

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

Monitoreo de cultivo mediante una red en Malla de sensores ambientales.

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Telemática

Presentado por:

Alfredo Dario Mosquera Espinoza

Brayan Patricio Cepeda Leon

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2023

DEDICATORIA

Alfredo Dario Mosquera Espinoza

A mis amados Padres, Alfredo Mosquera y Juanita Espinoza, y a mis queridas Hermanas Lupe Beatriz Mosquera y Johanna Mosquera: Su amor, apoyo incondicional y sabiduría han sido mi faro en este viaje. Cada palabra de esta tesis lleva impresa una parte de los valores y enseñanzas que me han brindado mi gran familia. Gracias por ser mi roca y mi alegría en cada paso que doy. Esta obra es también suya. A mi estimada amiga, Maria de los Ángeles Pérez, cuya amistad y apoyo han sido invaluable en este viaje: Gracias por estar siempre allí, por tus palabras de aliento y por compartir conmigo tanto las dificultades como las alegrías. Tu presencia en mi vida ha sido un regalo invaluable.

Brayan Patricio Cepeda León

A mis amados padres, Luis Cepeda y Gladis León, y a mi querido hermano Anthony Cepeda: cada uno de ustedes ha sido una luz guía en este camino que he recorrido. Esta tesis no es solo un logro académico, sino también el fruto de su amor, apoyo incondicional y las valiosas enseñanzas que me han brindado. Gracias por ser mi fortaleza y mi inspiración en cada momento. Este logro es también un tributo a nuestra familia y al amor profundo que nos une.

AGRADECIMIENTOS

Alfredo Dario Mosquera Espinoza

Mi más profunda gratitud va dirigida al PhD. Miguel Andrés Realpe Robalino, cuya guía experta y visión han sido fundamentales en el encaminamiento de esta tesis, proporcionando una base sólida y un enfoque claro que han enriquecido enormemente mi aprendizaje. Igualmente, agradezco inmensamente al Ingeniero Christopher Vaccaro, cuya dedicación y asesoría como tutor fueron cruciales en cada etapa de este proyecto, asegurando su correcta ejecución y contribuyendo significativamente a mi desarrollo académico y profesional. Su paciencia, conocimiento y apoyo continuo han sido pilares en la culminación exitosa de este trabajo.

Brayan Patricio Cepeda León

Deseo expresar mi sincera apreciación al PhD. Miguel Andrés Realpe Robalino, cuya orientación experta fue un faro de luz en la ruta de este proyecto de tesis. Su profunda sabiduría y enfoque perspicaz fueron esenciales en el modelado y enfoque de nuestra investigación, enriqueciendo mi experiencia educativa de manera inestimable. De igual manera, mi reconocimiento al Ingeniero Christopher Vaccaro, cuya tutoría meticulosa y entendimiento técnico detallado fueron pilares en la confección de este estudio. Su guía minuciosa y apoyo constante no solo garantizaron la integridad de nuestro trabajo, sino que también fueron cruciales en la evolución de mis habilidades como profesional.

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, me(nos) corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; (nombre de los participantes) y doy(damos) mi(nuestro) consentimiento para que la ESPOLE realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Alfredo Dario Mosquera Espinoza



Brayan Patricio Cepeda León

EVALUADORES

Ignacio Marin-Garcia
PROFESOR DE LA MATERIA

Christopher Vaccaro
DIRECTOR PROYECTO
INTEGRADOR

RESUMEN

Este proyecto se enfoca en la optimización de una red de sensores agrícolas mediante la implementación de una topología de malla y la sincronización efectiva de nodos, buscando mejorar la gestión de recursos y la toma de decisiones en entornos agrícolas. El objetivo específico es incrementar la resiliencia de la red, facilitar su escalabilidad y garantizar la transmisión eficiente de datos, así como asegurar una sincronización precisa entre los nodos.

Se utilizaron Arduino Nano, placa ESP32, sensores de lluvia, temperatura, humedad, humedad del suelo, luxómetros BH1750, módulos NRF24L01 para comunicación inalámbrica y RTC (Real Time Clock) DS3231 para la medición precisa del tiempo, todo ello alimentado por un sistema basado en energía solar. Se configuró una red de malla y se empleó un amperímetro para medir el consumo energético del sistema en diferentes estados operativos, recopilando datos que demostraron la eficiencia del sistema.

Los resultados mostraron una mejora significativa en la resiliencia y eficiencia energética de la red. La implementación de la topología de malla permitió una recuperación eficiente ante fallos de nodos, y la sincronización del módulo clock mejoró notablemente la coherencia en la recopilación y transmisión de datos. Además, se constató una reducción considerable en el consumo de energía en el modo sleep, lo que refleja la eficacia del sistema en la gestión de la energía.

Las conclusiones del proyecto validan la hipótesis inicial, demostrando que la red de malla, junto con una estrategia eficiente de gestión de energía, resulta en un sistema agrícola más resiliente y eficiente.

Palabras Clave: Topología de Malla, Sincronización de Nodos, Resiliencia de Redes, Gestión de Energía.

ABSTRACT

This project focuses on optimizing an agricultural sensor network through the implementation of a mesh topology and effective node synchronization, aiming to improve resource management and decision-making in agricultural environments. The specific objective is to increase the network's resilience, facilitate its scalability, and ensure efficient data transmission, as well as to guarantee precise synchronization among the nodes. Arduino Nano, ESP32 board, rain, temperature, humidity, soil moisture sensors, BH1750 lux meters, NRF24L01 modules for wireless communication, and RTC DS3231 for precise time measurement were used, all powered by a solar energy-based system. A mesh network was configured, and an ammeter was employed to measure the system's energy consumption in various operational states, collecting data that demonstrated the system's efficiency. The results showed a significant improvement in the network's resilience and energy efficiency. The implementation of the mesh topology allowed for efficient recovery from node failures, and the synchronization of the clock module notably improved the coherence in data collection and transmission. Furthermore, a considerable reduction in energy consumption was observed in sleep mode, reflecting the system's effectiveness in energy management. The project's conclusions validate the initial hypothesis, demonstrating that the mesh network, along with an efficient energy management strategy, results in a more resilient and efficient agricultural system.

Keywords: Mesh Topology, Node Synchronization, Network Resilience, Energy Management.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	i
ABSTRACT	iii
ABREVIATURAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE TABLAS	x
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Descripción del problema	1
1.2 Justificación del Problema	4
1.3 Objetivos	6
1.4 Estado del arte	7
1.5 Marco teórico	9
2 Metodología	11
2.1 Selección y Configuración de Sensores.	11
2.2 Elementos que componen la Red y su función.	12
2.3 Conexión Modulo Ds3231 al Arduino Nano.	16
2.4 Conexión Panel Solar a la fuente de alimentación de Arduino.	16
2.5 Comunicación y Arquitectura de Red.	17
2.6 Implementación y Pruebas del Sistema	19
2.7 Evaluación de Datos y Ajustes del Sistema	19
2.8 Prototipo y Diseño	21
3 Resultados y Análisis	23
3.1 Evaluación de la Escalabilidad	26
3.2 Análisis de la Eficiencia de la Red	27

3.3	Evaluación de la Sincronización del Tiempo en Toda la Red	30
3.4	Prueba de Resiliencia y Sincronización Automática	34
3.5	Evaluación de la Eficiencia Energética del Sistema.	36
3.6	Viabilidad Económica y Análisis de Costos	38
4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	43
	BIBLIOGRAFÍA	45
	APÉNDICES	47

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FAO	Food and Agriculture Organization
IoT	Internet of Things
CIDIS	Centro de Investigación, Desarrollo e Innovación de Sistemas Computacionales
ESB	Enhanced Shock Burst
RTC	Real Time Clock
SPI	Serial Peripheral Interface
SDA	Serial Data Line
SCL	Serial Clock Line
DC	Direct Current
WSN	Wireless Sensor Network
LPWAN	Low Power Wide Area Network
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
BLE	Bluetooth Low Energy
TIC	Tecnologías de la Información y la Comunicación
NTP	Network Time Protocol

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1	Antena Nrf24L01	13
2.2	Arduino Nano CH340	13
2.3	Placa de desarrollo NodeMCU32 ESP32	14
2.4	Sensor de lluvia + placa LM393	14
2.5	Sensor de luz GY-302 BH1750	15
2.6	Sensor de Humedad y Temperatura DTH11	15
2.7	Modulo Clock DS3231	16
2.8	Arquitectura de Red Mesh de Sensores	18
2.9	Diseño del Prototipo (Nodo)	21
3.1	Resiliencia de la Red de Malla - Tiempo de Reorganización por Experimento.	25
3.2	Monitorización Inicial - Datos de Tres Nodos	26
3.3	Expansión Efectiva - Cinco Nodos Conectados y Estables	26
3.4	Eficiencia de la Red de Malla - Transmisión de Datos Exitosa.	29
3.5	Prototipo del nodo.	30
3.6	Preparación para Sincronización de Tiempo - RTC DS3231 sin Batería	31
3.7	Desconexión del Módulo RTC - Preparación para Sincronización	31
3.8	Reinstalación del Módulo RTC - Listo para Sincronización.	32
3.9	Actualización de Hora vía NTP en el Gateway	33
3.10	Sincronización de Tiempo en el Nodo - Confirmación vía Monitor Serial	33
3.11	Prueba del nodo conectado a la red.	34
3.12	Prueba del Gateway conectado a la red.	35
3.13	Gateway y Nodo conectado realizando pruebas en el campo.	35
3.14	Datos obtenidos del nodo hacia el Gateway y el Gateway sincronizando la hora a los nodos.	36
3.15	Consumo Energético del Sistema (11 AM - 5 PM).	38
1	Prototipo del proyecto en sus inicios (Nodo y gateway)	49

2	Impresion del prototipo en la impresora 3D del cidis	49
3	Diseño del Prototipo (Nodo)	49
4	Prueba del nodo recopilando datos en el campo	50
5	Prototipo del nodo completado conectado en la PCB	51
6	Impresora 3D para obtener el diseño final de cada nodo y gateway	52

ÍNDICE DE TABLAS

2.1	Características esenciales del módulo Nrf24L01	12
3.1	Resultados de los Tiempos de Reorganización de la red de Sensores . . .	24
3.2	Eficiencia diaria de la red de sensores.	28
3.3	Registro de Consumo Energético	37
3.4	Lista de materiales y costos por nodo.	39
3.5	Lista de materiales y costos por Gateway.	40
3.6	Desglose de Costos iniciales del Proyecto.	41

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

La agricultura es una de las actividades más antiguas de la humanidad y ha sido fundamental para el desarrollo y supervivencia de las civilizaciones a lo largo de la historia. Sin embargo, en las últimas décadas, la agricultura ha enfrentado desafíos significativos debido a factores como el cambio climático, la urbanización y la creciente demanda de alimentos. Estos desafíos han llevado a la necesidad de adoptar prácticas agrícolas sostenibles que no solo garanticen la producción de alimentos, sino que también protejan el medio ambiente y promuevan el bienestar social. La agricultura sostenible se refiere a prácticas agrícolas que buscan satisfacer necesidades de la actualidad sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades. Según la Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la Alimentación (FAO, Food and Agriculture Organization) la agricultura sostenible tiene tres pilares fundamentales: la eficiencia económica, la equidad social y la integridad. La eficiencia económica se refiere a la capacidad de producir bienes y servicios de manera rentable, garantizando al mismo tiempo un nivel de vida digno para los agricultores y otros trabajadores del sector. La equidad social implica que los beneficios de la agricultura se distribuyan de manera justa entre todos los participantes, mientras que la integridad ecológica se refiere a la conservación y protección de los recursos naturales y la biodiversidad.

