimizar el consumo de ancho de banda.

Glosario

Diseño Asistido por computador (CAD)

El diseño asistido por ordenador (CAD) consiste en el uso de programas de ordenador para crear, modificar, analizar y documentar representaciones gráficas bidimensionales o tridimensionales (2D o 3D) de objetos físicos como una alternativa a los borradores manuales y a los prototipos de producto. El CAD se utiliza mucho en los efectos especiales en los medios y en la animación por ordenador, así como en el diseño industrial y de productos.

Existen dos enfoques tradicionales principales para crear y modificar geometría CAD 3D: el modelado basado en historial (también conocido como ordenado o basado en características) o el modelado directo. En el modelado basado en historial, la estructura y el orden de las operaciones controla el modo en que los modelos reaccionan ante los cambios o las ediciones. Esto crea resultados predecibles a partir de ediciones en bocetos de operaciones subyacentes mediante cambios de cotas precisos. El modelado directo no mantiene ningún historial de operaciones ni registra cómo se construye un modelo. No existen operaciones basadas en bocetos que conformen la pieza. La edición se realiza simplemente seleccionando lo que desea modificar y modificándolo. Siemens (S.f)

Fabricación aditiva

Markforged (s.f) define fabricación aditiva como:

Es el proceso de fabricación de objetos físicos en 3D mediante diferentes técnicas, como Extrusión de filamento, deposición directa de energía, fusión de lecho de polvo, fotopolimerización, entre otros que se va construyendo capa a capa. Usualmente utilizado en el sector industrial para la prototipación, validación de diseños y creación de herramientas y utillajes.

Profundizando más en el tema, se explica como la fabricación aditiva inicia tras un proceso de datos digitales, como, por ejemplo, archivos CAD de piezas industriales u objetos 3D. Por lo tanto, para llevar a cabo la fabricación aditiva podemos concluir que se requiere de un proceso que consiste en software, hardware y materiales respectivamente.

Impresión por extrusión de filamento

Es un método de la fabricación aditiva que consiste en la utilización de un embobinado del material que se utiliza para la impresión, el cual es extruido a través de un motor y pasa por una boquilla de temperaturas elevadas, este va agregando el material derretido capa por capa sobre una mesa de impresión, dentro de los métodos de impresión por extrusión de filamento existen dos formas de impresión, siendo estos la extrusión directa, que

contiene el motor sobre la boquilla de calentado y la tipo Bowden, que tiene el motor separado del cabezal.

Filamento ASA

El ASA (Acrilonitrilo Estireno Acrilato) es un termoplástico utilizado en el ámbito de impresión de materiales debido a sus altas prestaciones. El filamento ASA tiene muy buenas características a nivel mecánico y también tiene una alta resistencia contra la radiación ejercida por los rayos del sol. DescubreArduino (S.f)

Filamento PLA

El PLA (ácido poliláctico) es un poliéster biodegradable conformado por componentes del ácido láctico, es un termoplástico con un punto de fusión entre los 150 y 160 grados celsius. Descubierta en 1932 por Wallace Carothers por medio del calentamiento del ácido láctico al vacío. Las primeras aplicaciones de este polímero fueron relacionadas al sector de biomedicina gracias a su capacidad de absorción biológicamente segura. DescubreArduino (s.f).

Filamento ABS

El ABS es un polímero termoplástico creado a partir de tres monómeros (los cuales conforman las iniciales en su nombre, acrilonitrilo estireno, butadieno), fue patentado en 1948 y posee propiedades de alto mecanizado, flexible, moldeable, durable y fuerte, otro beneficio es que no requiere de mucho tiempo de impresión. Naoum, K. (2022).

Arduino

Arduino es una empresa italiana dedicada a la elaboración de hardware y software, el cual genera un sistema de plataformas electrónicas destinadas al código abierto (open-source) que está constituida por placas básicas que conforman un sistema de alimentación, comunicación, inputs y outputs, el lenguaje de programación utilizado es basado en Processing, existen varios modelos y estos tiene la capacidad de conectar sistemas analógicos y digitales. Ingeniería Mecafenix (2017).

Arduino IDE

Arduino IDE es una aplicación utilizada para la programación de las placas de Arduino, es un software gratuito con un lenguaje de programación similar a C++, la programación se elabora a partir de la conexión de la placa base de Arduino con un ordenador, a través del programa subes tu código asignando las tareas o trabajos de tu programa en el Arduino. DescubreArduino (S.f).

Library Manager

Library manager en el programa Arduino IDE contiene colecciones de código que permiten la integración de componentes a la placa de Arduino, entre estos componentes pueden estar sensores, pantallas y otros módulos electrónicos. Estos deben de ser utilizados para garantizar la compatibilidad de los equipos que se conecten en el sistema de la placa base y así poder garantizar su correcto funcionamiento. Doig, G. (S.f).

