

Construcción de un sistema monitoreo de variables agro-técnicas basado en sensores de bajo costo y tecnología IoT, que permita la transmisión inalámbrica y adquisición de datos en un servidor, con el propósito de integrarse a un sistema de riego aplicando principios agricultura 4.0

Hernando Alfonso Talero Sarmiento, Juan Pablo Vargas Murcia

Trabajo de grado para optar el título de ingeniero mecatrónico

Director

Deisy Carolina Páez Casas

Magister en ingeniería electrónica

Universidad Santo Tomás, Bucaramanga

División de Ingenierías y Arquitectura

Facultad de Ingeniería Mecatrónica

2024

Contenido

	Introducción.....	8
1	Justificación	11
2	Marco de referencia.....	12
	2.1. Marco teórico	12
	2.1.1 Redes de sensores inalámbricos (WSN):	12
	2.1.2 Parámetros ambientales de una plantación de Theobroma Cacao.....	13
	2.1.3 Conversor DC-DC	14
	2.1.4 Panel fotovoltaico	14
	2.2 Marco conceptual	15
	2.3 Marco legal	16
	2.4 Marco tecnológico y científico (estado del arte).....	17
	2.5 Condiciones iniciales del proyecto	18
3	Criterios de diseño.....	18
	3.1 Criterios de diseño	19
	3.2 Dispositivo de medición	19
	3.2.1 Variables a monitorear	20
	3.2.2 Alimentación energética del dispositivo:.....	20
	3.2.3 Comunicación del dispositivo y el nodo central.....	21
	3.2.4 Características físicas.....	21
	3.2.5 Sistema de monitoreo.....	22
	3.3 Descripción de etapas y tareas	23
	3.3.1 Lectura de sensores.....	23
	3.3.2 Diseño y fabricación de PCB	23
	3.3.3 Diseño y fabricación de piezas 3D	23

3.3.4	Prueba de Lectura y ensamblaje	25
3.3.5	Pruebas de campo y consumo energético	26
3.3.6	Pruebas de comunicación.....	26
3.3.7	Sistema de telemetría	27
3.3.8	Video demostrativo.....	27
3.4	Descripción de los productos finales	27
3.4.1	Prototipo de nodo de medición.....	28
3.4.2	Video explicación y guía rápida	32
3.5	Conclusión del capítulo	32
4	Resultados y discusiones	35
4.1	Diseño	35
4.2	Simulaciones-pruebas- caracterización	37
4.3	Resultados	40
4.4	Discusión de resultados	41
5	Conclusiones	41
6	Recomendaciones.....	42
6.1	Mejoras estructurales	42
6.2	Mejoras electrónicas	43
6.3	Mejoras operativas.....	43
	Referencias	44
	Apéndice	46

Lista de Figuras

Figura 1. <i>Metodología.....</i>	19
Figura 2. <i>Esquemático conexiones ESP32</i>	20
Figura 3. <i>Diseño conceptual nodo de medición</i>	21
Figura 4. <i>Diseño conceptual nodo telemetría</i>	22
Figura 5. <i>Piezas diseñadas e impresas</i>	25
Figura 6. <i>Trama de datos</i>	27
Figura 7. <i>Diagrama general del dispositivo.....</i>	28
Figura 8. <i>Diagrama de capsula de electrónica</i>	30
Figura 9. <i>Diagrama de capsula de electrónica.</i>	31
Figura 10. <i>Explicación trama de datos luxómetro.....</i>	33
Figura 11. <i>Ilustración osciloscopio con el protocolo I2C.....</i>	33
Figura 12. <i>Plano referente a porta piezas.....</i>	35
Figura 13. <i>Plano referencia porta sensores.</i>	36
Figura 14. <i>Plano referencia tapa sensor HD23</i>	36
Figura 15. <i>Plano referencia tapa superior tubo.....</i>	37
Figura 16. <i>Cotización de componentes</i>	39
Figura 17. <i>Adquisición de datos</i>	40

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Elementos diagrama general del dispositivo.</i>	29
Tabla 2. <i>Elementos diagrama de capsula de electrónica.</i>	30
Tabla 3. <i>Elementos diagrama de capsula electrónica.</i>	31
Tabla 4. <i>Rangos comparativos mediciones luxómetro.</i>	34
Tabla 5. <i>Análisis de prototipado 3D.</i>	37
Tabla 6. <i>Costos</i>	37
Tabla 7. <i>Costos totales</i>	39

Resumen

Este proyecto investigativo nace con ayuda de la convocatoria FODEIN de la Universidad Santo Tomas, la cual promueve el desarrollo de investigación e innovación en la comunidad Tomasina, a partir de esta oportunidad se desarrolla el trabajo teniendo en cuenta la problemática que existe alrededor de la escasa tecnificación en el campo colombiano y el desperdicio del recurso hídrico, debido a ello se buscó implementar un sistema de monitoreo de variables agro-técnicas con un enfoque en los cultivos de Tehobroma Cacao y el uso de sensores de bajo costo y tecnología IoT, esto con el propósito de integrarse en un sistema de riego; para ello se tuvo en cuenta un prototipo de dispositivo 1.0 diseñado por parte de los autores, este fue rediseñado optimizando procesos y adicionando sensores que brindaran información útil para el sistema. Para la resolución del proyecto y la comprobación del mismo se realizaron pruebas de campo en Piedecuesta, Santander, más específicamente en cultivos agrícolas pertenecientes a la institución, además de a campo abierto y laboratorio; Estas pruebas nos dieron resultados positivos demostrando el desarrollo significativo que tiene la implementación de estos sistemas en un país en el cual la agricultura es un pilar significativo para la economía y sostenibilidad del mismo y creando una oportunidad de crecimiento tecnológico e investigativo.

Palabras clave: agricultura 4.0, Instrumentación, LoRa, Sistema de monitoreo

Abstract

This research project was initiated with the support of the FODEIN call from Santo Tomás University, which promotes the development of Tomasina research and innovation. Building upon this opportunity, the work was carried out, taking into account the issues surrounding the limited technological advancement in the Colombian agricultural sector and the wastage of water resources. Consequently, the goal was to implement a monitoring system for agro-technical variables, with a focus on *Theobroma cacao* crops, utilizing low-cost sensors and IoT technology, with the aim of integrating them into an irrigation system. For this purpose, a prototype of the 1.0 device designed by the authors was considered. It was redesigned to optimize processes and add sensors that would provide useful information for the system. To resolve and validate the project, field tests were conducted in Piedecuesta, Santander, specifically in agricultural crops owned by the institution, as well as in open fields and a laboratory. These tests yielded positive results, demonstrating the considerable progress that the implementation of these systems can bring to a country where agriculture is a significant pillar of the economy and sustainability, while also creating opportunities for technological and research growth.

Keywords: agriculture 4.0, Instrumentation, LoRa, Monitoring system

Introducción

Motivación y formulación del problema

Partiendo de la premisa de cómo la implementación de la agricultura 4.0 puede contribuir al desarrollo de un país, decidimos explorar los aspectos en los que se puede observar mejoras después de la adopción de tecnologías en la agricultura. Para ello, realizamos una investigación exhaustiva, tomando como ejemplos a países como Ecuador, Colombia y México. En estos países, identificamos la implementación de sistemas de medición, automatización, análisis de Big Data, prácticas de agricultura sostenible, entre otros avances; estos desarrollos tecnológicos ofrecen ventajas significativas tanto para los agricultores como para el país en su conjunto.

Una de las ventajas más notables para los agricultores es la gestión más eficiente de los recursos hídricos, esto se logra a través de un mejor control y conocimiento de las condiciones de los cultivos, así como la retroalimentación constante sobre las condiciones climáticas, lo que permite a los agricultores tomar decisiones informadas e incluso implementar sistemas de agricultura autónoma, en los cuales el agricultor pasa a desempeñar el rol de supervisor de sus cultivos; además, la agricultura 4.0 mejora la productividad de los cultivos al proporcionar información detallada sobre su cuidado y estado a través de sistemas de medición avanzados.

La implementación de la agricultura 4.0 impulsa el sector agrícola a un nivel superior, generando un valor agregado en este sector. Sin embargo, para lograr un verdadero desarrollo en este sector, es necesario combinar esta inversión con programas de capacitación, educación y financiamiento accesibles. Solo a través de una integración generalizada y

natural, que no beneficie exclusivamente a las grandes industrias, se pueden alcanzar los beneficios mencionados anteriormente.

Para complementar este enfoque, es relevante citar la frase del escritor León Tolstói, que señala: "La riqueza de un país debe aumentar de manera equitativa, sin permitir que otras fuentes de riqueza superen a la agricultura". Esta cita resalta la importancia de mantener un equilibrio y dar prioridad a la agricultura como motor de desarrollo económico y sostenibilidad en un país.

Finalidad

Objetivo general

Construir un sistema monitoreo de variables agro-técnicas basado en sensores de bajo costo y tecnología IoT, que permita la transmisión inalámbrica y adquisición de datos en un servidor, con el propósito de integrarse a un sistema de riego aplicando principios agricultura 4.0

Objetivos específicos

- Rediseñar el prototipo 1.0 a partir de un análisis de requerimientos con el fin de cumplir con la protección IP54, optimizar el circuito de carga e incluir la lectura de parámetros como: humedad relativa, temperatura ambiente, intensidad lumínica y precipitación.
- Construir una red con seis prototipos de medición estableciendo la comunicación con módulos GSM y/o LoRA centralizados por un sistema embebido ESP32 para la gestión de almacenamiento de datos.

- Construir una base de datos con las mediciones de las variables agro-técnicas de las estaciones de telemetría para posterior análisis.
- Validar la red de telemetría en el cultivo de Theobroma Cacao haciendo pruebas de carga, pruebas de conexión y almacenamiento de datos con el fin de establecer el cumplimiento de los requisitos técnicos.