1.1 Descripción del problema

La agricultura tradicional enfrenta desafíos significativos en el mundo moderno. Estos métodos, que dependen en gran medida de la inspección manual y herramientas rudimentarias, no solo son ineficientes, sino que también pueden tener un impacto negativo en el medio ambiente. Según datos de la FAO, en 2018, la agricultura representó

el 4% del PIB mundial, y en algunos países en desarrollo, este porcentaje fue incluso mayor, superando el 25% . Sin embargo, la dependencia de la agricultura tradicional ha llevado a pérdidas monetarias y de cultivo, afectando a millones de agricultores en todo el mundo. En 2016, se estimó que el 65% de los adultos pobres que trabajan dependen de la agricultura tradicional. Estas cifras subrayan la urgencia de abordar las ineficiencias y los problemas asociados con la agricultura tradicional. El problema no se limita solo a la ineficiencia en la producción. Las prácticas agrícolas tradicionales también tienen un impacto ambiental, desde la degradación del suelo hasta el uso excesivo de recursos. En un mundo donde la sostenibilidad es clave, es esencial abordar estos problemas para garantizar un futuro más verde y próspero . La implementación de sistemas tecnológicos en la agricultura, como redes de sensores, puede revolucionar la forma en que se practica la agricultura. Estos sistemas no solo permiten monitorear las condiciones del cultivo en tiempo real, sino que también facilitan la toma de decisiones basadas en datos precisos y actualizados. La tecnología puede reducir significativamente el uso de recursos como el agua, los fertilizantes y los pesticidas. Además, la portabilidad y accesibilidad de dispositivos móviles han hecho que la tecnología sea más accesible para agricultores de todos los niveles socioeconómicos. Con más de mil millones de usuarios de smartphones en todo el mundo, la mayoría de las personas, independientemente de su situación económica, ahora tienen acceso a las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) . El proyecto propuesto busca optimizar un sistema existente, una de las propuestas clave del proyecto es cambiar la topología de la red de sensores de un diseño de árbol a una estructura de malla. Esta decisión se basa en la necesidad de eliminar jerarquías y la dependencia de un nodo principal, permitiendo una mayor flexibilidad y resiliencia en la red. En una topología de malla, cada nodo puede comunicarse directamente con cualquier otro nodo, ofreciendo múltiples rutas para la transmisión de datos. Esto no solo mejora la eficiencia de la transmisión, sino que también proporciona redundancia, asegurando que los datos puedan llegar a su destino incluso si algunos nodos fallan o se desconectan. La eficiencia energética es un aspecto crítico del proyecto. Con nodos dispersos en áreas agrícolas, es esencial que el sistema sea energéticamente eficiente para garantizar una operación continua y reducir la necesidad de mantenimiento. La propuesta de sincronizar el módulo RTC en todos los nodos es una estrategia efectiva para lograr esto. Al coordinar los tiempos de actividad y reposo de los nodos, se puede

reducir significativamente el consumo de energía. Para garantizar la transparencia y la trazabilidad, se propone desarrollar una librería que permita rastrear el camino que toman los datos a través de la red hasta llegar al gateway. Esta herramienta no solo proporcionará información valiosa sobre el flujo de datos, sino que también ayudará en la detección y solución de problemas, optimizando así la operación de la red. El modelo de transmisión de datos es esencial para garantizar que la información recopilada por los sensores se transmita de manera eficiente y confiable. En el diseño propuesto, aunque los sensores estarán operativos en todo momento, se implementarán medidas para minimizar el consumo energético. El Arduino, que actúa como el cerebro del nodo, se configurará para determinar cuándo considerar o no los datos de los sensores. Esta decisión se basará en tiempos predefinidos, permitiendo que los sensores entren en modo sleep y, por lo tanto, ahorren energía. La transmisión de datos entre nodos se optimizará para garantizar que la información llegue al gateway de la manera más eficiente posible. Cada nodo tendrá la inteligencia para determinar la mejor ruta para enviar sus datos, eliminando la necesidad de configurar cada salto. Esta flexibilidad es una de las ventajas clave de una topología de malla. La transición de una topología de árbol a una de malla tiene el potencial de revolucionar la forma en que funciona la red. Al eliminar las jerarquías y permitir que cada nodo funcione de manera más autónoma, se espera que la red sea más robusta y resiliente. La sincronización del módulo RTC en todos los nodos mejorará la eficiencia energética, y la librería propuesta para rastrear el flujo de datos proporcionará una mayor transparencia y trazabilidad. El proyecto presentado busca abordar las ineficiencias de la agricultura tradicional mediante la implementación de una red de sensores optimizada. La transición de una topología de árbol a una de malla, junto con las mejoras propuestas en eficiencia energética y trazabilidad de datos, tiene el potencial de hacer que esta red sea una herramienta invaluable para agricultores de todo el mundo. Mirando hacia el futuro, se espera que este proyecto sirva como un modelo para la implementación de tecnologías similares en otras áreas de la agricultura y otros sectores. La adaptabilidad y escalabilidad de la solución propuesta la hacen ideal para una variedad de aplicaciones, desde pequeñas granjas familiares hasta grandes operaciones agrícolas comerciales. Con la continua investigación y desarrollo, y con la colaboración de expertos en tecnología y agricultura, hay un futuro brillante y sostenible para la agricultura en el horizonte.

1.2 Justificación del Problema

La tecnología en la agricultura se puede definir como cualquier herramienta que proporcione un avance en la forma de trabajar y que mejore la eficiencia de una explotación. En la actualidad, la tecnología en el campo tiene tres objetivos principales: facilitar o realizar directamente el trabajo de los agricultores, aumentar los rendimientos de las cosechas y ahorrar en los insumos de producción. La idea es poder realizar labores agrícolas en el menor tiempo posible y con el mínimo personal. La implementación de una red de sensores con topología de malla en la agricultura traerá múltiples beneficios. Primero, al eliminar la dependencia de un nodo principal, se garantiza una mayor resiliencia y robustez en la red. Si un nodo falla, la información puede ser reenrutada a través de otros nodos, asegurando una transmisión de datos ininterrumpida. Esto es esencial en entornos agrícolas donde las condiciones pueden ser impredecibles. Además, al optimizar la eficiencia energética mediante la sincronización del módulo RTC, se prolonga la vida útil de los nodos, reduciendo la necesidad de mantenimiento y reemplazo frecuente de baterías. Esto se traduce en ahorros significativos a largo plazo para los agricultores. Por último, la creación de una librería que rastrea el flujo de datos proporcionará una mayor transparencia en la red. (Ivaşcu et al., 2016) Los agricultores podrán identificar y solucionar problemas rápidamente, y tendrán una visión clara de cómo se mueve la información en su red. La conveniencia de ejecutar este proyecto radica en su capacidad para abordar problemas específicos de la agricultura, como la ineficiencia en la gestión de recursos y la falta de datos en tiempo real para la toma de decisiones. Al proporcionar a los agricultores herramientas que les permitan monitorear y responder a las condiciones del cultivo en tiempo real, se puede aumentar significativamente la productividad y la sostenibilidad de las operaciones agrícolas. La ejecución de este proyecto tendrá varias implicaciones prácticas. Al implementar una red de sensores con topología de malla, los agricultores podrán obtener datos más precisos y en tiempo real sobre las condiciones de sus cultivos. El proyecto está enfocado en el área de la agricultura, los usuarios tendrán acceso a una herramienta poderosa que les permitirá monitorear y gestionar sus cultivos de manera más eficiente. Sin embargo, los beneficios no se limitan solo a ellos. Los consumidores también se beneficiarán al tener acceso a productos agrícolas de mejor calidad y posiblemente a precios más bajos debido a la

reducción de los costos de producción. Además, al promover prácticas agrícolas más sostenibles y eficientes, el medio ambiente también se beneficiará, ya que se reducirá el uso excesivo de recursos y se minimizará el impacto negativo en el suelo y el agua. Esta no es solo una inversión en tecnología, sino una inversión en el futuro de la agricultura, garantizando que pueda satisfacer las necesidades de las generaciones a largo plazo. (Alwis et al., 2016)

1.3 Objetivos

Optimizar la resiliencia y eficiencia energética de una red de sensores agrícolas mediante la automatización de topología en malla y sincronización de nodos para la mejora de toma de decisiones, gestión de recursos en entornos agrícolas, por eso hemos planteado los siguientes objetivos específicos:

1. Implementar una red de sensores con topología de malla que elimine la dependencia de un nodo principal y aumente la resiliencia de la red.
2. Construir una red de malla (mesh) de sensores inalámbricos utilizando el chip NRF24L01, que permita una escalabilidad según las necesidades del cliente y la transmisión eficiente de datos sin el uso de cableado en los cultivos.
3. Configurar el módulo de reloj RTC DS3231 que garantice una sincronización precisa entre los nodos, permitiendo una recolección y transmisión de datos coherente y en tiempo real en la red de sensores inalámbricos.

1.4 Estado del arte

Las redes de sensores inalámbricos (WSN) se han consolidado como herramientas fundamentales en la monitorización agrícola. Un desafío particular en este ámbito es el control de plagas de aves. En respuesta a este problema, exploraron una solución que combinaba WSN con redes de malla.(Ramadhan et al., 2020) La contribución clave de este trabajo es la implementación de una red de malla para garantizar la comunicación efectiva entre los sensores y el controlador central. Esta investigación subraya cómo las soluciones tecnológicas, particularmente la combinación de WSN y redes de malla, pueden abordar desafíos específicos en la agricultura.

El crecimiento y evolución del Internet de las Cosas (IoT) ha llevado a la necesidad de redes más robustas y eficientes en términos de energía. En este contexto,(Jiang et al., 2021) exploraron una solución híbrida que combina las tecnologías LPWAN (Low Power Wide Area Network) con redes de malla. Las redes LPWAN son conocidas por ofrecer comunicaciones de largo alcance con un consumo de energía mínimo. Sin embargo, para maximizar su eficiencia y cobertura en aplicaciones IoT, su integración con redes de malla se ha identificado como esencial. Esto resulta en una infraestructura de comunicación potente y adaptada a las demandas del IoT moderno. La propuesta de no solo refleja los avances tecnológicos en el ámbito de las redes, sino también una adaptación a las necesidades emergentes en aplicaciones de IoT, desde monitorización agrícola hasta aplicaciones urbanas y más. (Jiang et al., 2021).

El desarrollo y expansión del Internet de las Cosas (IoT) ha llevado a investigaciones innovadoras en configuraciones de red que puedan adaptarse a las demandas cambiantes de conectividad y cobertura. Un enfoque emergente es la utilización de redes de malla aéreas (Gupta et al., 2018) exploraron esta dirección, centrándose en cómo los vehículos aéreos no tripulados (UAVs) pueden ser implementados para establecer y mantener redes de malla aéreas en combinación con IoT. La investigación de Gupta (Gupta et al., 2018) destaca la versatilidad y potencial de las redes de malla aéreas en combinación con IoT. Estas soluciones representan un avance hacia redes más flexibles y resilientes, capaces de adaptarse a diversos desafíos y garantizar la conectividad en circunstancias desafiantes. La agricultura, como una de las industrias más antiguas y vitales, ha experimentado transformaciones significativas con la incorporación de

tecnologías modernas. Una de estas innovaciones es la adopción de redes de malla inalámbricas para facilitar lo que se conoce como "agricultura inteligente". (Gaikwad et al., 2023) abordaron este tema, destacando cómo las redes de malla inalámbricas pueden superar las limitaciones de las redes tradicionales en términos de cobertura y confiabilidad, especialmente en entornos agrícolas extensos. La solución propuesta por Gaikwad (Gaikwad et al., 2023) permite la recopilación de datos en tiempo real de diversos sensores distribuidos en el campo. La investigación subraya la importancia de las redes de malla inalámbricas en la evolución de la agricultura hacia prácticas más sostenibles y eficientes. La implementación eficiente de sensores en campos agrícolas es un desafío que implica considerar tanto la precisión de los datos como el consumo energético. (Shanbhag et al., 2020) ofrecieron una solución que combina las capacidades del Internet de las Cosas (IoT) con la eficiencia energética de la tecnología Bluetooth Low Energy (BLE) en redes de malla. Su propuesta se centra en el diseño de nodos de sensores optimizados para monitoreo agrícola, que recolectan datos de manera eficiente y confiable. Uno de los aspectos innovadores de este enfoque es la adopción de tecnología BLE en una red de malla. La investigación de (Shanbhag et al., 2020) subraya la importancia de diseñar soluciones adaptadas a las necesidades específicas del monitoreo agrícola. La combinación de IoT con tecnología BLE en redes de malla representa un avance significativo en la búsqueda de sistemas de monitoreo agrícola más eficientes y sostenibles.