LoRa

LoRa (radio de largo alcance) es un protocolo de conectividad a través de radiofrecuencias destinado a las IoT y otros tipos de redes. Diseñado con la intención de elaborar conexiones de largo alcance y a su vez minimizando el consumo. MOKO SMART (2019).

Este protocolo, permite la conexión de múltiples dispositivos sobre un solo gateway, facilitando la elaboración de redes fácilmente escalables y de bajo consumo energético. La seguridad de estas conexiones se lleva a cabo a través del encriptado de claves desde el servidor y también de la aplicación utilizada.

Gateway

El Gateway es un sistema dedicado a la recopilación de datos entre diferentes módulos de redes. A través de esto, permite la simplificación de la conexión a servicios de internet por un solo dispositivo. Alai Secure (S.f)

Además de ser un sistema intermediario entre redes y recopilar datos sensoriales, este puede ser utilizado como un firewall, para supervisar el tráfico dentro y fuera del servicio, por lo tanto, el Gateway ofrece soluciones de conectividad, servidores, seguridad y almacenamiento.

Este equipo informático va a ser utilizado en el proyecto para comunicar las señales enviadas por el LoRa hacia la nube donde se pueden monitorear los datos medidos de los sensores a través de una página web que se actualiza constantemente, entre otras palabras, su funcionamiento será de un sistema Gateway IoT.

ThingSpeak

Thingspeak es una plataforma IoT analítica cuyas funciones le permiten agregar, visualizar e interpretar datos que se actualizan en vivo a través de la nube. Thingspeak también permite enviar notificaciones en caso de que el usuario lo desee. (ThingSpeak, S.f)

Para este proyecto, Thingspeak funciona como una aplicación, la cual recibe datos del gateway que contienen la información recopilada por los sensores del sistema arduino MKR WAN 1310, la programación de Thingspeak es elaborada a través de Matlab junto a TTN (The Thing Network) y TTS (The Thing Stack).

Matlab

MATLAB es una plataforma de programación y cálculo numérico utilizada por millones de ingenieros y científicos para analizar datos, desarrollar algoritmos y crear modelos. Utilizando toolboxes Matlab también se pueden facilitar y ampliar el rango de funciones que este posee, centrando el desarrollo del programa o cálculo deseado en un área más específica. Matlab (S.f)

The Things Network

Es un ecosistema global basado en el internet de las cosas el cual permite la creación de redes, dispositivos y soluciones de LoRaWAN, este ecosistema a su vez es altamente colaborativo, por lo que cualquier entidad gubernamental, persona o institución pueden participar en cualquier proyecto o aportar nuevas soluciones en la plataforma. AlfaIoT-Webmaster (2022)

The Things Stack

The Things Stack es un repositorio de herramientas enfocadas en el desarrollo de aplicaciones y servidores LoRaWAN destinadas a la IoT, facilitando a desarrolladores elaborar soluciones flexibles y eficientes, la plataforma permite gestionar los dispositivos de la red y de captura de datos, la interfaz de usuario donde se visualizan los datos y el servidor al que se conectan. TheThingsIndustries (S.f)

Administrador de la energía solar

Mejor conocido como un regulador de carga solar es un componente que se encarga de controlar y dirigir la energía desde los paneles solares hasta un módulo de almacenamiento. Estos sostienen un régimen de carga constante y evitan que la energía proporcionada por los paneles solares sobrecargue y garantizan una longevidad prolongada.

Existen varios tipos de reguladores de carga, entre los más utilizados están:

- **Simple de 1 ó 2 etapas:** Regulan la batería mediante un determinado voltaje.
- **De 3 etapas o PWM:** Este tipo de controladores contienen más fases por las cuales se cuida el sistema, de esta manera garantizan un mejor cuidado para la batería.
- **MPPT:** Ofrecen una mayor eficiencia y son capaces de adaptar la energía acorde a las variaciones de luz, por ende, regulan la energía suministrada acorde a la intensidad de la luz.

Para el proyecto el sistema utilizará el DF Robot DFR0535, gracias a su sistema de MPPT (maximum Power Point Tracking y su capacidad de carga para baterías de 3.7V nos

garantiza la autonomía adecuada para que el modelo permanezca captando datos durante el ciclo completo de un día. Huawei (2023)

Sensores

Son equipos capaces de detectar cambios en su entorno y convertir esa información en señales que luego se traducen a medidas. Gracias a los datos que estos capturan y cómo estos pueden ser utilizados para aumentar la calidad, optimizar, asegurar y monitorear cada etapa de operación para los cuales son requeridos, los sensores tienen presencia en una amplia variedad de industrias como la agricultura, alimentos, automotriz, energía, electrónica, medicina, cadenas de suministros, fábricas, entre muchas otras, por lo cual se puede inferir que los sistemas sensoriales son fundamentales para el desarrollo de las industrias y nuevas tecnologías.