Aportes del trabajo

Uno de los principales lineamientos del presente proyecto es permitir la mejora de las condiciones de producción del cultivo de Theobroma Cacao, pero no es el único fin del proyecto; se desea que la implementación del mismo sea práctico y factible, en especial para las personas vinculadas al sector agrícola. Se sabe que la administración del recurso hídrico es esencial en la producción agropecuaria, siendo la práctica del riego en los cultivos el factor que genera mayor desperdicio de agua dulce, con un sistema que permita monitorear el estado del cultivo se puede conocer la condición del mismo y con ello poder determinar la cantidad de irrigación necesaria para una producción óptima. Al ser un sistema de bajo costo que permita a cualquier persona acceder a estos servicios se cuenta con ventajas como, fácil mantenimiento, independencia a la obsolescencia programada, facilidad de remplazo de componentes y fácil visualización de parámetros agro-técnicos.

Organización del documento

A continuación, se hará referencia a investigaciones que se realizaron previamente por otros autores con los cuales se logra sembrar las bases para el proyecto y entender qué aspectos se podían mejorar para contribuir a este propósito. Después de haber realizado el estado del arte se diseñaron los pasos a seguir para llevar a cabo el proyecto de investigación

e identificando los objetivos del proyecto se procede a delinear los diseños conceptuales y todo lo que conlleva la construcción de los prototipos; a continuación se empezaran a mostrar los resultados logrados en esta planeación y las conclusiones que se obtuvieron gracias al desarrollo implementado; finalmente se encuentra un apartado de anexos en los cuales se podrá observar de forma más detallada los procedimientos y procesos necesarios para la ejecución del proyecto.

1 Justificación

Se conoce que el recurso hídrico es fundamental para supervivencia de nuestra especie, y lastimosamente a lo largo de los últimos años se ha evidenciado que el agua dulce y aprovechable que representa cerca del 0.007% está escanciando, Colombia por su parte cuenta con un estimado de 2.132 km³ de reserva hídrica posicionándolo como uno de los países que mejor hidrografía posee a nivel mundial, información extraída de la editorial DATOSMARCO [1]. Pero, por el hecho de poseer unas de las mejores reservas no se puede acudir al despilfarro de este preciado bien natural, con el paso del tiempo el aumento de la población y a su vez el de la contaminación que esta genera, repercute severamente en los acuíferos disponibles en el país, sin embargo, el crecimiento de la demografía genera otras necesidades y una de ellas es el aumento de la producción de alimentos, según la revista EL PORTAFOLIO [2], el sector agrícola en Colombia representa cerca del 17% de la fuerza laboral, es decir cerca de 3'095.000 personas depende de esta actividad económica y deben hacer frente a satisfacer la necesidad alimentaria de más de 51 millones de colombianos y cerca de los 2 millones de extranjeros que viven en el territorio nacional. Teniendo en cuenta lo anterior, se hace necesario que el país mejore en los sistemas de producción alimentaria, especialmente hablando en el sector agrícola, es por ello que el uso de herramientas

tecnológicas y la implementación de la agricultura 4.0 puede dar solución a la problemática planteada.

Pero, al momento de implementar un sistema de innovación tecnológica, se puede presentar ciertos rechazos por parte de los agricultores, y esto se puede atribuir a la falta de conocimiento y las ventajas que puede proporcionar la Industria agrícola 4.0, y unas de las percepciones que tiene los pequeños y medianos productores es que estos sistemas tienen un costo muy elevado, y en parte tienen razón, porque la mayoría de los sistemas que suelen implementarse están dirigidos a grandes productores. Al momento de plantear un desarrollo a bajo costo y facilidad de mantenimiento se busca romper con el paradigma de que la mejora tecnológica en el sector agropecuario sólo lo puede hacer quienes tengan el capital suficiente para invertir, y que en realidad no es un lujo, es una necesidad que repercute favorablemente en el uso eficiente del recurso hídrico y de la economía.

2 Marco de referencia

2.1. Marco teórico

2.1.1 *Redes de sensores inalámbricos (WSN)*

Una WSN, o Red de Sensores Inalámbricos, se caracteriza por incluir un extenso conjunto de nodos sensores de bajo consumo de energía y coste reducido, equipados con una variedad de recursos multifuncionales, pero cuyas capacidades se ven limitadas por la propia naturaleza de los nodos sensores. Estos nodos operan durante prolongados periodos de tiempo y están diseñados con la flexibilidad necesaria para soportar condiciones ambientales adversas [3]. Una WSN consiste en una red de dispositivos inalámbricos inteligentes que se interconectan, despliegan y configuran para obtener información de sensores específicos en

un entorno dado. Estos nodos sensores se encargan de la medición de una amplia variedad de fenómenos físicos y, posteriormente, procesan y recopilan los datos, comunicándose ya sea entre sí o con una unidad centralizada encargada del procesamiento de información. Entre las capacidades de estos nodos se incluye la detección de agentes bioquímicos, proximidad, vibración, fuerza, aceleración, velocidad, posición, humedad, temperatura, presión y movimiento, además de tener la habilidad de procesar datos de vídeo, voz y texto [4].

Una WSN se compone de uno o varios sensores inalámbricos que funcionan con alimentación por batería, lo que implica que tienen un suministro de energía limitado. Cada nodo sensor dentro de la red se encarga de recopilar y detectar información ambiental, como la humedad, temperatura, nivel de luminosidad, etc., en tiempo real. Asimismo, estos nodos recolectan datos provenientes de diversos objetos que se encuentren en el área bajo vigilancia.

2.1.2 Parámetros ambientales de una plantación de Theobroma Cacao

Los parámetros ambientales, como la temperatura, humedad, insolación y luminosidad, desempeñan un papel crucial en el crecimiento y producción del cacao. Para lograr un aumento satisfactorio en la producción de cacao, es esencial destacar que depende en gran medida de la relación entre la temperatura y la humedad del lugar [5]. Estas dos variables son de suma importancia, ya que el agua y el aire comparten los espacios porosos del suelo y afectan la disponibilidad de oxígeno, lo cual influye en el desarrollo de las raíces del cacao. Un suelo adecuadamente aireado es esencial para su crecimiento [6]. Además, diversos estudios realizados expresan rangos de distancias en las cuales se sugiere hacer el muestreo de algunas de estas variables agro-técnicas, esta profundidad se refiere en un rango de 40 a 55 cm.

La influencia de los parámetros ambientales en los cultivos de cacao no solo puede impactar la producción, sino también los costos relacionados con ella. Existen factores determinantes que influyen directamente en los precios internacionales del cacao y están vinculados a la oferta y la demanda. Estos factores incluyen condiciones climáticas adversas para el cultivo, las expectativas de los productores y clientes sobre el comportamiento del mercado del cacao, los niveles de inventario de las organizaciones consumidoras y las demandas del mercado (Quintero y Díaz, 2004).

En resumen, el cultivo y el rendimiento del cacao están estrechamente relacionados con las condiciones ambientales, lo que destaca la importancia de crear un entorno propicio para que los factores físicos no afecten su crecimiento.

2.1.3 *Convertor DC-DC*

se centra en los aspectos técnicos de los sistemas de conversión de energía de corriente continua a corriente continua. Estos sistemas son cruciales en la electrónica de potencia y se utilizan en aplicaciones donde es necesario regular y controlar la tensión de salida de una fuente de alimentación o convertidor DC-DC.

2.1.4 *Panel fotovoltaico*

Es un dispositivo semiconductor que convierte la energía luminosa en electricidad mediante el efecto fotovoltaico. Está compuesto por células fotovoltaicas, generalmente fabricadas de silicio cristalino, que absorben la radiación solar y generan una corriente eléctrica cuando los fotones de la luz inciden sobre ellas [7]. La electricidad producida por estas células es de corriente continua (DC).

Los paneles fotovoltaicos se utilizan comúnmente en sistemas de energía solar para la generación de electricidad. Cuando se conectan en serie o en paralelo en un conjunto llamado "módulo solar", se pueden proporcionar niveles de tensión y corriente adecuados para aplicaciones diversas, como alimentar una vivienda, cargar baterías, o suministrar energía a dispositivos y equipos eléctricos. Los paneles fotovoltaicos se instalan generalmente en techos, estructuras o campos solares para captar la luz solar y convertirla en electricidad utilizable.

2.2 Marco conceptual

Agricultura 4.0: una evolución de la agricultura que utiliza tecnologías de la información y la comunicación (TIC) avanzadas para mejorar la eficiencia, la productividad y la sostenibilidad en la producción agrícola.

Big Data: se refiere a conjuntos de datos extremadamente grandes y complejos que superan la capacidad de las herramientas de procesamiento de datos tradicionales para gestionarlos y analizarlos de manera efectiva.

ESP32: es un microcontrolador de bajo costo y bajo consumo de energía que integra capacidades de conectividad WiFi y Bluetooth; se ha convertido en una plataforma popular para proyectos de IoT, desarrollo de hardware y aplicaciones embebidas.

Humedad relativa: se define como la relación entre la cantidad de vapor de agua presente en el aire en un momento dado y la cantidad máxima de vapor de agua que el aire podría contener a una temperatura y presión dadas.

IoT: es un concepto tecnológico que se refiere a la interconexión de dispositivos y objetos cotidianos a través de Internet, permitiendo que estos dispositivos recopilen y compartan datos y realicen acciones interconectadas.

LoRa: es una tecnología de comunicación inalámbrica de largo alcance y baja potencia diseñada para la transmisión de datos a largas distancias con un bajo consumo de energía. LoRa se utiliza principalmente en aplicaciones de Internet de las cosas (IoT).

Theobroma: es un género de plantas que incluye varias especies de árboles nativos de América tropical, especialmente de las regiones de América Central y del Sur, la especie más conocida de este género es *Theobroma cacao*.