1.5 Marco teórico

La red de malla (Mesh Network) es una topología de red que permite que cada nodo esté conectado a varios otros nodos en la red. En una red de malla, los datos pueden tomar cualquier ruta posible para llegar a su destino, lo que proporciona redundancia y resiliencia, ya que la red puede adaptarse a los nodos fallidos y encontrar una nueva ruta para los datos. En el contexto de una red de sensores inalámbricos en agricultura, esto significa que si un sensor falla o se pierde la conexión, los datos pueden ser reenrutados a través de otros sensores, asegurando que la información llegue siempre al punto de control central.

La sincronización en una red de sensores es fundamental para garantizar la coherencia y precisión de los datos recolectados. El uso de módulos RTC (Real Time Clock) como el DS3231 permite una sincronización precisa de los nodos, asegurando que las marcas de tiempo de los datos recogidos sean consistentes y fiables. Esto es vital para el análisis posterior de los datos y para mantener la integridad de la información en aplicaciones como el monitoreo climático y la gestión del riego.

Los sensores juegan un papel crítico en la agricultura moderna, permitiendo un monitoreo detallado de variables ambientales como temperatura, humedad, humedad del suelo y niveles de luz. Sensores como el DHT11, sensores de humedad del suelo, y luxómetros proporcionan datos esenciales para optimizar las prácticas agrícolas y mejorar los rendimientos. La integración de estos sensores en una red de malla ofrece una visión más amplia y detallada de las condiciones del cultivo.

El módulo NRF24L01 es un componente esencial para la comunicación inalámbrica en redes de sensores agrícolas. Ofrece una solución de bajo costo y bajo consumo de energía para la transmisión de datos entre los nodos de la red y el punto central de control. Su capacidad para operar en múltiples canales y su eficiencia energética lo hacen ideal para aplicaciones agrícolas donde la extensión de la red y la conservación de la energía son importantes. El diseño energéticamente eficiente es un aspecto crítico de los sistemas de sensores en la agricultura, especialmente en áreas remotas o con acceso limitado a fuentes de energía convencionales. La implementación de estrategias de ahorro de energía, como el uso de modos de sueño en los nodos y la alimentación a través de fuentes de energía renovable como paneles solares, es esencial para la sostenibilidad

a largo plazo de estas redes de sensores. La resiliencia en redes de sensores agrícolas es crucial para asegurar una operación ininterrumpida y fiable. La topología de malla ofrece ventajas significativas en este aspecto, ya que permite que la red se reconfigure automáticamente en caso de fallos de nodos, manteniendo la integridad de la red y la continuidad en la recopilación de datos.

Las tecnologías inalámbricas, como Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee, y LoRa, ofrecen diferentes ventajas y desventajas en el contexto de las redes de sensores agrícolas. Wi-Fi puede ofrecer altas tasas de transferencia de datos, pero consume más energía y generalmente tiene un alcance más corto que otras tecnologías como LoRa, que puede transmitir datos a largas distancias con un menor consumo de energía, pero a tasas de datos más bajas. Zigbee y Bluetooth también son opciones populares para redes de sensores debido a su bajo consumo de energía y suficiente alcance para muchas aplicaciones agrícolas. La elección de la tecnología inalámbrica dependerá de los requisitos específicos del sistema agrícola, como la distancia entre los sensores, la frecuencia de los datos, y la vida útil de la batería deseada.

CAPÍTULO 2

2. Metodología

El desarrollo de un sistema de red de sensores inalámbricos para monitorear variables ambientales en cultivos agrícolas, destinado al CIDIS (Centro de Investigación y Desarrollo e Innovación de Sistemas Computacionales), representa un avance significativo en la aplicación de tecnologías inalámbricas en la agricultura. La metodología adoptada para este proyecto se enfoca en la creación de una red de sensores utilizando tecnologías específicas y probadas en un entorno realista, aunque no a gran escala.

La primera fase del proyecto involucra la selección y configuración de los sensores ambientales. Se ha elegido utilizar el sensor DHT11 para medir la temperatura y la humedad ambiental y el sensor de humedad del suelo para monitorear las condiciones de riego. Estos sensores fueron seleccionados por su fiabilidad, precisión y costo-efectividad, haciéndolos ideales para una implementación experimental en un entorno controlado.

2.1 Selección y Configuración de Sensores.

Para la comunicación entre los sensores y la red central, se optó por utilizar los módulos NRF24L01. Estos módulos son conocidos por su bajo consumo de energía (Babusiak et al., 2019) y su capacidad para formar una red mesh escalable, lo cual es esencial para asegurar una cobertura efectiva y una recolección de datos fiable en el área de prueba. La arquitectura de red mesh fue seleccionada debido a su flexibilidad y capacidad de adaptación a diferentes configuraciones de terreno y distribuciones de cultivos, así como su facilidad para expandirse y modificar su alcance.

2.2 Elementos que componen la Red y su función.

El módulo de comunicación inalámbrica NFR24L01 se utiliza como un componente esencial para facilitar la comunicación inalámbrica entre los nodos de la red de sensores. Este módulo se destaca por su bajo consumo de energía y su capacidad para establecer una red mesh escalable. Su función principal es permitir que los nodos sensores envíen datos de forma confiable y eficiente a la red central, lo que es crucial para la recopilación de información ambiental en tiempo real en el entorno agrícola. La arquitectura de red mesh elegida ofrece flexibilidad y adaptabilidad, lo que permite su implementación en diferentes configuraciones de terreno y distribuciones de cultivos.(Abidin et al., 2023) Además, su capacidad para admitir hasta 6 nodos por máster lo hace escalable, lo que facilita la expansión de la red para cubrir áreas más extensas mediante la adición de sensores adicionales.

Tabla 2.1: Características esenciales del módulo Nrf24L01

Variables	Características
Velocidad de datos	250 Kbps, 1 Mbps, 2 Mbps
Bandas de operación	2.4 a 2.525 GHz
Números de nodos por máster soportado	6
Modulación	GFSK
Tipos de datos	Pequeños paquetes de datos hasta 32 bytes
Retransmisión de paquetes	Sí por Enhanced ShockBurst (ESB)
Consumo de potencia	11.3 mA Tx, 900 nA en reposo
Aplicación principal	Aplicaciones inalámbricas de potencia ultra baja
Latencia	4.5 ms
Alcance máximo	600 - 1000 m

En la Tabla 2.1 se puede apreciar las características convierten al módulo de transmisión en una opción altamente idónea para su implementación. Esto se debe a su excepcionalmente bajo consumo de energía, su asequible costo y su intrínseca fiabilidad.

El módulo incorpora algoritmos de detección de errores que aseguran una comunicación precisa entre los nodos, y admite hasta un máximo de seis (6) nodos por máster, lo que facilita su escalabilidad para abarcar áreas más extensas mediante la inclusión de sensores adicionales, cuenta con la antena exterior y su modulo de conexion como se muestra en la Figura 2.1

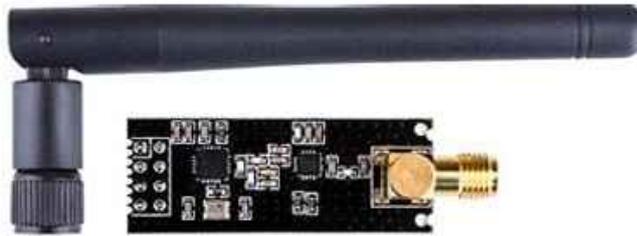


Figura 2.1: Antena Nrf24L01. Fuente: eBay, 2024

El uso del Arduino Nano en los nodos es fundamental para este proyecto, ya que sirve como la unidad central de control y procesamiento de datos en cada uno de los dispositivos desplegados en el campo agrícola. El Arduino Nano es una placa compacta y eficiente que integra un microcontrolador, puertos de entrada/salida y capacidad de comunicación como se muestra en la Figura 2.2. Su principal función en este contexto es la de recopilar datos de los sensores ambientales, gestionar la comunicación con otros nodos a través de los módulos NRF24L01, consultar la hora del módulo RTC y tomar decisiones locales basadas en los datos recopilados. Además, el Arduino Nano se alimenta mediante el sistema de paneles solares y batería, lo que garantiza su operación continua y la autonomía de los nodos.

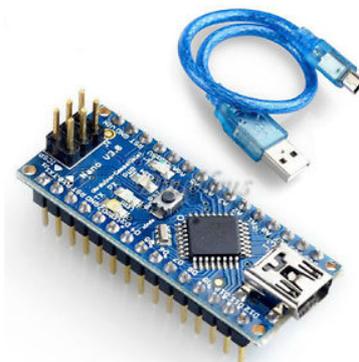


Figura 2.2: Arduino Nano CH340. Fuente: Moviltronics, 2024

El ESP32 se utiliza como elemento central para facilitar una comunicación eficiente entre los sensores inalámbricos y la red central, tal como se muestra en la Figura 2.3. Esto garantiza que los datos ambientales se recopilen y transmitan de manera confiable, permitiendo su posterior análisis y monitoreo.

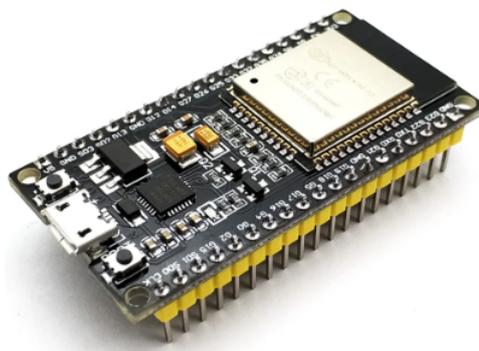


Figura 2.3: Placa de desarrollo NodeMCU32 ESP32. Fuente: Nubneo, 2024

El sensor de lluvia junto con la placa LM393, tal como se observa en la Figura 2.4 es un dispositivo crucial para registrar la presencia y la intensidad de la lluvia. Esto proporciona información valiosa para el control y la gestión del riego en los cultivos. Cuando se detecta lluvia, el sensor envía señales que pueden utilizarse para activar o desactivar sistemas de riego automáticamente, asegurando un uso eficiente del agua y evitando el exceso de humedad en el suelo.



Figura 2.4: Sensor de lluvia + placa LM393. Fuente: Szks-Kuongshun, 2024

El sensor de luz GY-302 BH1750 es fundamental en la medición precisa de la intensidad de la luz ambiental para entornos agrícolas, lo cual es crítico para el desarrollo y crecimiento de las plantas. Este monitoreo de las condiciones de iluminación, como se muestra en la Figura 2.5, permite a los agricultores tomar decisiones informadas respecto

a la necesidad de ajustar la exposición a la luz solar de las plantas. Tales ajustes pueden tener implicaciones significativas en la eficiencia del riego y en otros aspectos del manejo agrícola.



Figura 2.5: Sensor de luz GY-302 BH1750. Fuente: “Sensor de Luz - AliExpress”, 2024

Se utiliza el sensor de humedad y temperatura DHT11, tal como se muestra en la Figura 2.6, para obtener las mediciones de temperatura, expresadas en grados, y la humedad relativa del ambiente en cada nodo específico.