Existen diversos tipos de sensores, de temperatura, presión, gases, luz, proximidad, movimiento, humedad, aceleración, corriente, entre otros. Para el caso del proyecto serán utilizados sensores de temperatura, humedad y gas, ya que el sistema se enfoca en la protección contra incendios forestales. Smith G. (2024)

Sensores de Temperatura

Acorde a Smith G. (2024) los sensores están enfocados en detectar variaciones en la temperatura. Existen diversos tipos de sensores de temperatura para los cuales existen sus propias aplicaciones, cada uno tiene sus ventajas y limitaciones, entre los más utilizados están:

- **Termistor:** Semiconductores cuya resistencia varía a causa de la temperatura.
- **Termopares:** Variación de tensión por la diferencia de temperatura entre metales diferentes.
- **Sensores de temperatura infrarrojos:** Detectan la radiación emitida por objetos.
- **Termómetros bimetalicos:** Detectan la temperatura a partir de la expansión de dos metales diferentes.

Sensores de Gases

Son dispositivos orientados a la detección y medición de gases, normalmente las mediciones se llevan a cabo a través de la interacción del gas y el componente del sensor que reacciona ante los cambios, procesando señales eléctricas o digitales. Entre los sensores con mayor presencia en las industrias están los semiconductores, catalíticos, infrarrojos, ópticos y electroquímicos, cada uno con una aplicación distinta acorde a su funcionamiento. Los métodos de captura de estos sensores son:

- **Electroquímicos:** Miden la concentración de gases a través de una reacción química.
- **Infrarrojos:** Utilizadas para detectar la absorción de luz infrarroja emitida por los gases.

- **Catalíticos:** Sensores mayoritariamente enfocados para gases generados por combustibles, funcionan a través de la oxidación de un catalizador.
- **Semiconductores:** Miden el cambio de resistencia que hay cuando un gas entra en contacto con un material semiconductor.
- **Óxidos metálicos:** Miden la conductividad de materiales metálicos, los cuales varían al interactuar con gases.

Sensores de Humedad

Un sensor de humedad es un aparato que permite detectar y controlar el porcentaje de agua del aire o de cualquier material o superficie. Su nombre técnico es higrómetro y resulta un elemento indispensable en meteorología. Sin embargo, cada vez es incluido con mayor asiduidad en los sistemas de climatización domésticos y comerciales. Suele medir también la temperatura ya que son dos valores necesarios para calcular la sensación térmica. Estos dispositivos, generalmente, transforman las magnitudes de humedad detectadas en una señal eléctrica de entre 4 y 20mA. (El Confidencial, 2024)

I2C

De acuerdo a Mallari (s.f) el protocolo I2C (Inter-Integrated Circuit) es un estándar de comunicación en serie que permite la transferencia de datos entre dispositivos.

Por otro lado, el I2C utiliza solo dos cables: una línea de reloj serial (SCL) y una línea de datos serial (SDA). Este protocolo es ampliamente utilizado en placas Arduino para conectar varios dispositivos periféricos, como sensores y pantallas, con una cantidad mínima de cables (Zambetti y Hylén, 2024)

En el contexto de Arduino, el I2C es especialmente útil debido a su simplicidad y la capacidad de conectar varios dispositivos utilizando los mismos dos hilos, lo que facilita el desarrollo de proyectos complejos con múltiples componentes interactivos. El protocolo también permite la comunicación bidireccional y es capaz de operar en diferentes velocidades de transmisión de datos, adaptándose a diversas necesidades de diseño electrónico.

Pull-Up

Arduino (2023) indica que pull-up se refiere a una configuración de resistencias conectadas entre una línea de señal (como una entrada digital) y una fuente de voltaje positivo. Esta configuración asegura que la línea de señal tenga un estado definido alto cuando no hay ningún dispositivo activo en la línea, previniendo señales erráticas o flotantes.

En otras palabras, las resistencias pull-up son utilizadas para mantener una línea en un estado alto por defecto, a menos que se aplique una señal que la lleve a un estado bajo (0V o

"low"). Esto es particularmente útil en circuitos donde el estado predeterminado debe ser conocido y consistente.

Por ejemplo, si tienes un botón conectado a una entrada digital en tu Arduino, puedes usar una resistencia pull-up para asegurar que la entrada sea "high" cuando el botón no esté presionado y "low" cuando se presione.