PCB: se refiere a "Printed Circuit Board" en inglés, lo que en español se traduce como "Placa de Circuito Impreso"; una PCB es un elemento esencial en la electrónica que se utiliza para conectar y montar componentes electrónicos en un sustrato aislante, generalmente de material compuesto de resina y fibra de vidrio.

2.3 Marco legal

Se considera la Norma Internacional CEI 60529 Degrees of Protection [8, p. 60529], en la que se establecen los grados de protección para los contenedores de equipos eléctricos y electrónicos que pueden ser afectados por fenómenos externos o ambientales. Se establece una clasificación de acuerdo con el contenido y del nivel de protección requerida. Así, los componentes que están dentro de estos contenedores están protegidos en contra del polvo y el agua, y son etiquetados de forma alfanumérica; esta etiqueta se coloca de acuerdo con el nivel de protección que necesite.

La [9, p. 105] de la Agencia Nacional del Espectro (ANE) no hace una referencia explícita al término "IoT" como una aplicación permitida para el uso del espectro en modalidad de uso libre. No obstante, en esta regulación se enumeran aplicaciones autorizadas que abarcan una amplia gama de tecnologías, incluyendo las relacionadas con el Internet de las Cosas (IoT). Un ejemplo ilustrativo es la categoría de "Dispositivos de salto en frecuencia,

modulación digital o híbridos", que establece condiciones técnicas y operativas para la utilización del espectro en la banda de frecuencia de 915 - 928 MHz. Esta categoría engloba tecnologías como LoRa y SIGFOX, entre otras, que son relevantes para implementaciones de IoT.

2.4 Marco tecnológico y científico (estado del arte)

En el artículo “Design of a Wireless Sensor Network for Optimal Deployment of Sensor Nodes in a Cocoa Crop” [10], aborda aspectos esenciales del uso de sensores inalámbricos en la agricultura, centrándose en el diseño de una red para monitorear eficientemente un cultivo de cacao en Colombia. Se exploran conceptos como la zona de Fresnel, topología Cluster-tree, entre otros, sin embargo, este diseño cuenta con un método de comunicación diferente además de que no adiciona una alimentación autónoma.

El documento “Diseño e implementación de un cargador de baterías controlado por un algoritmo de MPPT y alimentado por paneles solares” [7] cuenta con la detallada implementación de la energía solar transformada por medio de paneles solares y con ello construyendo un cargador de baterías en donde se le da una gran importancia a los algoritmos de MPPT que hacen referencia a la eficiencia de conversión de energía; además toca temas importantes como lo es la conversión DC-DC.

El proyecto de titulación “Diseño e implementación de un prototipo WSN para el control y monitoreo de los parámetros ambientales para el cultivo de cacao de la finca Elizabeth ubicada en el cantón naranjal” [3]. Está en el campo de la instrumentación y pretende controlar mediante el monitoreo de parámetros ambientales en un cultivo de cacao, este también implementa un prototipo WSN, también comparte el sistema de comunicación

siento este el Lora y menciona los temas importantes para realizar la comunicación, pero encontramos un diferencial para enfocarnos en la alimentación del dispositivo.

2.5 Condiciones iniciales del proyecto

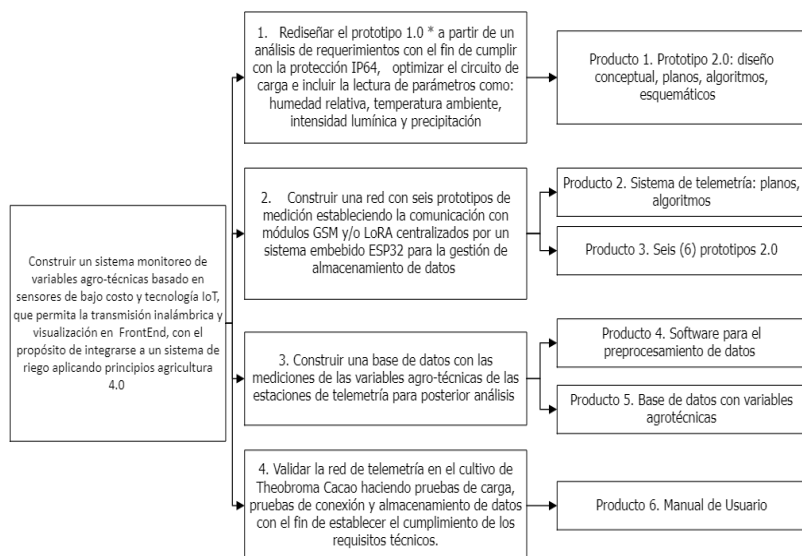
Con los resultados obtenidos a partir del semillero de investigación [7] de la universidad Santo Tomas Seccional Bucaramanga en el año 2022, cuyo proyecto lleva el título de Dispositivos IoT necesarios para obtener un muestreo representativo de la temperatura y porcentaje de humedad del suelo en un cultivo agrícola, se tomó de referencia apartados del diseño conceptual del dispositivo. Otro aspecto importante con el que se iniciaba el proyecto es la convocatoria FODEIN, que nos brindó el presupuesto necesario para realizar el proyecto económicamente hablando.

3 Criterios de diseño

Tanto el desarrollo del sistema de telemetría como la construcción de cada uno de los nodos de medición se optó por una metodología de estructura de desglose de trabajo-EDT. Esto con el fin de identificar cada uno de los entregables que se requieren para dar cumplimiento con los objetivos planteados con anterioridad. Las herramientas tecnológicas para desarrollar el proyecto en sí van desde modelamientos, simulación y construcción. El uso de software como SolidWorks, que cuentan con licencia por parte de la Universidad Santo Tomás-Seccional Bucaramanga, fue fundamental para poder comprender el funcionamiento y disposición de elementos. Los diseños electrónicos y archivos Gerber que permitieron integrar los módulos de medición se realizaron por medio del Software abierto KiCad. Y en cuanto a la construcción estructural se hizo uso de una Impresora 3D de la marca EnderV3, además del software Creality Slicer para generar los respectivos gcode. La

programación del módulo Heltec LoRa-V3 se realizó con el IDE de Arduino y las Librerías correspondientes encontradas en Github

Figura 1. Metodología



3.1 Criterios de diseño

Teniendo en cuenta la EDT del proyecto se puede apreciar que existen dos líneas de trabajo; El Dispositivo de medición o también conocido como Nodo de medición y el Sistema de monitoreo o también conocido como Sistema de telemetría.

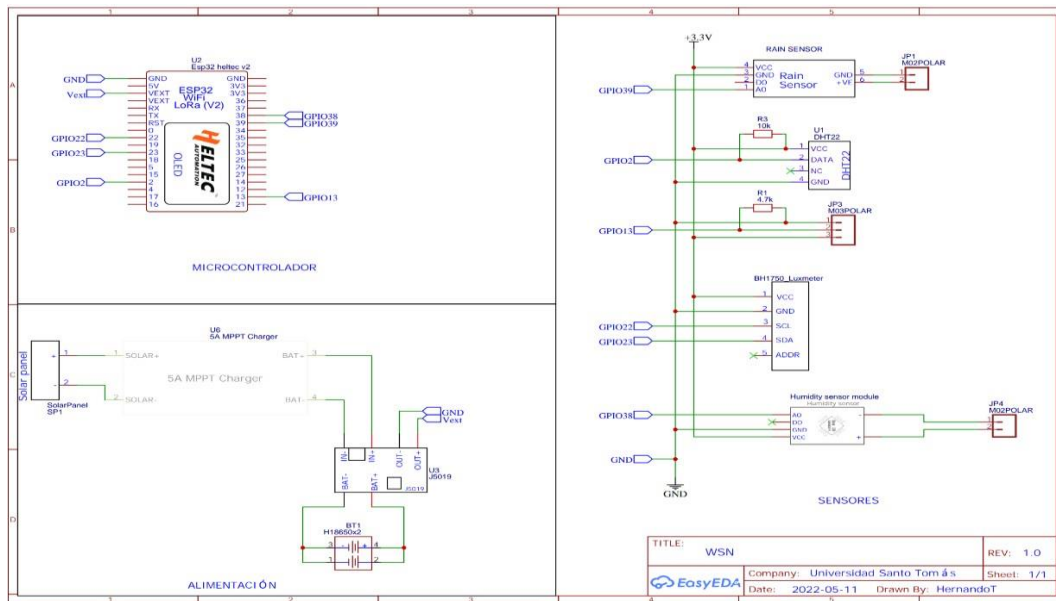
3.2 Dispositivo de medición

Para la construcción del primer prototipo es necesario tener en cuenta qué criterios son importantes:

3.2.1 Variables a monitorear

Los parámetros que se tenían en proyecto antecesor era las de humedad del suelo-Higrometro (sensor analógico HD-38) y temperatura del suelo (sensor Digital Ds18b20, protocolo OneWire). Además, se integraron nuevas variables como Intensidad Lumínica (sensor digital BH1750-protocolo I2C), humedad relativa y temperatura ambiente (Sensor Digital DHT22, protocolo OneWire), Panel de Lluvia (sensor analógico) y medición del voltaje de la batería.

Figura 2. Esquemático conexiones ESP32



Tomado de Software EasyEDA.

3.2.2 Alimentación energética del dispositivo:

Para garantizar el funcionamiento del Nodo de medición, se implementó un sistema fotovoltaico con un panel de 20W y un controlador MTTP 5A, que alimentan un arreglo de baterías (ion-Litio 18650 de 3.7v) en paralelo que posteriormente se conectan al módulo de carga de baterías.