Figura 2.6: Sensor de Humedad y Temperatura DHT11. Fuente: Rambal, 2024

El módulo RTC DS3231, visible en la Figura 2.7, desempeña un rol crucial al proporcionar una sincronización de tiempo precisa y estable, esencial para la coordinación de las lecturas de los sensores ambientales. Este módulo se utiliza para mantener un registro preciso del tiempo y la fecha, lo que permite marcar cada medición ambiental con una marca de tiempo precisa. Esto es crucial para analizar y correlacionar los datos ambientales con eventos específicos en el campo agrícola, como riegos o cambios climáticos, lo que facilita un monitoreo más efectivo y la toma de decisiones informadas para optimizar el cultivo.

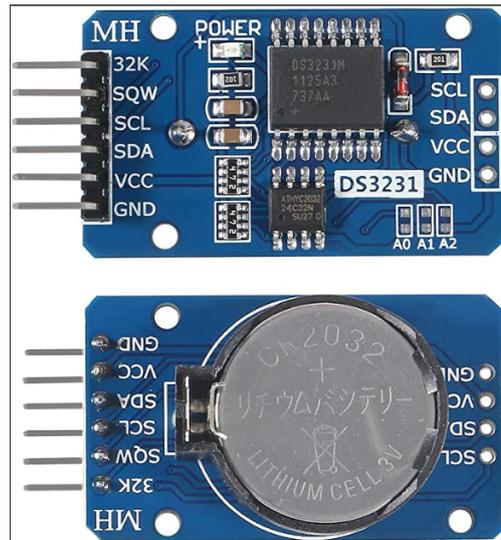


Figura 2.7: Modulo Clock DS3231. Fuente: SetNFix, 2022

2.3 Conexión Modulo Ds3231 al Arduino Nano.

En este proyecto, es necesario trabajar con la hora en tiempo real, y para lograrlo se ha optado por emplear un Real-Time Clock (RTC). Este RTC cuenta con un oscilador interno que garantiza su estabilidad incluso en condiciones de alta temperatura. La comunicación entre el RTC y el Arduino se realiza a través de Serial Peripheral Interface (SPI) utilizando los puertos SDA (A4) y SCL (A5), donde SDA representa la señal de datos y SCL la señal de reloj. El Arduino, que posee un reloj interno propenso a desconfigurarse al perder energía, se beneficia del RTC, ya que este último cuenta con su propia pila de energía, evitando así desincronizaciones. El módulo RTC permite al Arduino consultar y mantener la hora de manera precisa, lo que se refleja en el código de cada nodo del sistema al interactuar con el RTC para obtener la hora actual.

2.4 Conexión Panel Solar a la fuente de alimentación de Arduino.

Es fundamental destacar el enfoque en el método de alimentación de los dispositivos que componen los nodos del sistema. Dado que la alimentación a través de la red eléctrica convencional no es viable debido a consideraciones de ubicación, despliegue, entorno y costos, se ha optado por utilizar paneles solares en combinación con componentes de

carga y almacenamiento de energía. Estos elementos son esenciales para garantizar la disponibilidad y la autosuficiencia energética de los nodos. El sistema de alimentación de los nodos incluye un panel solar de 130x150 mm, un cargador de batería TP4056, un módulo de energía DC-DC y una batería de 5800 mAh. Estos componentes colaboran en proporcionar la autonomía necesaria para el proyecto, aprovechando la energía solar como fuente principal. Su función principal es cargar la batería durante las horas de luz solar para garantizar el suministro de energía a los elementos de cada nodo, como el Arduino nano, el módulo de radiofrecuencia, el módulo RTC y los sensores. Se ha realizado un cálculo teórico que respalda la capacidad del sistema para mantener mediciones continuas, siempre y cuando los componentes se encuentren en condiciones óptimas.

2.5 Comunicación y Arquitectura de Red.

La implementación del sistema se realizará en un entorno controlado, representativo de un campo agrícola real, pero en una escala más pequeña con una red en malla como se muestra en la Figura 2.8. Esta decisión permite un control más riguroso de las variables y una evaluación más precisa de la eficacia del sistema. Durante este período, se recopilarán datos continuamente, lo que permitirá evaluar la precisión de los sensores y la eficiencia de la comunicación entre los nodos de la red. La trama que recibirá el Gateway por parte de los nodos es: - Nodo ID, Humedad, Temperatura: °C, Humedad del Suelo, Luminosidad: lux, Nivel de Lluvia, Fecha y Hora.

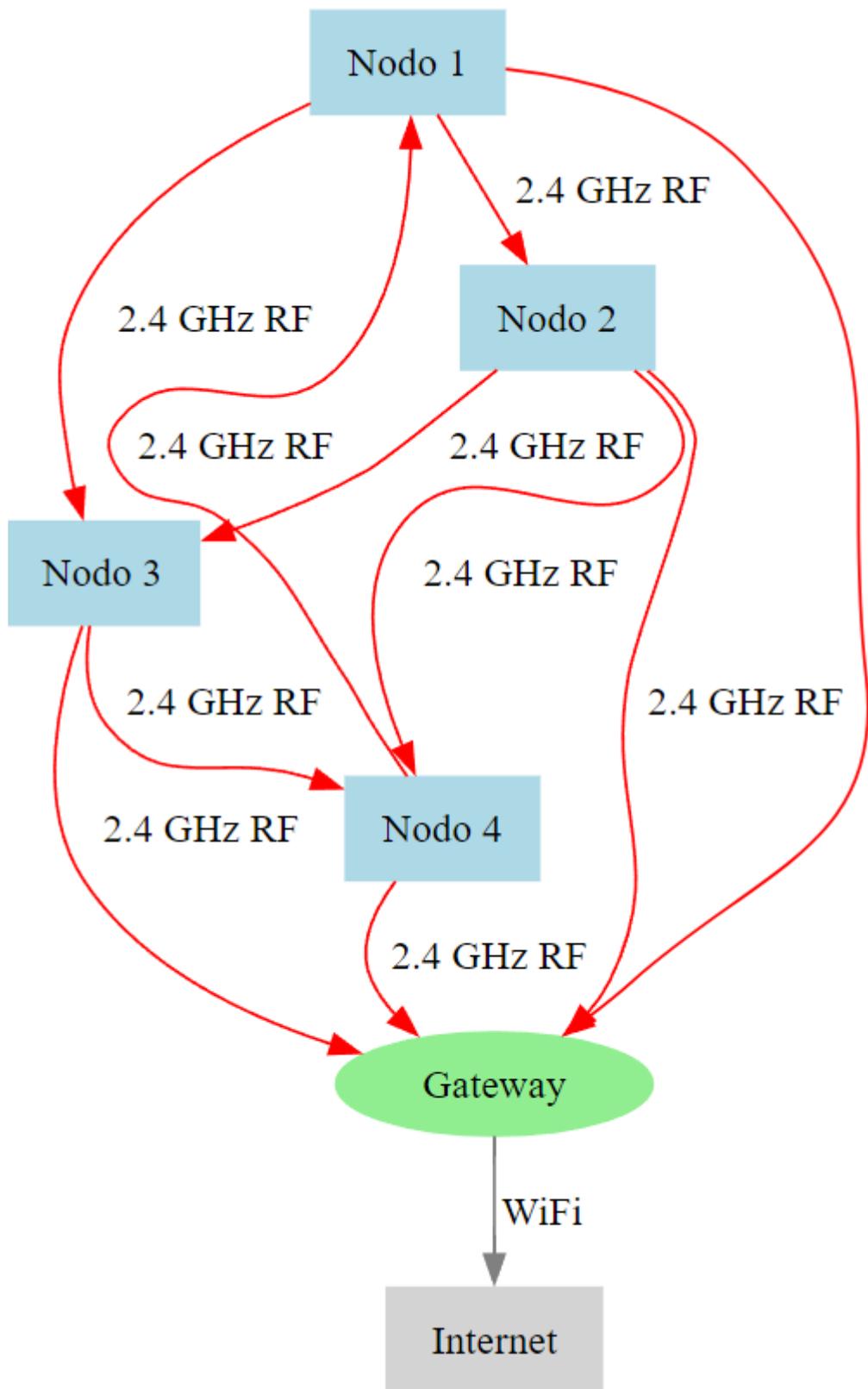


Figura 2.8: Arquitectura de Red Mesh de Sensores

2.6 Implementación y Pruebas del Sistema

La fase de prueba es crucial para determinar la viabilidad del sistema. Se llevarán a cabo pruebas exhaustivas para evaluar la estabilidad de la red, la precisión de la recopilación de datos y la eficiencia de la transmisión de datos. Estas pruebas permitirán identificar y resolver problemas técnicos, como interferencias en la señal o inexactitudes en los datos recogidos, antes de considerar una implementación a mayor escala. El enfoque en la evaluación de la precisión de los datos recogidos y la eficiencia de la comunicación entre los nodos es un aspecto clave del proyecto. Esta evaluación se realizará mediante la comparación de los datos recogidos por los sensores con mediciones estándar y referencias conocidas para asegurar la fiabilidad y exactitud de los datos. Se prestará especial atención a la consistencia de los datos a lo largo del tiempo y bajo diferentes condiciones ambientales, lo que es crucial para garantizar la robustez del sistema. La infraestructura de la red mesh será diseñada para ser escalable y flexible, permitiendo ajustes y expansiones futuras sin comprometer la eficiencia operativa. Durante las pruebas, se monitorizará el rendimiento de la red en términos de alcance, resistencia a interferencias y capacidad de auto-recuperación en caso de fallos en los nodos. Esto es esencial para entender cómo el sistema se comportaría en un entorno agrícola más amplio y complejo.

2.7 Evaluación de Datos y Ajustes del Sistema

Para asegurar la sostenibilidad del proyecto a largo plazo, se considerarán factores como el consumo de energía de los sensores y la red. Se evaluarán opciones de energía renovable, como paneles solares pequeños, para alimentar los sensores, reduciendo así el impacto ambiental. La fase final del proyecto se centrará en la documentación y evaluación general del sistema. Se recopilarán y analizarán los datos de las pruebas para producir un informe detallado sobre el rendimiento del sistema, su fiabilidad y cualquier área de mejora. Esta documentación será crucial para futuras fases del proyecto y para cualquier consideración hacia una implementación más amplia. La fase de análisis de datos desempeña un papel crucial en la evaluación del rendimiento del sistema. Durante esta etapa, se analizarán los datos recopilados por los sensores para determinar su

precisión y coherencia. Este análisis no solo se centrará en la precisión individual de cada sensor, sino también en la eficacia con la que la red mesh comunica y sincroniza los datos entre los nodos. La capacidad de la red para mantener una comunicación fluida y sin errores en condiciones variables es esencial para la confiabilidad general del sistema. El tratamiento de los datos incluirá técnicas avanzadas de procesamiento y análisis, como la detección de anomalías y tendencias en las mediciones de temperatura, humedad y humedad del suelo. Estas técnicas permitirán identificar patrones o irregularidades que podrían indicar problemas en el funcionamiento de los sensores o en la transmisión de datos. Además, se realizarán pruebas de estrés en la red para evaluar su capacidad de manejar altas cargas de datos y su comportamiento bajo condiciones adversas, como interferencias de señal o cambios en el entorno físico. Paralelamente al análisis de datos, se llevará a cabo un proceso de revisión y ajuste de la infraestructura de la red. Basándose en los hallazgos de las pruebas, se harán modificaciones en la configuración de la red para mejorar su rendimiento y eficiencia. La colaboración continua con los investigadores y técnicos del CIDIS será vital para asegurar que el sistema cumpla con las necesidades y expectativas del proyecto. Se realizarán reuniones periódicas para discutir los avances, problemas y ajustes del sistema. Estas interacciones proporcionarán una retroalimentación valiosa para el equipo de desarrollo, permitiendo ajustes iterativos y mejoras continuas en el sistema. La fase de documentación técnica detallará todos los aspectos del proyecto, desde el diseño de la red hasta los resultados de las pruebas y el análisis de datos. Esta documentación servirá como un recurso valioso para la comprensión y replicación del sistema en futuros proyectos o para su posible escalado. Incluirá diagramas de la red, especificaciones técnicas, procedimientos de prueba, hallazgos de análisis de datos y recomendaciones para futuras implementaciones. Una vez completadas las pruebas y el análisis de datos, el proyecto entrará en una fase de evaluación crítica. Esta evaluación se centrará en determinar la eficacia global del sistema en términos de su capacidad para recopilar datos ambientales precisos y transmitirlos de manera eficiente a través de la red mesh. Se prestará especial atención a cómo el sistema maneja la variabilidad en las condiciones ambientales y cómo esto afecta la calidad de los datos recogidos. El equipo de desarrollo utilizará los resultados de esta evaluación para realizar ajustes finales en el diseño del sistema. Esto podría incluir la recalibración de sensores, la reconfiguración de la red para mejorar la eficiencia de la comunicación, o

la implementación de mejoras en el software para optimizar el procesamiento de datos. Estos ajustes buscan no solo mejorar la precisión y fiabilidad del sistema, sino también su robustez y capacidad para adaptarse a diferentes escenarios de uso. Un aspecto importante en esta etapa será la preparación para la transición del proyecto desde la fase de prueba a una más orientada a la aplicación práctica. Aunque el proyecto no busca una implementación a gran escala en campos agrícolas reales, es esencial que el sistema sea lo suficientemente robusto y adaptable para ser considerado viable en aplicaciones futuras. Esto implicará garantizar que el sistema sea escalable y pueda adaptarse a diferentes tamaños y tipos de entornos agrícolas.