Cambio climático

El cambio climático se refiere a los cambios a largo plazo de las temperaturas y los patrones climáticos. Estos cambios pueden ser naturales, debido a variaciones en la actividad solar o erupciones volcánicas grandes. La quema de combustibles fósiles genera emisiones de gases de efecto invernadero que actúan como una manta que envuelve a la Tierra, atrapando el calor del sol y elevando las temperaturas. Las emisiones principales de gases de efecto invernadero que provocan el cambio climático son el dióxido de carbono y el metano. (ONU, s.f)

Efecto invernadero

Caballero (2023) destaca que el efecto invernadero es un fenómeno natural que ayuda a mantener el nivel medio de temperatura en la superficie del planeta. Eso es esencial para la vida en la Tierra porque, en ausencia de este fenómeno, la temperatura media sería de 18°C bajo cero en lugar de la media actual de 15°C.

Los Gases de Efecto Invernadero son gases presentes de forma natural en la atmósfera. Absorben algunos de los rayos del sol y luego los redistribuyen en forma de radiación. Su creciente concentración en la atmósfera, debido a las actividades humanas, contribuye al calentamiento global. Como su nombre lo indica, estos gases son la principal causa del efecto invernadero. Los gases responsables del efecto invernadero son los siguientes: Vapor de agua (H₂O), Dióxido de carbono (CO₂), Metano (CH₄), Óxido nitroso (N₂O), Ozono (O₃).

Radiación solar

La radiación solar es una energía generada a partir de una pérdida de masa generada por una serie de reacciones de fusión nuclear. Esta energía es transmitida a través del espacio en forma de partículas como fotones y de radiación. (Espinoza, s.f)

Energía Renovable

La ONU (s.f) define energía renovable como un tipo de energías derivadas de fuentes naturales que llegan a reponerse más rápido de lo que pueden consumirse. Un ejemplo de estas fuentes es, por ejemplo, la luz solar y el viento; estas fuentes se renuevan continuamente. Las fuentes de energía renovable abundan y las encontramos en cualquier entorno.

Panel Solar

Los paneles solares son el intermediario que hace que la luz solar nos sirva de energía. Su diseño es simple, muy eficaz y permite el autoconsumo, lo que fomenta la sostenibilidad. En un futuro próximo, los paneles generarán electricidad incluso de noche. (BBVA, 2025).

Por otro lado, Celsia (2018) destaca que, en los paneles solares, cuando hay luz solar, una célula solar se comporta casi como una batería. La luz solar recibida separa los electrones de modo que forman una capa de carga positiva y una de carga negativa en la célula solar; esta diferencia de potencial genera una corriente eléctrica.

Normativas ISO

La organización ISO (s.f) define las normativas ISO como el resultado de un acuerdo internacional entre expertos. Piense en ellas como unas fórmulas que describen la mejor manera de hacer algo.

Puede tratarse de la fabricación de un producto, la gestión de un proceso, la prestación de un servicio o el suministro de materiales: las normas abarcan una enorme variedad de actividades.

Las normas representan los conocimientos de personas expertas en su materia y que conocen las necesidades de las empresas a las que representan: fabricantes, vendedores, compradores, clientes, asociaciones comerciales, usuarios o reguladores.

Normativa ISO 4892

ISO (s.f) también nos define la norma ISO 4892, es un estándar internacional que establece los procedimientos para probar la resistencia de los materiales a la intemperie. Esta norma se aplica a materiales como polímeros, textiles, recubrimientos, entre otros.

Clasificación de protección IP

Una clasificación IP, o grado de Protección contra Ingresos, es un código de dos dígitos que especifica el nivel de protección de un dispositivo frente a la entrada de polvo, agua y otros elementos externos. Estas clasificaciones se aplican comúnmente a carcasas de equipos eléctricos y mecánicos para garantizar su resistencia en diferentes entornos. (Proctor, 2021)

Caja Estanca

Una caja estanca es un tipo de caja eléctrica de derivación o registro diseñada para ser instalada en superficie, es decir, no empotrada. Estas cajas están fabricadas en material termoplástico altamente resistente, como el policarbonato, el plástico ABS o el acrílico, lo

que las hace ideales para su uso en exteriores, donde están expuestas a condiciones climáticas adversas.

La principal función de las cajas de plástico estancas es proteger las conexiones eléctricas, como empalmes y derivaciones, evitando la entrada de agua, humedad, polvo y otros agentes externos que podrían dañar los componentes eléctricos y comprometer la seguridad de la instalación.

Estación Meteorológica

Una estación meteorológica es un dispositivo encargado de recopilar datos de los factores más influyentes de las condiciones atmosféricas y clima de una determinada región, estos pueden identificar la temperatura, humedad del aire, velocidad y dirección del viento, presión atmosférica, precipitación, radiación solar, gases y sus respectivas variaciones facilitando la predicción de futuros comportamientos y posibles riesgos.