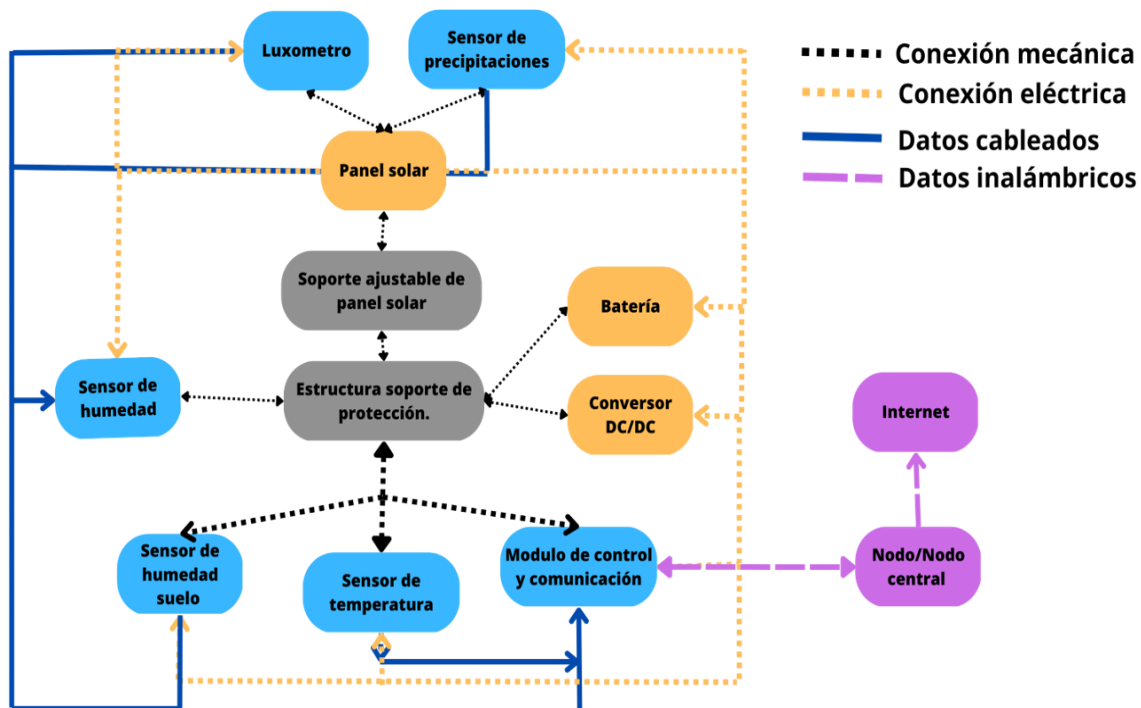
3.2.3 Comunicación del dispositivo y el nodo central

La tarjeta de desarrollo que se implementó tanto para los nodos de medición como para la recepción de datos es el Heltec LoRa-V3, y como su nombre indica, este módulo cuenta con comunicación LoRa que permite la transmisión de datos a un largo alcance.

3.2.4 Características físicas

teniendo en cuenta que el dispositivo se encontrará en un cultivo a la intemperie se busca que su diseño cuente con una protección cercana a los estándares de IP54, protección contra partículas de polvo inferiores a 1mm de diámetro y salpicaduras de agua en todas las direcciones; también, el prototipo debe soportar golpes y caídas a una altura no superior a 1 metro.

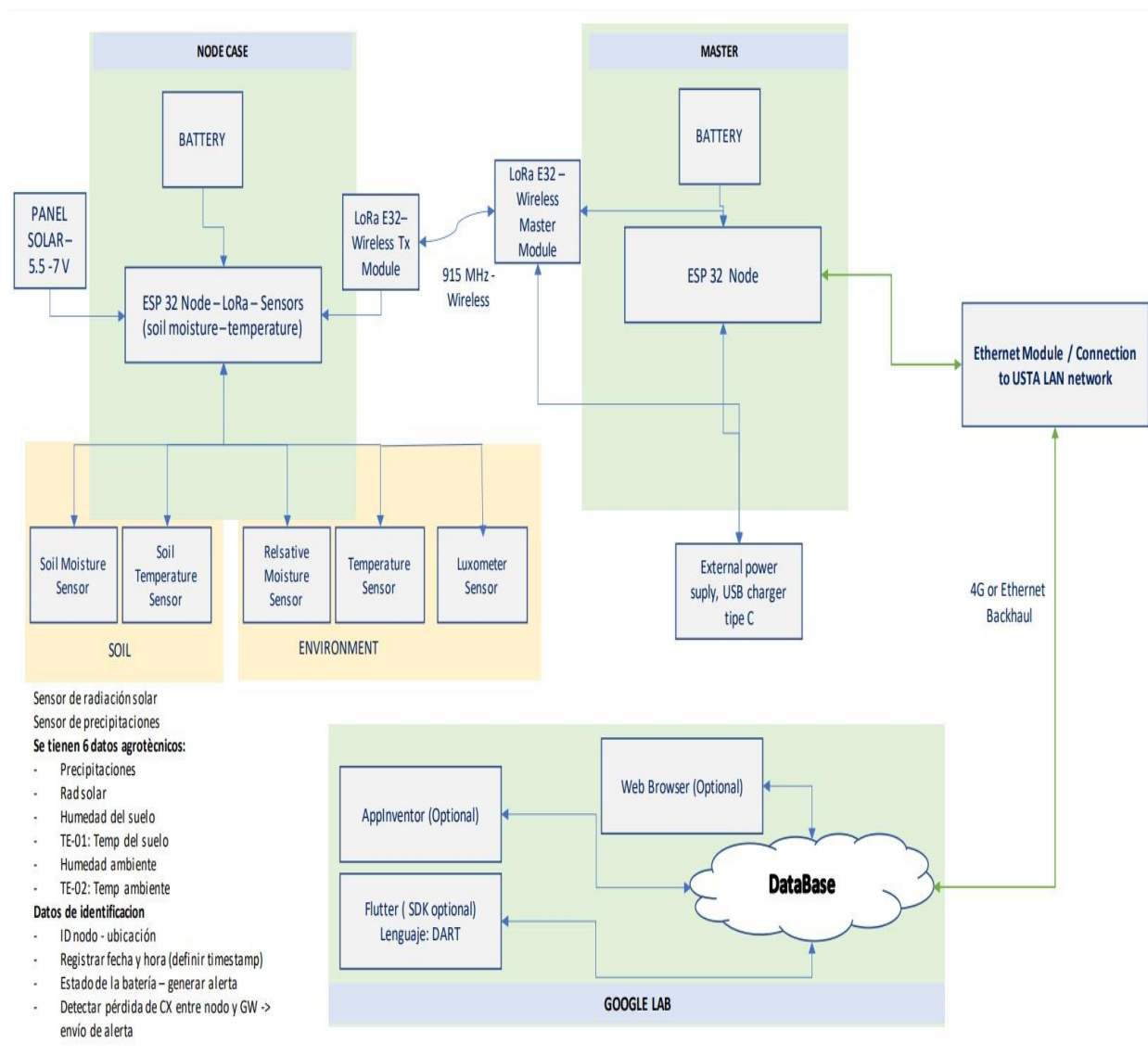
Figura 3. Diseño conceptual nodo de medición



3.2.5 Sistema de monitoreo

El sistema de monitoreo depende de los diferentes nodos de medición y nodo central o también conocido como Maestro; el maestro tiene la función de recopilar todos los datos adquiridos por cada uno de los dispositivos de medición y posteriormente se podrá vincular esta información a una Base de Datos Relacionada en la cual se podrá acceder a un histórico y una representación visual e intuitiva para el usuario.

Figura 4. Diseño conceptual nodo telemetría



3.3 Descripción de etapas y tareas

3.3.1 *Lectura de sensores*

En esta etapa, aparte de identificar los parámetros y variables a medir, también se hace prueba del correcto funcionamiento de cada sensor, es por ello que al final se integran en el módulo Heltec LoRA-V3. Durante el desarrollo de la etapa, de forma paralela se hace la gestión de compra de componentes Electrónicos. (Fotos de modulo heltec en protoboard).

3.3.2 *Diseño y fabricación de PCB*

Teniendo el funcionamiento del sistema sensorial, se procede a realizar un diagrama esquemático de conexiones con el software KiCad, además en él se debe integrar los sistemas de carga y controlador de batería. Después se procede a la fabricación del circuito impreso- PCB. Para garantizar la calidad y el funcionamiento de la placa se realizó un contrato de producción de 6 PCB's de desarrollo por medio de la empresa GIGAWATT.SAS (Lista de materiales)

3.3.3 *Diseño y fabricación de piezas 3D*

Continuando con el diseño preliminar del prototipo 1.0 se presentaron ciertas mejoras en el dispositivo, como la facilidad de intercambiar sensores, para ello se diseñaron porta sensores para fijar los en la estructura y que, a su vez, se puedan remplazar en caso de mal funcionamiento. También se creó un sarcófago con todos los módulos y borneras necesarios para leer y transmitir datos, además, se puede extraer del dispositivo para realizar pruebas de laboratorio sin comprometer su estado. Estas piezas fueron prototipadas por la impresora 3D EnderV3 y el material de fabricación fue el PETG con una densidad de material del 30% esto

debido a que el material soporta esfuerzos a tensión cercanos a los 654 N y a compresión a los 2395 N, según monografía Caracterización de las propiedades mecánicas del copolímero PETG mediante impresión FDM-3D (2021). Pueden sustituirse por otras piezas de la versión anterior como uniones en PVC, ahorrando tiempo y costos de producción. Para complementar lo enunciado anteriormente se encuentra un apartado con planos e imágenes complementarias en los anexos.

Figura 5. *Piezas diseñadas e impresas*



3.3.4 Prueba de Lectura y ensamblaje

Contando con los elementos electrónicos y estructurales mencionados con anterioridad, se procedió a ensamblar los dispositivos, es necesario aclarar que varias partes del dispositivo se pueden conseguir en una ferretería, cumpliendo con el requisito de ser de fácil construcción y de bajo presupuesto. También se puede visualizar los datos por la pantalla OLED que nos ofrece el módulo Heltec LoRa-V3.