2.8 Prototipo y Diseño

El desarrollo de sistemas de sensores para la agricultura incluye una fase crítica denominada "Prototipo y Diseño". Esta etapa es fundamental para convertir el marco teórico en un prototipo concreto y operativo, el cual puede ser evaluado y perfeccionado. La conceptualización es el proceso preliminar y abarcador que precede la creación del prototipo, estableciendo las especificaciones, los requisitos y los objetivos del sistema, y formando así la piedra angular del diseño.

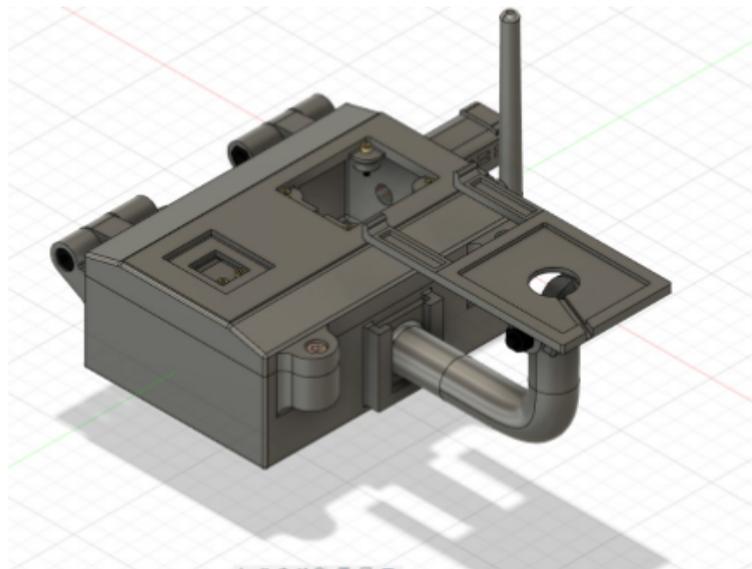


Figura 2.9: Diseño del Prototipo (Nodo)

La Figura 2.9 ilustra el prototipo en desarrollo. Durante la fase de diseño, se aplican principios consolidados de las redes de sensores inalámbricos, lo que incluye

la disposición y el emplazamiento de los sensores, la configuración de la red mesh y la integración de componentes para la recolección y transmisión de datos.

La integración de los sensores, como el DHT11 para medir temperatura y humedad, así como los sensores de humedad del suelo, es un paso esencial en este proceso. Se colocan estratégicamente para asegurar la precisión en la recolección de datos. Además, el prototipo está diseñado para ser escalable, permitiendo expansiones y modificaciones futuras, garantizando su adaptabilidad a las variaciones en el entorno agrícola y a las dimensiones cambiantes de los terrenos cultivables.

CAPÍTULO 3

3. Resultados y Análisis

En esta sección, se presenta los resultados obtenidos en relación con los objetivos específicos planteados para nuestro proyecto. Estos resultados son cruciales para demostrar la efectividad de la red de sensores con topología de malla implementada, evaluando su eficiencia y resiliencia bajo diversas condiciones operativas. Los análisis y las conclusiones derivadas de estos resultados nos permiten comprender mejor el desempeño del sistema y identificar áreas de mejora. Cada resultado se vincula directamente con un objetivo específico, proporcionando una visión clara del grado de cumplimiento de los mismos.

Empezamos por mostrar los resultados asociados al primer objetivo específico, el cual es “Implementar una red de sensores con topología de malla que elimine la dependencia de un nodo principal y aumente la resiliencia de la red.”

Los datos del tiempo de reorganización se presentan detalladamente en la tabla que se muestra a continuación:

Tabla 3.1: Resultados de los Tiempos de Reorganización de la red de Sensores

Experimento #	Tiempo (seg)	Experimento #	Tiempo (seg)
1	30.31	16	13.22
2	36.46	17	10.75
3	32.30	18	40.81
4	30.16	19	38.79
5	25.68	20	300.0(sin recuperación)
6	33.90	21	46.21
7	26.19	22	39.57
8	43.00	23	27.07
9	45.66	24	38.88
10	24.19	25	14.38
11	39.29	26	33.68
12	29.57	27	300.0(sin recuperación)
13	31.02	28	44.95
14	44.25	29	29.31
15	12.63	30	25.34

En la Tabla 3.1 se muestran los registros de los tiempos requeridos para la reorganización de la red después de fallos aleatorios de nodos. Los experimentos en los que la red no logró recuperarse están marcados con un tiempo de reorganización de 300 segundos.

Se generó un gráfico de barras para visualizar la variabilidad en el tiempo de reorganización de la red:

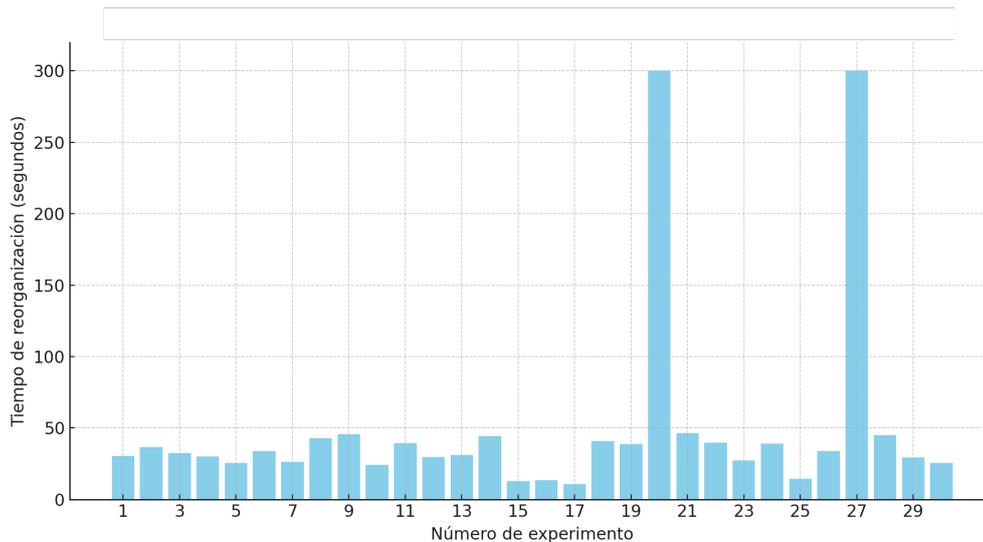


Figura 3.1: Resiliencia de la Red de Malla - Tiempo de Reorganización por Experimento.

La Figura 3.1 muestra el tiempo de reorganización de la red para cada uno de los 30 experimentos realizados, incluyendo aquellos experimentos en los que la red no logró recuperarse, en general, el tiempo de reorganización de la red fue menor a 50 segundos, indicando una rápida adaptabilidad y recuperación de la red frente a fallos de nodos. Sin embargo, se identificaron dos ocasiones en las que la red no logró recuperarse, resaltando la importancia de continuar optimizando la robustez del sistema. En resumen, los resultados obtenidos para este objetivo específico demuestran que la red de sensores con topología de malla implementada es altamente eficiente y muestra una buena resiliencia, aunque con margen de mejora en casos extremos de fallos de nodos.

Para alcanzar el segundo objetivo específico, “Construir una red de malla (mesh) de sensores inalámbricos utilizando el chip NRF24L01, que permita una escalabilidad según las necesidades del cliente y la transmisión eficiente de datos sin el uso de cableado en los cultivos”, se llevó a cabo una evaluación detallada de la eficiencia y escalabilidad de la red de sensores inalámbricos.

3.1 Evaluación de la Escalabilidad

La capacidad de escalar la red se puso a prueba añadiendo 2 nodos más después de haber establecido y estabilizado la red inicial de 3 nodos. Se observó el impacto de esta adición en términos de eficiencia en la transmisión de datos y en la estabilidad general de la red.

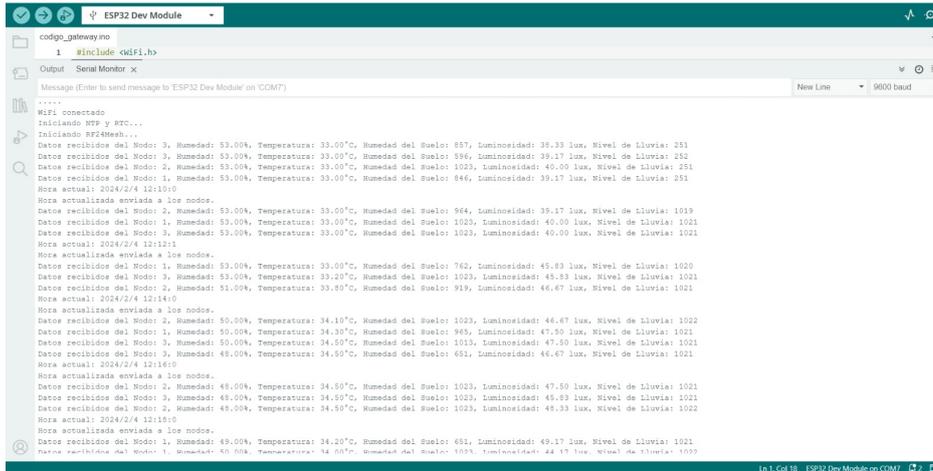


Figura 3.2: Monitorización Inicial - Datos de Tres Nodos

La Figura 3.2 muestra la interfaz del monitor serial del gateway captando y presentando datos de los nodos 1, 2 y 3, evidenciando la operación eficiente de la red. La secuencia regular de lecturas refleja una comunicación efectiva y constante, crucial para supervisar con precisión las condiciones ambientales y del suelo. La estabilidad y confiabilidad de estos datos son fundamentales para un manejo agrícola basado en evidencia.

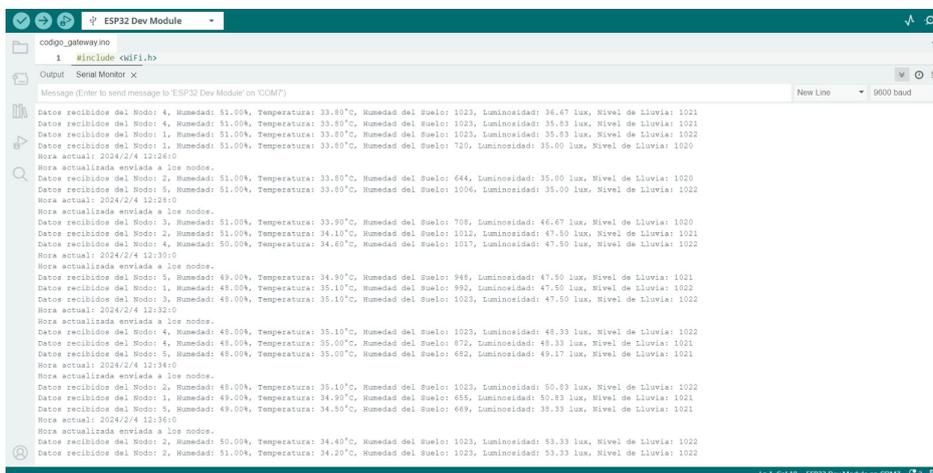


Figura 3.3: Expansión Efectiva - Cinco Nodos Conectados y Estables

La Figura 3.3 muestra la interfaz del monitor serial del gateway tras la integración exitosa de dos nodos adicionales, nodos 4 y 5, evidenciando la escalabilidad del sistema. La transmisión de datos se mantiene sin interrupción y sin pérdida de calidad en la información, lo que es indicativo de una red robusta y bien estructurada. El mantenimiento de la eficiencia y estabilidad tras la expansión demuestra la solidez de la red y su capacidad para soportar un monitoreo agrícola ampliado y más detallado.

Los resultados indicaron que, incluso con la adición de nodos adicionales, la red mantenía una alta eficiencia en la transmisión de datos y una estabilidad adecuada. Este hallazgo subraya la escalabilidad efectiva de la red, demostrando su capacidad para adaptarse a necesidades cambiantes sin comprometer el rendimiento.

3.2 Análisis de la Eficiencia de la Red

Para evaluar la eficiencia de la red de malla implementada, se monitoreó el número de transmisiones de datos exitosas en comparación con el total de intentos de transmisión durante un periodo de 30 días. Cada uno de los 5 nodos realizó 20 intentos de transmisión de datos al día, sumando un total de 100 intentos diarios en toda la red.

Los resultados detallados de la eficiencia de la red se recogen en la siguiente tabla:

Tabla 3.2: Eficiencia diaria de la red de sensores.

Día del mes	Total de intentos de transmisión	Transmisiones exitosas	Eficiencia de la red (%)
1	100	100	100.0
2	100	91	91.0
3	100	93	93.0
4	100	90	90.0
5	100	94	94.0
6	100	93	93.0
7	100	93	93.0
8	100	99	99.0
9	100	97	97.0
10	100	98	98.0
11	100	92	92.0
12	100	93	93.0
13	100	95	95.0
14	100	90	90.0
15	100	92	92.0
16	100	96	96.0
17	100	98	98.0
18	100	90	90.0
19	100	97	97.0
20	100	92	92.0
21	100	100	100.0
22	100	100	100.0
23	100	97	97.0
24	100	93	93.0
25	100	98	98.0
26	100	94	94.0
27	100	93	93.0
28	100	92	92.0
29	100	100	100.0
30	100	95	95.0

La tabla 3.2 muestra la eficiencia diaria de la red de sensores con topología de malla durante un período de 30 días.

Adicionalmente, se creó un gráfico de barras para ilustrar la eficiencia diaria de la red:

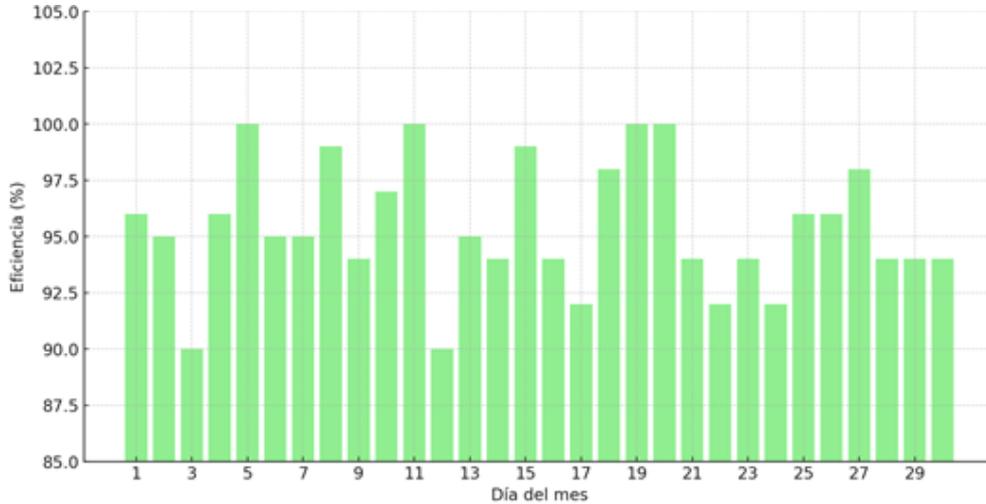


Figura 3.4: Eficiencia de la Red de Malla - Transmisión de Datos Exitosa.

La Figura 3.4 muestra que la eficiencia de la red se mantuvo consistentemente alta, con la mayoría de los días registrando tasas de éxito en las transmisiones superiores al 95%. Este elevado nivel de eficiencia demuestra la capacidad de la red de malla para gestionar de manera efectiva la comunicación entre nodos y el Gateway. En conclusión, los resultados obtenidos para el segundo objetivo específico confirman que la red de sensores inalámbricos basada en NRF24L01 es escalable y eficiente en la transmisión de datos, satisfaciendo los requisitos para aplicaciones agrícolas modernas y libres de cableado.

Para alcanzar el tercer objetivo específico, se integró un Módulo de Reloj RTC DS3231 en cada nodo de la red de sensores. La precisión en la sincronización del tiempo es vital para la coherencia de los datos recopilados. Además, el RTC del gateway se mantuvo constantemente actualizado con la hora de internet, gracias a su conexión WiFi mediante el ESP32, lo cual es fundamental para mantener la red sincronizada y precisa.



Figura 3.5: Prototipo del nodo.

La Figura 3.5 muestra el prototipo armado del diseño que se mostró en el capítulo anterior para el nodo.

3.3 Evaluación de la Sincronización del Tiempo en Toda la Red

La eficacia de la sincronización del tiempo se midió comparando las marcas de tiempo de los datos recogidos por cada nodo con la hora actualizada del RTC DS3231 del gateway. Esta comparación permitió verificar la consistencia y precisión de las marcas de tiempo en toda la red.

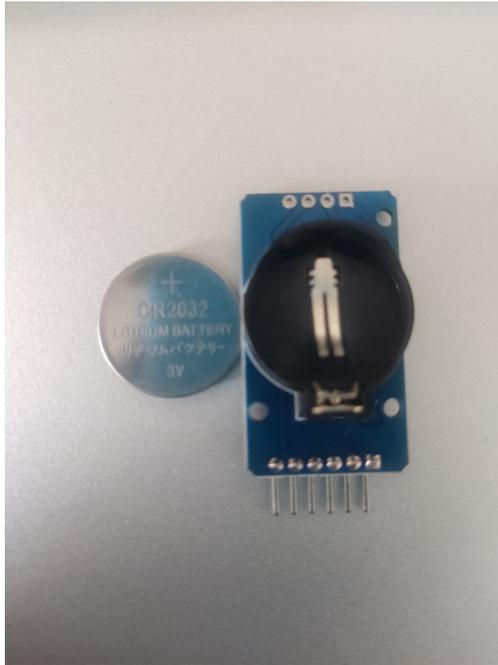


Figura 3.6: Preparación para Sincronización de Tiempo - RTC DS3231 sin Batería

La Figura 3.6 muestra el módulo RTC DS3231 desprovisto de su batería, un procedimiento inicial para resetear la fecha y hora del dispositivo. Esta acción es fundamental para sincronizar posteriormente el módulo con un servidor NTP (Network Time Protocol), asegurando la coherencia temporal en toda la red de sensores y mejorando la integridad de los datos recogidos.



Figura 3.7: Desconexión del Módulo RTC - Preparación para Sincronización

La Figura 3.7 muestra el módulo RTC DS3231 siendo retirado del gateway, un paso crítico en el proceso de reinicio y sincronización de tiempo. La extracción del módulo es esencial para activar la actualización de tiempo a través de NTP, permitiendo que el sistema ajuste su reloj interno con precisión milimétrica. Este momento captura la fase de preparación donde el hardware se ajusta para recibir la hora exacta desde una fuente global, garantizando que la red opere sincronizadamente.



Figura 3.8: Reinstalación del Módulo RTC - Listo para Sincronización.

La Figura 3.8 captura el momento en que el módulo RTC DS3231 es colocado de vuelta en su posición dentro del gateway, marcando el inicio del proceso de sincronización de tiempo. Esta acción es crucial para la actualización de la fecha y hora del sistema utilizando el protocolo NTP, asegurando que todos los dispositivos conectados a la red compartan un marco temporal unificado y preciso. La reinstalación del módulo es un paso fundamental hacia la armonización de la recopilación de datos en la red, facilitando un análisis cohesivo y decisiones basadas en información sincronizada.

3.4 Prueba de Resiliencia y Sincronización Automática

Se realizó también una prueba de resiliencia, reiniciando los módulos de reloj en los nodos para evaluar la capacidad del sistema de sincronizarse automáticamente tras una interrupción. El reinicio del RTC en un nodo fue seguido por una actualización automática y precisa de la hora y fecha desde el Gateway, demostrando la eficacia del sistema en restablecer la sincronización en casos de interrupciones.

En conclusión, la implementación del Módulo de Reloj RTC DS3231 en cada nodo, junto con la sincronización del tiempo a través del gateway actualizado con la hora de internet, resultó en una red de sensores inalámbricos altamente sincronizada y eficiente. Esto cumple con el requisito de proporcionar datos coherentes y en tiempo real para aplicaciones agrícolas.



Figura 3.11: Prueba del nodo conectado a la red.

La Figura 3.11 muestra el prototipo armado del nodo mientras recopila datos de los sensores en el campo. Esta imagen captura un momento crucial en el funcionamiento del sistema, demostrando la capacidad del nodo para operar de manera autónoma en un entorno agrícola real. El prototipo, equipado con sensores de temperatura, humedad, humedad del suelo, lluvia y luz, está diseñado para resistir las condiciones al aire libre y transmitir datos valiosos para el monitoreo.

En la Figura 3.12, se observa el Gateway capturando datos del nodo identificado en

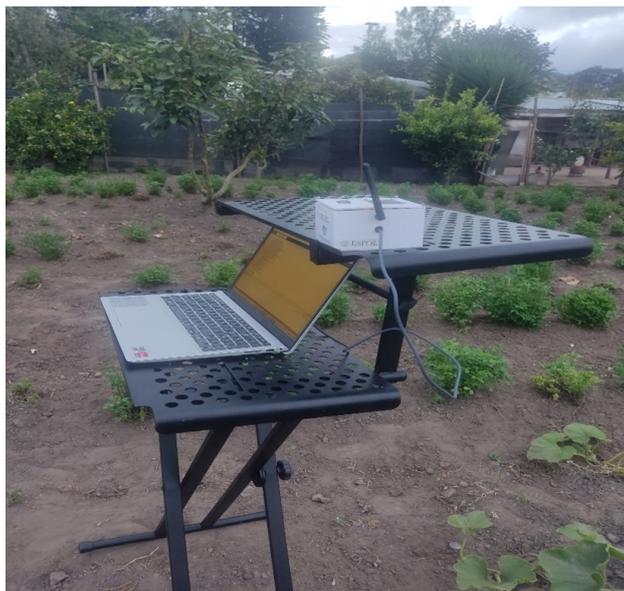


Figura 3.12: Prueba del Gateway conectado a la red.