3.3.5 Pruebas de campo y consumo energético

Con el dispositivo ya ensamblado se prosigue con las pruebas de campo y puesta a punto, es imperativo recordar que contamos con una limitante dada por la capacidad de energética de las baterías ion-Litio, el consumo de los sensores se acerca una medida de 40 μA y adicional se tiene el consumo del módulo Heltec LoRa-V3 de 3 μA . La configuración del módulo hace lecturas de las variables cada 5 minutos, y luego entra en hibernación para optimizar el consumo energético.

3.3.6 Pruebas de comunicación

Como se ha mencionado anteriormente, la comunicación entre dispositivos se está realizando por medio del protocolo LoRa, este protocolo permite la transmisión de datos a través de largas distancias y con un consumo energético mínimo, pero para poder realizar esta comunicación estamos sujetos a los lineamientos planteados por la Agencia Nacional del Espectro-ANE, para aplicaciones IoT, y otros recursos de libre se sugiere el uso de una Frecuencia entre 823 kHz y 923 kHz, en este caso particular se trabajaron con la frecuencia de 915kHz. Los nodos de medición transmiten la información al receptor por medio de una cadena de caracteres donde los datos de relevancia están separados por el carácter ‘;’ como se muestra a continuación:

Figura 6. Trama de datos.

3.3.7 Sistema de telemetría

Los datos son recibidos por un módulo central, que se identifica como el maestro de la red de telemetría, el dispositivo recibirá la trama de datos de hasta 70 bytes; estos datos son almacenados temporalmente en la memoria ROM del Procesador ESP32-S3 que cuenta con una capacidad de 384 KB. Una vez terminada la lectura de cada uno de los nodos de medición, el maestro cambiará su funcionamiento a una relación Servidor/Cliente, almacenando esta información en la base de datos y posteriormente volverá a su estado de receptor en el protocolo LoRa. Para reconocer cada nodo de medición se utilizó su dirección MAC como identificador único para el sistema.

3.3.8 Video demostrativo

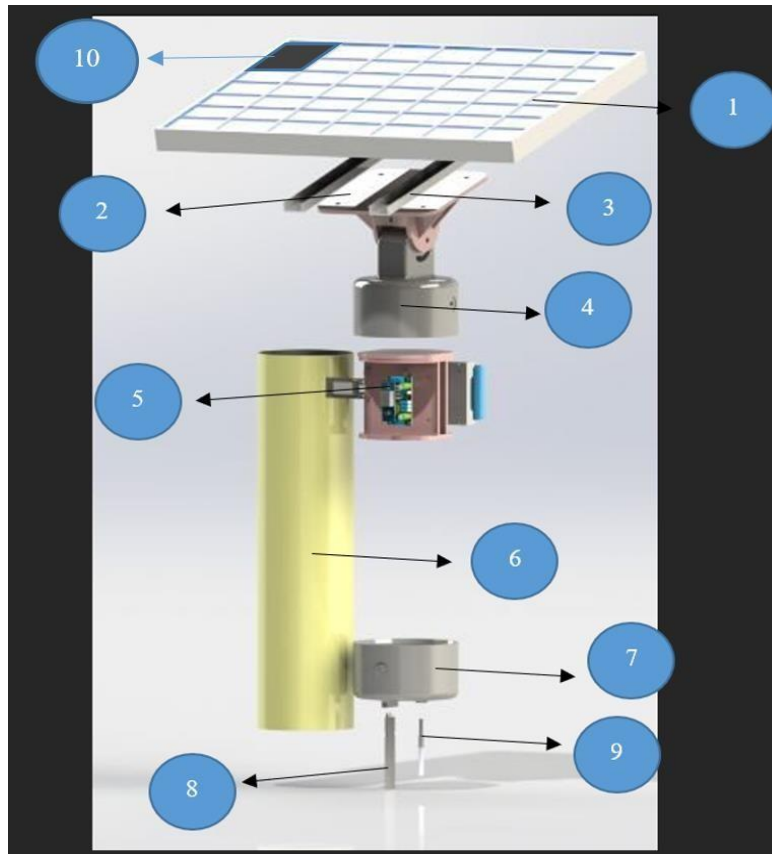
Al finalizar la realización técnica del proyecto, se procedió a realizar una guía rápida y un video demostrativo. En ellos se explica la correcta instalación de las piezas estructurales y la interpretación del conexionado eléctrico, el material está enfocado para que personas no profesionales y con un nivel académico básico lo pueda instalar de forma autónoma.

3.4 Descripción de los productos finales

3.4.1 Prototipo de nodo de medición

Dispositivo de medición, con lecturas de identificación del dispositivo, temperatura ambiente, humedad relativa, lluvia, temperatura del suelo, humedad del suelo, luxómetro y nivel de carga de batería. Que transmita la información en una cadena de caracteres por protocolo LoRa, con resistencia a caídas y con protección IP54.

Figura 7. Diagrama general del dispositivo.



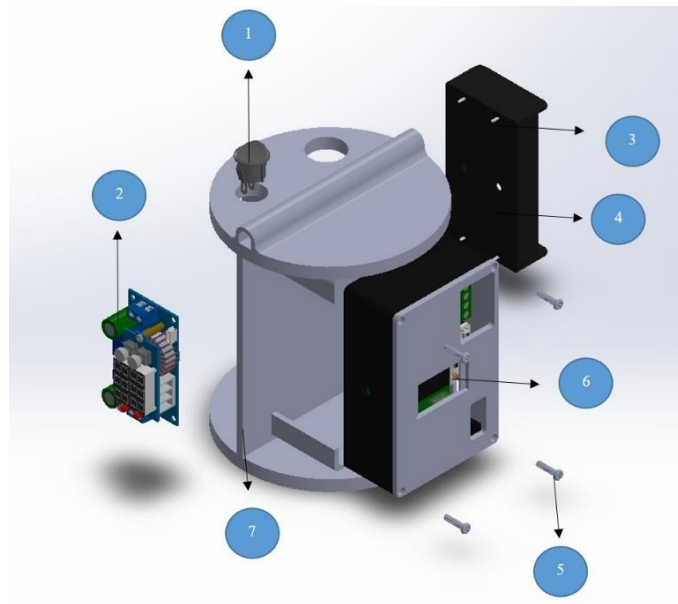
Tomado de software SolidWorks

Tabla 1. Elementos diagrama general del dispositivo.

n.º de Elemento	Descripción	Cantidad
1	Panel solar	1
2	Soporte de panel	1
3	Barras de aluminio	2
4	Tapa superior	1
5	Capsula de electrónica	1

Tabla 1. (Continuación)

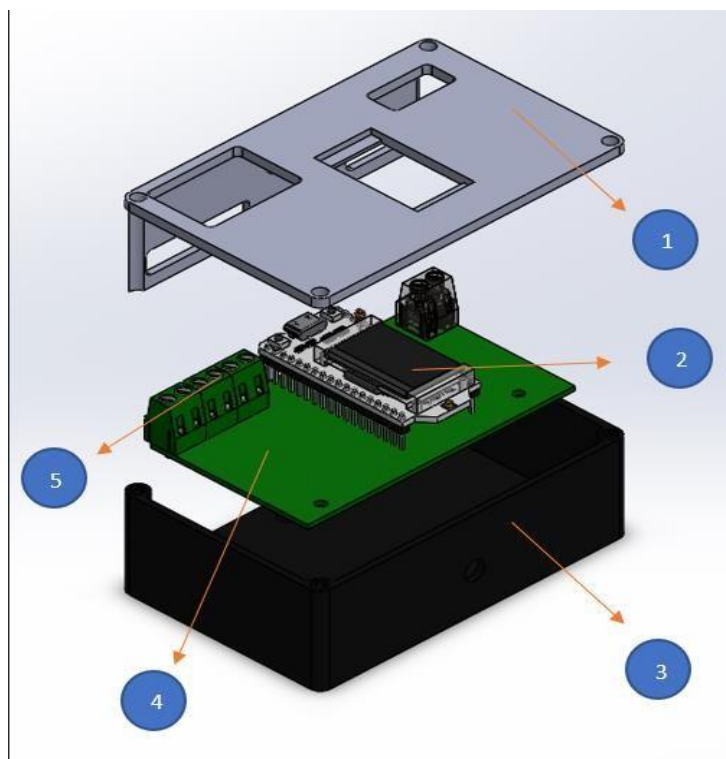
n.º de Elemento	Descripción	Cantidad
6	Tubo PVC	1
7	Tapa inferior	1
8	Sensor de humedad suelo	1
9	Sensor de temperatura	1
10	Porta sensores	1
11	Sensor de precipitaciones	1
12	Sensor de humedad y temperatura ambiente	1
13	Tornillos y tuercas para soportes	8
14	Tornillo y tuercas tapa	1
15	Sensor intensidad lumínica	1

Figura 8. *Diagrama de capsula de electrónica*

Tomado de software SolidWorks

Tabla 2. *Elementos diagrama de capsula de electrónica.*

Nº DE ELEMENTO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Interruptor	1
2	Controlador Solar	1
3	Soporte de baterías	1
4	Baterías de ion-litio	2
5	Tornillos y tuercas	4
6	Soporte de electrónica	1
7	Caja de comunicación	1

Figura 9. Diagrama de capsula de electrónica.

Tomado de software SolidWorks

Tabla 3. Elementos diagrama de capsula electrónica.