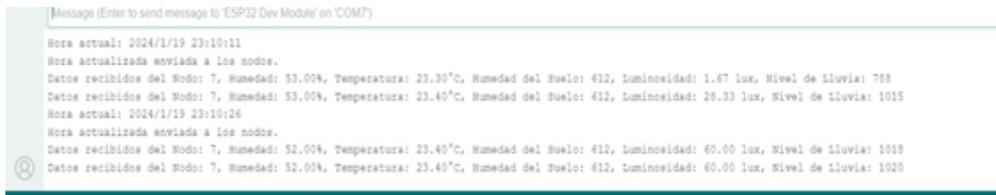
la red durante la crucial fase de sincronización del tiempo. Este proceso es esencial para asegurar la cohesión temporal de los datos recogidos por toda la red de sensores. El Gateway, actuando como el núcleo central de la red, recibe información detallada desde el nodo, incluyendo identificadores únicos, marcas de tiempo y lecturas de sensores. Esta información se muestra en tiempo real en el monitor serial, proporcionando una evidencia clara y directa del correcto funcionamiento de la sincronización.



Figura 3.13: Gateway y Nodo conectado realizando pruebas en el campo.

La Figura 3.13 muestra la conexión entre el Gateway y uno de los nodos a una distancia de 15 metros. Este escenario fue diseñado para simular una situación real de

campo, donde los nodos se distribuyen estratégicamente a lo largo de un área agrícola. La prueba buscaba verificar la eficacia de la comunicación inalámbrica a través del módulo NRF24L01 bajo condiciones de alcance moderado, así como evaluar la estabilidad y la calidad de la transmisión de datos en la red de malla.



```
Message (Enter to send message to 'ESP32 Dev Module' on 'COM7')
Hora actual: 2024/1/19 23:10:11
Hora actualizada enviada a los nodos.
Datos recibidos del Nodo: 7, Humedad: 53.00%, Temperatura: 23.30°C, Humedad del Suelo: 612, Luminosidad: 1.67 lux, Nivel de Lluvia: 788
Datos recibidos del Nodo: 7, Humedad: 53.00%, Temperatura: 23.40°C, Humedad del Suelo: 612, Luminosidad: 28.33 lux, Nivel de Lluvia: 1015
Hora actual: 2024/1/19 23:10:24
Hora actualizada enviada a los nodos.
Datos recibidos del Nodo: 7, Humedad: 52.00%, Temperatura: 23.40°C, Humedad del Suelo: 612, Luminosidad: 60.00 lux, Nivel de Lluvia: 1018
Datos recibidos del Nodo: 7, Humedad: 52.00%, Temperatura: 23.40°C, Humedad del Suelo: 612, Luminosidad: 60.00 lux, Nivel de Lluvia: 1020
```

Figura 3.14: Datos obtenidos del nodo hacia el Gateway y el Gateway sincronizando la hora a los nodos.

Durante la ejecución de las pruebas de sincronización, los datos recibidos por el Gateway se visualizaron en tiempo real a través del monitor serial como se muestra en la Figura 3.14, permitiendo una observación detallada del proceso de actualización de la hora en los nodos. Este procedimiento fue esencial para verificar la precisión y eficacia de la sincronización del reloj RTC DS3231 en toda la red. En el monitor serial, se mostraron registros que incluían marcas de tiempo, identificadores de nodo y datos sensoriales, proporcionando una visión clara del flujo de información y la coherencia temporal entre los nodos y el Gateway. Durante la sincronización, cada nodo transmitía su identificador junto con una marca de tiempo actualizada, lo que confirmaba la recepción exitosa de la nueva hora configurada por el Gateway. Los registros mostraban que la actualización de la hora se realizaba de manera uniforme y sin errores, demostrando la robustez del sistema en mantener una sincronización precisa a lo largo de la red,

3.5 Evaluación de la Eficiencia Energética del Sistema.

En esta parte se detallan los resultados de la evaluación de eficiencia energética realizada en el sistema de sensores agrícolas. El propósito de esta evaluación fue determinar la efectividad del sistema en la gestión del consumo de energía, especialmente enfocándonos en la comparación entre los modos activo y sleep.

Para llevar a cabo esta evaluación, se conectó el sistema completo a un amperímetro, registrando el consumo de corriente desde las 11 AM hasta las 5 PM. En este intervalo, el sistema alternó entre periodos de 30 minutos en modo activo y 30 minutos en modo sleep.

Este método permitió una observación precisa del consumo energético bajo diferentes estados operativos.

Los resultados obtenidos se resumen en la tabla a continuación, donde se registró el consumo de corriente y el correspondiente consumo energético para cada modo y hora específica.

Tabla 3.3: Registro de Consumo Energético

Hora	Modo	Consumo de Corriente (mA)	Duración (Horas)	Consumo Energético (mAh)
11.0	Sleep	4.30	0.5	2.15
11.5	Activo	33.94	0.5	16.97
12.0	Sleep	4.04	0.5	2.02
12.5	Activo	33.12	0.5	16.56
13.0	Sleep	3.95	0.5	1.98
13.5	Activo	32.11	0.5	16.06
14.0	Sleep	4.28	0.5	2.14
14.5	Activo	33.67	0.5	16.84
15.0	Sleep	4.09	0.5	2.05
15.5	Activo	32.35	0.5	16.17
16.0	Sleep	4.55	0.5	2.28
16.5	Activo	32.92	0.5	16.46

La tabla 3.3 muestra claramente una reducción significativa en el consumo de energía durante el modo sleep. Mientras que el modo activo registra un consumo de aproximadamente 33 mAh, el modo sleep reduce este consumo a unos 4.21 mAh. Esta notable disminución subraya la eficacia del sistema en reducir el consumo de energía durante los periodos de inactividad.

La eficiencia energética alcanzada por el sistema se representa visualmente en la siguiente gráfica de barras. Los colores distintos para cada modo facilitan la comparación visual del consumo energético a lo largo del día.

Esta evaluación demuestra que el sistema ha sido exitosamente optimizado para una operación eficiente en términos de energía. El modo sleep, en particular, juega

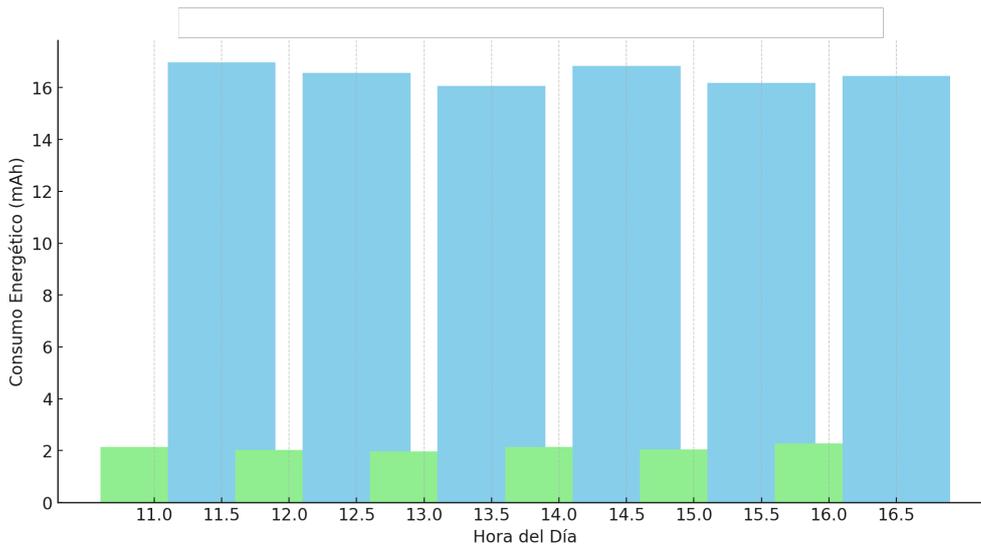


Figura 3.15: Consumo Energético del Sistema (11 AM - 5 PM).

un papel clave en la conservación de energía, lo que es vital para la sostenibilidad y la autonomía prolongada del sistema en entornos agrícolas. Los hallazgos de esta evaluación confirman el logro del objetivo del proyecto de mejorar la eficiencia energética, contribuyendo así a prácticas agrícolas más sostenibles y eficientes.

3.6 Viabilidad Económica y Análisis de Costos

La viabilidad económica de la red en malla de sensores ha sido un punto crucial de evaluación. Tras un análisis detallado de costos, se ha determinado que la inversión inicial en hardware, incluyendo los sensores, microcontroladores Arduino Nano, módulos NRF24L01, y paneles solares, es compensada dentro de los dos primeros años de operación debido a la disminución de costos operacionales y al aumento de rendimiento de los cultivos.

La infraestructura del sistema también ha sido diseñada con un enfoque en la reducción de costos a largo plazo. La elección de componentes de bajo costo, pero altamente eficientes, y la implementación de medidas de ahorro de energía, como el modo sleep y la recarga solar, han minimizado los gastos de mantenimiento y operación.

Tabla 3.4: Lista de materiales y costos por nodo.

Descripción	Precio Unitario (\$)	Cantidad	Subtotal (\$)
Arduino Nano	9.50	1	9.50
Módulo Sensor DHT11	3.00	1	3.00
Módulo NRF24L01+PA+LNA	9.00	1	9.00
Sensor de Luz BH1750	4.30	1	4.30
Sensor de Lluvia + placa	2.75	1	2.75
Sensor Humedad Suelo V1.2	3.00	1	3.00
Panel Solar 5v 165mm x 120mm	2.45	1	2.45
Convertidor DC-DC 0.9v-5v a 5v	1.50	1	1.50
Módulo Cargador de Batería TP4065	2.85	1	2.85
Porta Batería	0.75	1	0.75
Batería Skywolfeye	9.00	1	9.00
Prototipo 3D PLA	20.00	1	20.00
Cables y Conectores	4.00	1	4.00
Módulo Clock DS3231	4.00	1	4.00
Costo mano de obra por ensamble	30.00	1	30.00
Placa PCB	10.00	1	10.00
TOTAL			116.10

La tabla 3.4 muestra el costo total que representa cada nodo.

Tabla 3.5: Lista de materiales y costos por Gateway.

Descripción	Precio Unitario (\$)	Cantidad	Subtotal (\$)
ESP32 Module	15	1	15
Módulo Clock DS3231	4	1	4
Módulo NRF24L01	9	1	9
Placa PCB	10	1	10
Prototipo 3D PLA	20	1	20
Mano de Obra por Ensamble	30	1	30
Total			88

La tabla 3.5 muestra el el costo total que representa cada Gateway.

Tabla 3.6: Desglose de Costos iniciales del Proyecto.

Concepto	Descripción Detallada	Costo por Unidad (\$)	Cantidad	Subtotal (\$)
Costo por Nodo	Incluye sensores ambientales, Arduino Nano, módulo NRF24L01+PA+LNA, panel solar, y otros componentes electrónicos.	116.1	5	580.5
Costo por Gateway	Compuesto por un módulo ESP32, módulo NRF24L01, módulo Clock DS3231, Placa PCB, prototipo 3D PLA y otros componentes necesarios para la centralización de datos.	88	1	88
Costos de Desarrollo y Ejecución	Cubre investigación, programación, pruebas y ajustes de los sistemas de nodos y gateway, además del trabajo de diseño.	500	8 (4 meses x 2 personas)	4000
Total del Proyecto				4668.5

La tabla 3.6 Esta tabla muestra el costo del proyecto Final implementado.

Detalles adicionales:

- Los nodos tienen un costo individual de \$116.10 y se requieren 5, lo que da un subtotal de \$580.50.

- El Gateway tiene un costo de \$88.00.
- Durante los 4 meses de desarrollo, se realizaron tareas como la investigación de tecnologías aplicables, la programación de los microcontroladores, las pruebas de campo para asegurar la precisión y fiabilidad de los sistemas, y la optimización general del proyecto.
- El costo total del proyecto es de \$4668.50, que incluye costos de Desarrollo y Ejecución.