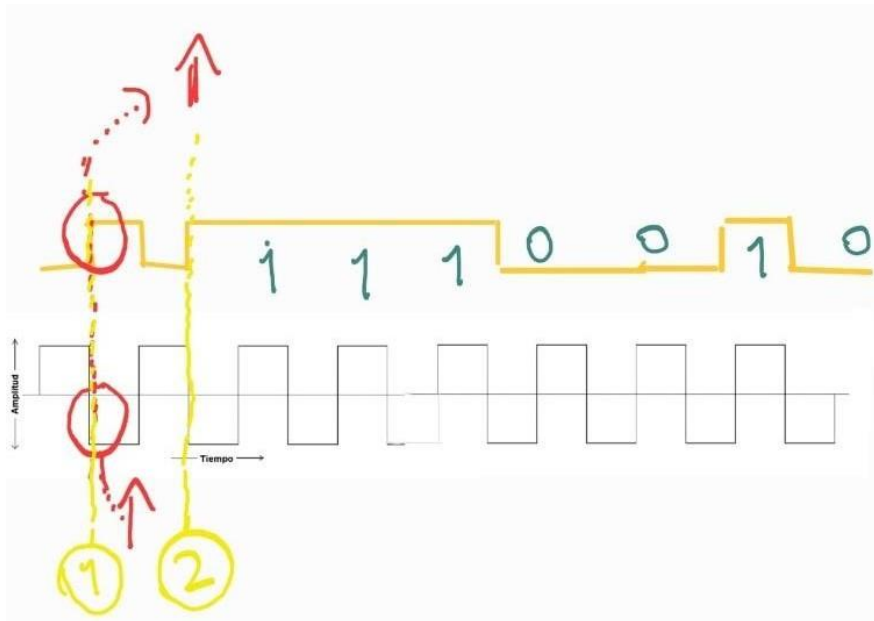
N.º DE		
ELEMENT	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
O		
1	Tapa arriba de caja	1
2	Modulo ESP32	1
3	Tapa debajo de caja	1
4	PCB	1
5	Bornes	4

3.4.2 *Video explicación y guía rápida*

Link de visualización del video y guía rápida para la instalación del dispositivo de medición y configuración del receptor. En caso de no poder acceder a los recursos favor contactar con los autores del presente documento. ([Guía Rápida y video](#))

3.5 Conclusión del capítulo

Como se pudo apreciar durante el desarrollo del proyecto fue necesario la implementación de múltiples herramientas tecnológicas y de habilidades para la resolución de problemas. Una experiencia grata durante la ejecución del código de programación del nodo de medición fue la interferencia entre vincular la pantalla OLED del módulo Heltec LoRa-V3, el protocolo de comunicación I2C y la comunicación LoRA, para ello fue necesario integrar un código propio que permita realizar la lectura del sensor BH1750 independiente a la Librería ofrecida por el IDE de Arduino. Teniendo en cuenta el Datasheet del fabricante del sensor, se comprendió que la comunicación con el microcontrolador se realiza de forma síncrona y debe responder a una petición de bits generados en el pin configurado como SDA y cumplir con la condición de activación ACK.

Figura 10. Explicación trama de datos luxómetro.

Nota: la condición por la cual se dispone el microcontrolador en modo escucha es cuando se presenta un flanco de subida en el SDA y un Flanco de bajada en SCL. El valor correspondiente en binario de la lectura es 11100100 correspondiente a 228 Lux.

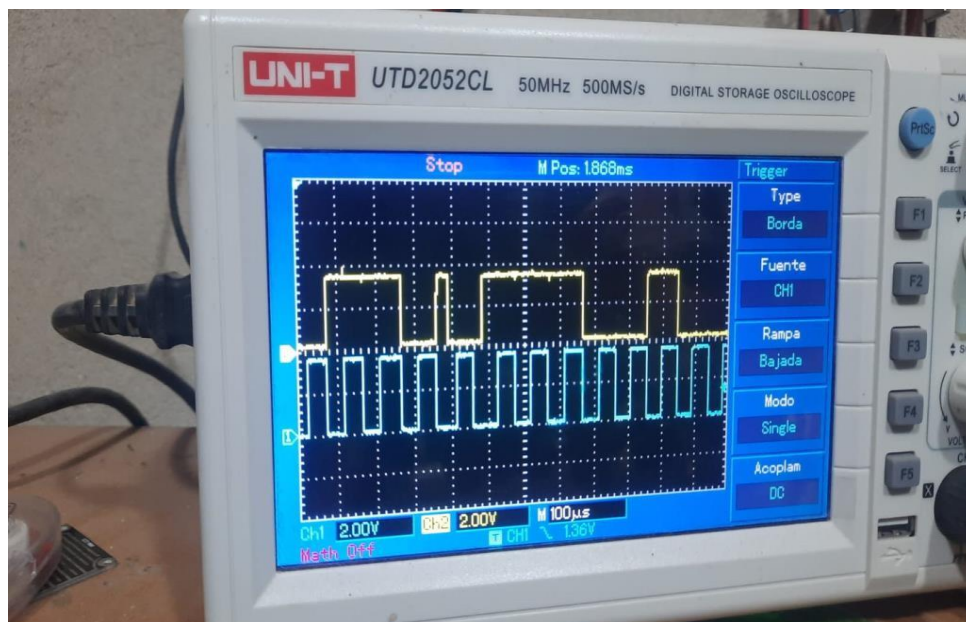
Figura 11. Ilustración osciloscopio con el protocolo I2C

Tabla 4. Rangos comparativos mediciones luxómetro

lx	Relación ambiente
0.01	Cielo nocturno despejado
1	Cielo nocturno con luna llena
100	Pasillo en una zona de paso
300	Sala de reuniones
500	Oficina iluminada
1000	Iluminación en un estudio de televisión
32000	Luz solar en un día medio (minimo)

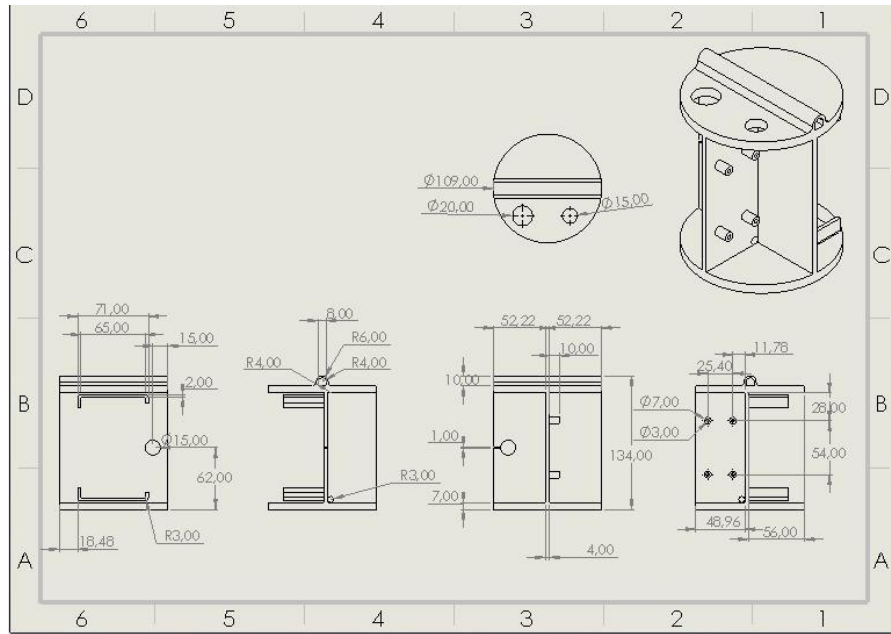
Como se mencionó anteriormente, la lectura del sensor BH1750, fue tomada en una oficina en horas de las noches, con un valor de 228 se puede asegurar que corresponde a la iluminación cercana a una habitación de uso cotidiano.

Otro aspecto importante que se quería mencionar son las modificaciones que se realizaron buscando una mejora sobre todo en el ámbito de la mantenibilidad y la fiabilidad del dispositivo, la estructura tuvo cambios en la tapa inferior y superior además de agregar un sistema más practico a la hora de realizar las conexiones del apartado electrónico, utilizando borneras y conectores tipo molex de 4 y 3 pines para los sensores digitales; en el caso de la tapa inferior se diseñó una tapa roscada que respetaba las tolerancias, con el objetivo de poder adaptar diferentes sensores ya sean de humedad o de otro índole, y para finalizar la tapa superior sufrió cambios en la accesibilidad de los cables que vienen del panel a la capsula de electrónica.

4 Resultados y discusiones

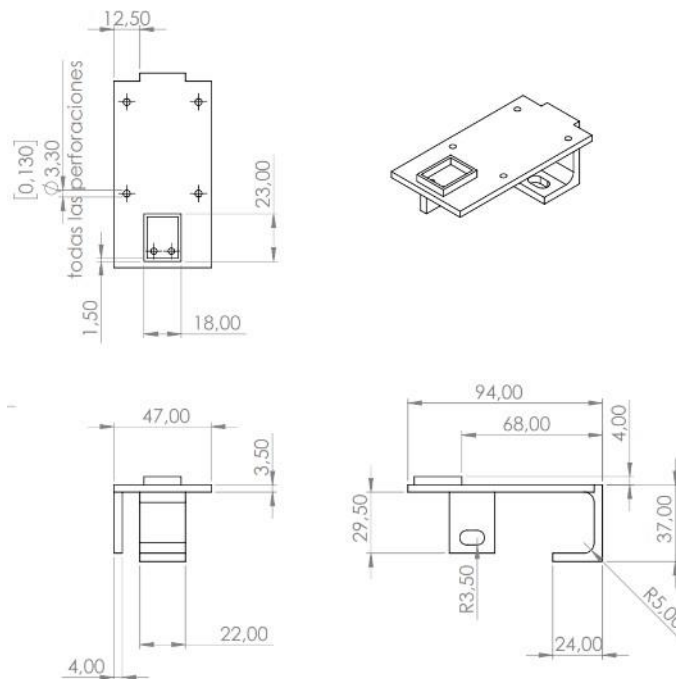
4.1 Diseño

Figura 12. Plano referente a porta piezas



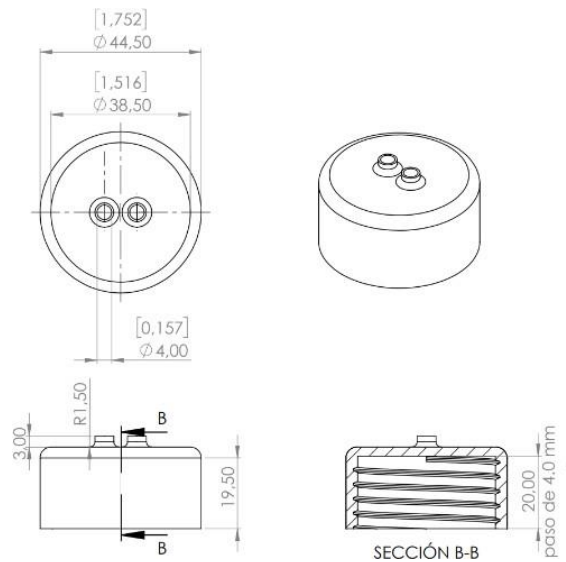
Tomado de software SolidWorks

Figura 13. Plano referencia porta sensores.

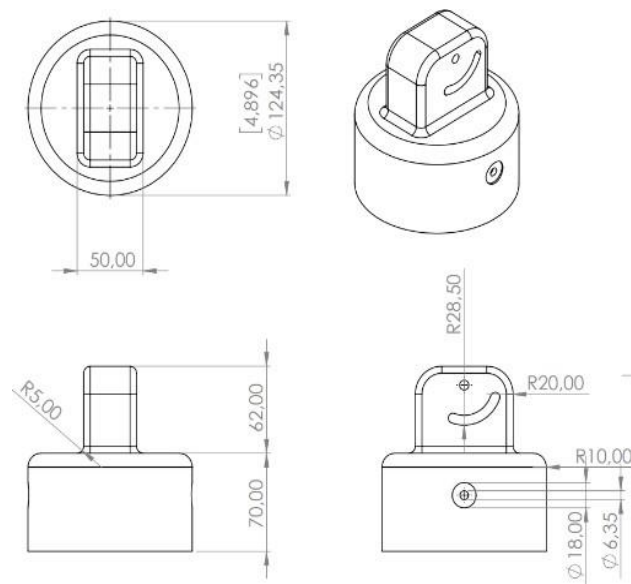


Tomado de software SolidWorks

Figura 14. Plano referencia tapa sensor HD23



Tomado de software SolidWorks

Figura 15. Plano referencia tapa superior tubo

Tomado de software SolidWorks

4.2 Simulaciones-pruebas- caracterización

Por medio de los archivos STL obtenidos del Software SolidWorks se puede concluir qué costo ha tenido el prototipado 3D, esto se debe a que el software Creality Slicer permite conocer la cantidad de material requerido en cada pieza, y a su vez el costo de materia prima.

Tabla 5. Análisis de prototipado 3D

Pieza	Peso (g)	Hora	min	Costo material	
Capsula -electrónica	196	16	3	\$	24.039,00
Case	63	5	29	\$	7.674,00
Tapa inferior-corte	54	4	38	\$	6.672,00
Porta sensores	25	2	18	\$	3.029,00
Porta sensor roscado	14	1	13	\$	1.737,00

Bisagra	173	15	14	\$	21.147,00
Tapa Superior	119	11	11	\$	14.572,00
Total	644	54	126	\$	78.870,00

Tabla 6. Costos

Pieza	Cant.	Valor Unitario	Costo material
Perfil en aluminio en u 1´	1	\$60.000	\$60.000
Tornillo m4 cabeza estrella ¾	100	\$600	\$54.000
Varilla roscada m4	1	\$17.000	\$17.000
Cable de utp flexible cat 5e	10	\$4.100	\$ 41.000
Botella de resina epoxica	2	\$40.00	\$ 80.000
Borneras dobles pad 5.08 mm	30	\$950	\$ 28.500
Conectores tipo mol de 4 pines	30	\$600	\$ 18.000
Total + iva			\$ 355.215

Con los datos anteriores se puede concluir que el tiempo de uso de la impresora 3d Ender 3 V3 corresponde a 56 horas, con este valor y teniendo en cuenta que la impresora realiza un consumo cercano a los 360 w, se puede determinar el costo de servicio de Impresión.

$$1kWh = \$795,00 \text{ COP}$$

$$56 * 0.360 * 795 = \$16027,00 \text{ COP}$$

Figura 16. Cotización de componentes



Electrónica

www.didacticaselectronicas.com

Electrónica I+D S.A.S.

NIT: 900034424 Responsables de IVA

CL 48 D 65 A 35 Tel: 6046073333 MEDELLÍN COLOMBIA

No somos retenedores de IVA

REMISION

No.

2855

Asesor:

Maria Fernanda Delgado

Cardozo

Cliente: UNIVERSIDAD SANTO TOMAS NIT: Dirección: CR 9 51 23 BOGOTA, D.C. COLOMBIA Contacto: Laboratorista 1 Ingenier?a Electr?nica			Fecha expedición: 2023-05-25 Orden No: USTA000046767 Teléfono: 5878922 Correo: receptorfacturasusta@usantotomas.edu.co		
--	--	--	---	--	--

ITEM	CODIGO	DESCRIPCION	CANTIDAD	VALOR ANTES DE IVA	PRECIO TOTAL
1	ADAF-4026	Sensor de suelo Adafruit STEMMA - Sensor de humedad capacitivo I2C	2	47.600	95.200,00
2	CHA-16NC	Cajas para herramienta DE 16", con compartimientos, TRUPER	3	41.700	125.100,00
3	DFR0198-4M	Sensor de temperatura a prueba de agua DS18B20 - Cable 4MTS	10	19.500	195.000,00
4	DHT22	Sensor de temperatura y humedad AM2302/DHT22	8	22.800	228.000,00
5	ESP32-LORA915-	Modulo LoRa 915MHz con pantalla OLED	2	107.700	1.077.000,00
6	GY-302	Módulo sensor de luz	10	10.400	104.000,00
7	MPPT-5A-SOLAR	Controlador de carga para panel solar 5A	10	54.200	542.000,00
8	SD-32GB-C10-S	Memoria micro SD 32GB Clase 10 SANDISK	2	25.300	50.600,00
9	SEN-HUM-SUELO-2	Sensor de humedad de suelo con sonda	10	22.200	222.000,00
10	S-HUM-DROP-1	Modulo Detección de gotas de lluvia y humedad	9	5.500	55.000,00
11	SL20TU-18P	Panel solar policristalino 20W 12V	1	155.300	155.300,00
12	STST516126LA	Maleta porta herramientas STANLEY	1	114.800	114.800,00
13	TAR-RELE-30A	Tarjeta con Relé de 30A 30VDC/250VAC	5	20.400	102.000,00
14	TR-18650-3.7V-3500MA	Batería litio 18650 3.7V 3500 mAh. Samsung	10	40.800	408.000,00
15	UPS-LIPO-3	Cargador UPS para bateria de litio 18650	10	9.900	99.000,00
16	VALV-3/4-12V	Válvula Solenoide 12V 3/4	4	26.900	107.600,00

Tabla 7. Costos totales

Descripción	Valor
Costos PETG	\$78.870

Costo kwh Impresora	\$16.27
Costo Materiales	\$59.202
Costo de Componentes electrónicos	\$570.248
Miscelaneos	\$50.000
Total	\$774.590

4.3 Resultados

En durante las diferentes etapas se observaron los siguientes registros en la etapa de levantamiento de datos:

Figura 17. *Adquisición de datos*

```

20:20:20.903 -> LoRa Initial success!
20:23:12.746 -> E (126) esp_core_dump f Core dump data check failed:
20:23:12.746 -> Calculated checksum='88aa6b82'
20:23:12.746 -> Image checksum='9632cffb'
20:23:12.843 -> Serial initial done
20:23:12.926 -> you can see OLED printed OLED initial done!
20:23:13.003 -> LoRa Initial success!
20:25:35.911 -> Data: 915E3;78:21:84:A0:C7:24;25.80;71.10;0.00;26.25;72.00;36;3.37
20:26:54.980 -> Data: 915E3;78:21:84:A0:C7:24;25.20;73.00;0.00;25.88;71.00;36;3.37
20:28:13.983 -> Data: 915E3;78:21:84:A0:C7:24;24.80;74.10;0.00;25.69;70.00;37;3.37
20:29:35.014 -> Data: 915E3;78:21:84:A0:C7:24;24.50;75.30;0.00;25.50;69.00;36;3.37
20:30:52.048 -> Data: 915E3;78:21:84:A0:C7:24;24.30;76.20;0.00;25.37;68.00;36;3.37
20:33:30.067 -> Data: 915E3;78:21:84:A0:C7:24;24.00;77.30;0.00;25.12;68.00;36;3.36
20:37:27.100 -> Data: 915E3;78:21:84:A0:C7:24;23.80;78.40;0.00;24.87;67.00;36;3.36
20:38:48.070 -> Data: 915E3;78:21:84:A0:C7:24;23.80;78.10;0.00;24.87;66.00;36;3.37
20:40:05.125 -> Data: 915E3;78:21:84:A0:C7:24;23.70;78.60;0.00;24.87;66.00;36;3.36
20:44:03.138 -> Data: 915E3;78:21:84:A0:C7:24;23.70;79.90;0.00;24.81;65.00;36;3.36
20:45:22.144 -> Data: 915E3;78:21:84:A0:C7:24;23.60;79.50;0.00;24.75;65.00;36;3.36
20:47:59.182 -> Data: 915E3;78:21:84:A0:C7:24;23.70;79.90;0.00;24.81;65.00;36;3.36
20:51:57.202 -> Data: 915E3;78:21:84:A0:C7:24;23.80;79.60;0.00;24.69;64.00;36;3.37
20:53:17.220 -> Data: 915E3;78:21:84:A0:C7:24;23.70;79.60;0.00;24.63;64.00;36;3.36
20:54:38.252 -> Data: 915E3;78:21:84:A0:C7:24;23.60;80.50;0.00;24.63;64.00;37;3.36
20:55:52.255 -> Data: 915E3;78:21:84:A0:C7:24;23.60;80.70;0.00;24.56;63.00;36;3.36
20:57:14.274 -> Data: 915E3;78:21:84:A0:C7:24;23.60;81.00;0.00;24.56;64.00;36;3.35
20:58:30.319 -> Data: 915E3;78:21:84:A0:C7:24;23.60;81.00;0.00;24.56;63.00;36;3.35
20:58:36.318 -> Data: 915E3;78:21:84:A0:C7:24;23.60;81.00;0.00;24.56;63.00;36;3.35
20:59:52.331 -> Data: 915E3;78:21:84:A0:C7:24;23.50;81.30;0.00;24.44;63.00;36;3.35
21:01:10.375 -> Data: 915E3;78:21:84:A0:C7:24;23.40;82.10;0.00;24.44;63.00;36;3.36
21:01:14.388 -> Data: 915E3;78:21:84:A0:C7:24;23.40;82.10;0.00;24.44;63.00;36;3.36
21:10:25.382 -> Data: 915E3;78:21:84:A0:C7:24;23.40;82.70;0.00;24.44;62.00;36;3.35
21:11:43.414 -> Data: 915E3;78:21:84:A0:C7:24;23.50;81.40;0.00;24.44;62.00;36;3.36
21:13:04.435 -> Data: 915E3;78:21:84:A0:C7:24;23.50;81.50;0.00;24.44;62.00;36;3.35
21:23:36.821 -> Data: 915E3;78:21:84:A0:C7:24;23.30;82.00;0.00;24.25;61.00;2;3.35
21:23:40.837 -> Data: 915E3;78:21:84:A0:C7:24;23.30;82.00;0.00;24.25;61.00;2;3.35

```

Nota: lectura monitor serial IDE Arduino.

4.4 Discusión de resultados

Teniendo en cuenta que los componentes electrónicos que se implementaron durante el desarrollo y ejecución del proyecto, se encuentran disponibles en el mercado. Y el gasto de ellos no supera más de los \$500.000 COP, y que el prototipado 3D se generó un gasto cercano a los \$100.000 COP y que los otros gastos misceláneos como tornillería, secciones de PVC, uso de pegantes epóxicos entre otros consumibles se puede aproximar a los \$100.000 COP dando un costo de producción cercano a los \$700000 por nodo de medición. Si se tiene en cuenta que la información que se adquirió en la trama de datos es de fiabilidad, se puede considerar que para ser un sistema que está monitoreando 7 variables y que a su vez en todos los nodos de medición son de fácil mantenimiento y reparación por un costo inferior al \$1'000.000 COP, se puede considerar que el sistema es de bajo costo, esto debido a que en el campo de la instrumentación no hay equipos y/o elementos de sensores/transmisión/recepción de datos que ronde por esta gama de precios.

5 Conclusiones

Se logro mejorar aspectos importantes con relación en el prototipo 1.0, como se puede observar alrededor de las figuras y anexos del proyecto, uno de los apartados más significativos fue la implementación de más sensores que nos brindaron información importante para complementar la adquisición de datos, sin embargo, esto también ocasiono inconvenientes al momento de la comunicación y sincronización con la ESP32 gracias a sus protocolos, pero se solucionó con éxito logrando uno de los hallazgos más importantes del proyecto. Para finalizar este apartado, la modificación de algunas piezas fue acertada para brindar más orden e incluso aumentar la mantenibilidad del dispositivo.

Se llevó a cabo la construcción de los seis dispositivos de monitoreo con éxito, este proceso resultó ser más tardado de lo esperado debido principalmente a los tiempos de impresión, revisar anexo G, además de la tardanza de entrega de materiales, dejando de lado lo anterior, se puede concluir que realmente si se pueden elaborar dispositivos e incluso una red de telemetría a bajo costo, en un principio resulta más complejo de lo esperado encontrar los elementos que se integren correctamente entre sí, pero, una vez se logra esto resulta gratificante poder brindar un producto al cual los agricultores puedan acceder de forma más sencilla sin necesidad de ser cultivos a escala industrial.

Cabe recalcar que el proyecto queda abierto para realizar mejoras y ser implementado en proyectos futuros, siendo esta una oportunidad de crear un desarrollo mayor para el país e inspirando la investigación.

6 Recomendaciones

6.1 Mejoras estructurales

Se sugiere disminuir el volumen del dispositivo, específicamente hablando del tubo de PBC el cual podría ser remplazado por una tubería inoxidable que permita reducir el diámetro de esta pieza y de este modo debido a que, al tener un diámetro pronunciado, este podría afectar la zona de sensado de los sensores que se encuentran en el suelo, a causa de cambiar el nivel de compactación natural del suelo.

Adicionalmente se sugiere en cuestiones de practicidad el disponer todo el sistema electrónico en cajas eléctricas con protección certificada IP67, así se brinda un enfoque en los soportes de los paneles solares.

6.2 Mejoras electrónicas

Resulta irreverente la implementación de una pantalla oled en un cultivo que se encontrará a la intemperie en su mayoría de tiempo, además que la información será transmitida de forma inalámbrica y para cuestiones de pruebas se pueden verificar los datos por medio del monitor serial del ID de Arduino.

Mejorar los sistemas de protección a sobretensiones y respuestas transitorias, como la implementación de los diodos TBS.

6.3 Mejoras operativas

Disponer otra forma de almacenar datos además de la telemetría, mejorando la custodia de datos en caso de pérdida de conexión.

Referencias

- [1] DATOSMACRO, «Colombia - Emigrantes totales 2020 | Aumenta el número de emigrantes colombianos». Accedido: 2 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://datosmacro.expansion.com/demografia/migracion/emigracion/colombia>
- [2] Portafolio, «El 17% del total de la fuerza laboral del país trabaja en el campo». Accedido: 2 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.portafolio.co/economia/el-panorama-de-la-agricultura-en-colombia-en-su-dia-internacional-de-la-agricultura-544437>
- [3] J. E. Ordoñez y M. F. Ruiz, «Diseño e implementación de un prototipo WSN para el control y monitoreo de los parámetros ambientales para el cultivo de cacao de la Finca Elizabeth ubicada en el Cantón Naranjal», Tesis de grado, Universidad de Guayaquil, 2021. Accedido: 2 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/52286>
- [4] Y. N. Quevedo y C. A. Bonilla, «Caracterización de las propiedades mecánicas del copolímero PETG mediante impresión FDM 3D», Tesis de Grado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2021. Accedido: 2 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/28358>
- [5] O. Friha, M. A. Ferrag, L. Shu, L. Maglaras, y X. Wang, «Internet of Things for the Future of Smart Agriculture: A Comprehensive Survey of Emerging Technologies», *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, vol. 8, n.º 4, pp. 718-752, mar. 2021, doi: 10.1109/JAS.2021.1003925.
- [6] M. Quintero y K. Díaz, «El mercado mundial del cacao», *AGROALIMENTARIA*, vol. 1, n.º 18, pp. 47-59, 2004.

- [7] J. E. Martínez, «Diseño e implementación de un cargador de baterías controlado por un algoritmo de MPPT y alimentado por paneles solares», bachelor thesis, Universidad Santo Tomás, 2021. Accedido: 2 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/35158>
- [8] UNE-EN 60529, *Norma Internacional CEI 60529 Degrees of Protection*. Asociación Española de Normalización Génova, 2004.
- [9] Resolución 105, *Por medio de la cual se modifica la Resolución 105 de 2020 “- la cual se planea y atribuye el espectro radioeléctrico en Colombia*. 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.ane.gov.co/Sliders/archivos/gesti%C3%B3n%20t%C3%A9cnica/Estudios%20de%20gesti%C3%B3n%20y%20planeaci%C3%B3n/900%20MHz/Documentos/ProyectoResoluci%C3%B3nModifica105.pdf>
- [10] J. M. Celis-Peñaranda, C. D. Escobar-Amado, S. B. Sepúlveda-Mora, S. A. Castro-Casadiegos, B. Medina-Delgado, y D. Guevara-Ibarra, «Diseño de una red de sensores inalámbricos para el despliegue óptimo de los nodos sensores en un cultivo de Cacao», *TecnoLógicas*, vol. 23, n.º 47, Art. n.º 47, ene. 2020, doi: 10.22430/22565337.1361.

Apéndices

Apéndice A. Fotos referentes a pruebas realizadas durante y después de la construcción de los dispositivos. Ver en el siguiente enlace [fotos pruebas](#).

Apéndice B. Fotos referentes a la construcción de los dispositivos y de los problemas enfrentados. Ver en el siguiente enlace [fotos construcción](#).

Apéndice C. Videos referentes al trascurso de la construcción y pruebas realizadas. Ver en el siguiente enlace [videos](#).

Apéndice D. Lista y cotización de materiales necesarios para llevar a cabo la construcción de los dispositivos; se aclara que debido a la condición inicial y las bases otorgadas por semillero de investigación davinci, no fue necesario la adquisición de algunos materiales los cuales no se encuentran en la lista. Documento se encuentra a través del siguiente enlace, [elementos](#).

Apéndice E. Se enlistan los diversos datasheet de la electrónica utilizada en el proyecto. Ver en el siguiente enlace [datasheet](#).

Apéndice F. Se evidencian los parámetros configuración de impresora 3d para las diversas piezas. Vea en el siguiente enlace [parámetros impresión](#).

Apéndice G. Contiene imágenes referenciales a los tiempos de impresión para estimar los costos totales del dispositivo. Vea en el siguiente enlace [tiempos de impresión](#).