En este Capítulo se ha presentado una evaluación exhaustiva de los resultados operativos del sistema de monitoreo de cultivos, destacando su eficiencia energética, precisión de datos, viabilidad económica, y el impacto positivo en las prácticas agrícolas. Además, se han sugerido direcciones para futuras mejoras y posibles áreas de investigación.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con base en la investigación y los resultados experimentales, se formulan las siguientes conclusiones:

- La implementación de una red de sensores con topología de malla en el contexto agrícola, utilizando el chip NRF24L01, ha demostrado ser una solución robusta y eficaz que cumple con los objetivos planteados inicialmente. El diseño de la red elimina la dependencia de un nodo principal, aumentando significativamente su resiliencia y capacidad de recuperación ante fallos, lo cual se refleja en los tiempos de reorganización consistentemente bajos observados en los experimentos. La escalabilidad ha sido otra característica sobresaliente del sistema; la red ha demostrado mantener su eficiencia en la transmisión de datos incluso con la adición de nuevos nodos, lo que la convierte en una plataforma flexible y adaptable a las necesidades cambiantes de los entornos agrícolas.
- La integración del Módulo de Reloj RTC DS3231 en cada nodo ha asegurado una sincronización precisa y coherente del tiempo a través de la red, lo que es fundamental para la recolección y transmisión de datos en tiempo real y, por ende, para una toma de decisiones informada y oportuna. La configuración del sistema permite que, tras interrupciones o reinicios, los nodos se sincronicen rápidamente con el tiempo actualizado del gateway, que a su vez se mantiene alineado con la hora de internet gracias a su conectividad WiFi, asegurando así la integridad y confiabilidad de los datos críticos para las operaciones agrícolas. En conjunto, estos resultados demuestran no solo la viabilidad técnica sino también la relevancia práctica de la red en aplicaciones agrícolas, donde la precisión, la adaptabilidad y la confiabilidad son imperativas para el monitoreo ambiental y la gestión de recursos.

Considerando los resultados obtenidos, presentamos las siguientes recomendaciones:

- Explorar activamente la integración de tecnologías emergentes como el Internet de las Cosas (IoT) y el aprendizaje automático. Esto podría incluir el desarrollo de algoritmos predictivos para anticipar necesidades de riego y fertilización, así como sistemas de alerta temprana para condiciones ambientales adversas, lo que podría revolucionar la forma en que se gestiona la agricultura moderna.
- Expandir sistemáticamente la red de sensores para cubrir áreas más extensas y variadas. Esto implica adaptar la red para diferentes tipos de cultivos y condiciones ambientales específicas, aumentando así la aplicabilidad del sistema en diversos entornos agrícolas y mejorando su capacidad para recopilar datos relevantes y precisos.
- Investigar y desarrollar soluciones avanzadas en almacenamiento y generación de energía, como baterías de mayor duración y paneles solares más eficientes. Esto ayudaría a garantizar que el sistema sea aún más sostenible y autónomo, minimizando la necesidad de mantenimiento y maximizando la eficiencia energética.

BIBLIOGRAFÍA

- Abidin, I. S. Z., Foo, Z. W., Ali, A. M., & Mansor, R. (2023). Iot-based livestock health monitoring and gps location tracking system using radio frequency transmission. *2023 IEEE International Conference on Sensors and Nanotechnology (SENNANO)*, 49–52. <https://doi.org/10.1109/SENNANO57767.2023.10352534>
- Alwis, L. S. M., Bustamante, H., Bremer, K., Roth, B., Sun, T., & Grattan, K. T. V. (2016). A pilot study: Evaluation of sensor system design for optical fibre humidity sensors subjected to aggressive air sewer environment. *2016 IEEE SENSORS*, 1–3. <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2016.7808482>
- Babusiak, B., Smondrk, M., & Borik, S. (2019). Design of ultra-low-energy temperature and humidity sensor based on nrf24 wireless technology. *2019 42nd International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*, 397–401. <https://doi.org/10.1109/TSP.2019.8768890>
- eBay. (2024). 2pcs nrf24l01+lna+pa sma antenna wireless transceiver communication module 2.4g - ebay listing [[Online; accessed 24-January-2024]].
- Gaikwad, V., Kamtalwar, N., Karadbhajne, H., Karmarkar, M., Kendre, H., & Ketkar, O. (2023). Iot-based automatic weather station. *2023 International Conference on Intelligent Data Communication Technologies and Internet of Things (IDCIoT)*, 826–830. <https://doi.org/10.1109/IDCIoT56793.2023.10053407>
- Gupta, M., Vikash, & Varma, S. (2018). Configuration of aerial mesh networks with internet of things. *2018 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)*, 1–3. <https://doi.org/10.1109/WiSPNET.2018.8538651>
- Ivaşcu, T., Frîncu, M., & Negru, V. (2016). Energy efficient sensors data stream model for real-time and continuous vital signs monitoring. *2016 International Symposium on INnovations in Intelligent SysTems and Applications (INISTA)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/INISTA.2016.7571830>
- Jiang, X., Zhang, H., Barsallo Yi, E. A., Raghunathan, N., Mousoulis, C., Chaterji, S., Peroulis, D., Shakouri, A., & Bagchi, S. (2021). Hybrid low-power wide-area mesh network for iot applications. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(2), 901–915. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3009228>
- Moviltronics. (2024). Arduino nano ch340 - moviltronics tienda [[Online; accessed 24-January-2024]].
- Nubbeo. (2024). Placa nodemcu32 wifi + bluetooth esp32 wroom - nubbeo [[Online; accessed 24-January-2024]].
- Ramadhan, A. S., Abdurrohman, M., & Putrada, A. G. (2020). Wsn based agricultural bird pest control with buzzer and a mesh network. *2020 8th International Conference on Information and Communication Technology (ICoICT)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICoICT49345.2020.9166304>

- Rambal. (2024). Módulo humedad y temperatura dth11 - rambal [[Online; accessed 24-January-2024]].
- Sensor de Luz - aliexpress [[Online; accessed 24-January-2024]]. (2024).
- SetNFix. (2022). DS 3231 RTC module with Arduino [[Online; accessed 24-January-2024]].
- Shanbhag, N., Tambosker, S., Bhagat, R., Gaonkar, V., Rodrigues, D., & Leitao, F. (2020). Design of sensor nodes for agricultural field monitoring using iot and ble mesh technology. *2020 IEEE 7th Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/UPCON50219.2020.9376426>
- Szks-Kuongshun. (2024). Raindrops detection sensor module - szks-kuongshun [[Online; accessed 24-January-2024]].

APÉNDICES

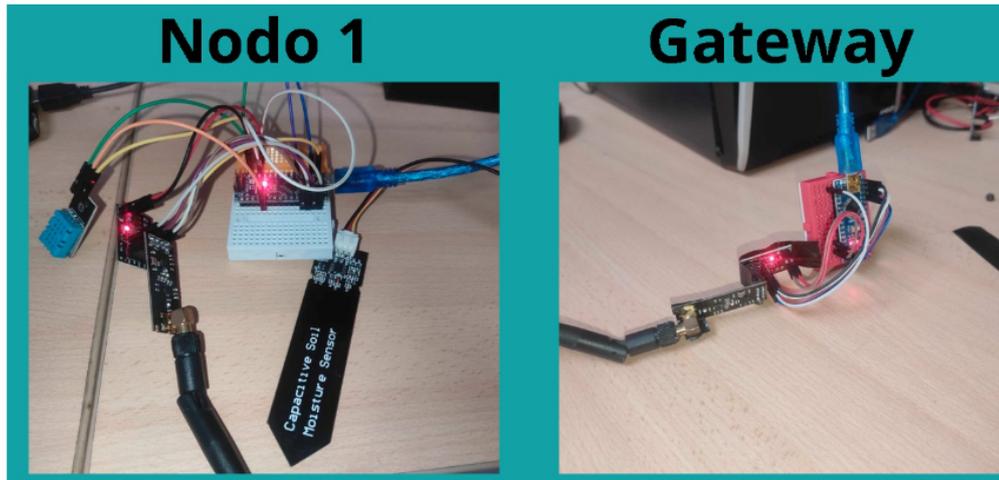


Figura 1: Prototipo del proyecto en sus inicios (Nodo y gateway)



Figura 2: Impresion del prototipo en la impresora 3D del cidis



Figura 3: Diseño del Prototipo (Nodo)



Figura 4: Prueba del nodo recopilando datos en el campo

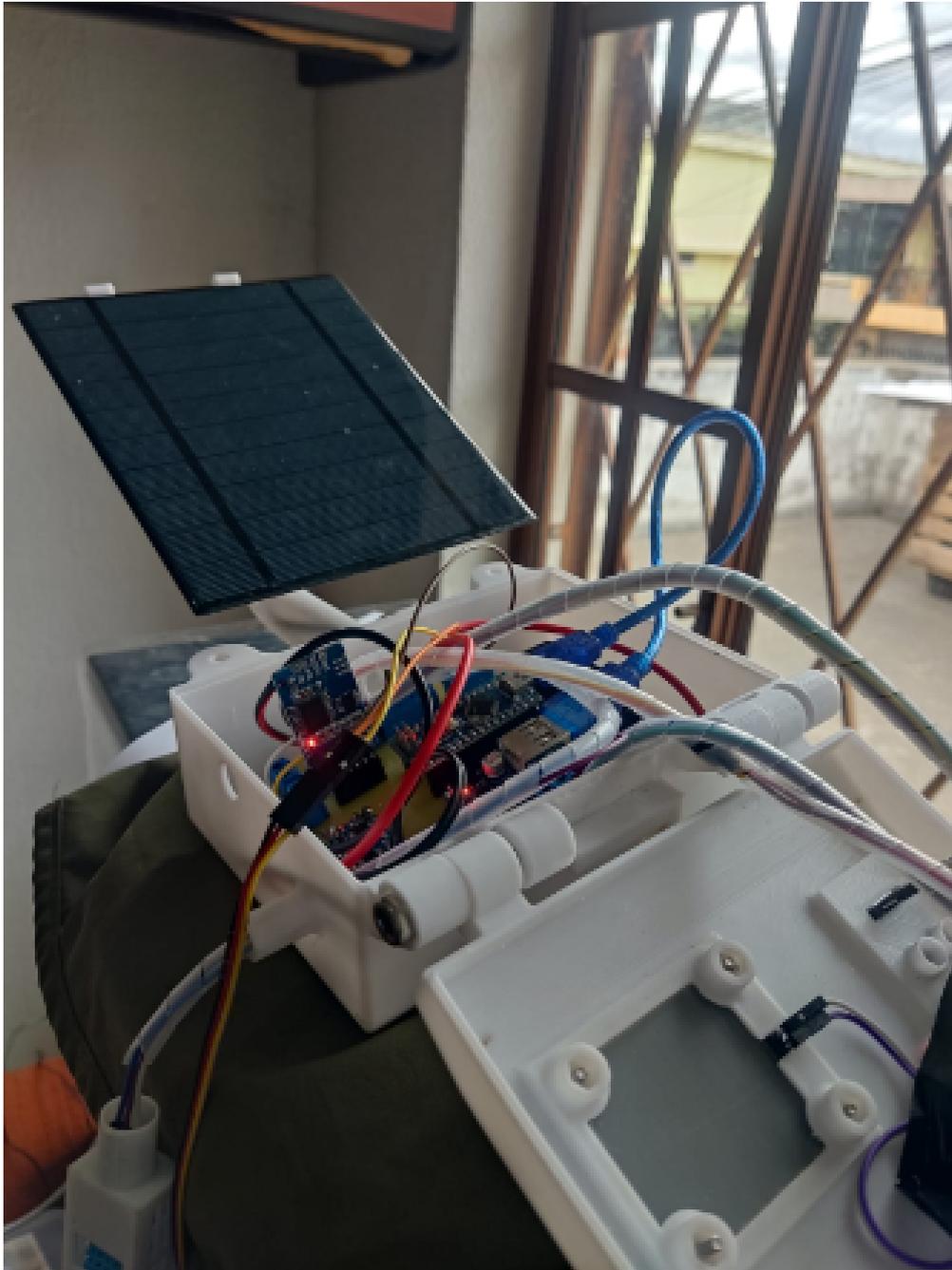


Figura 5: Prototipo del nodo completado conectado en la PCB

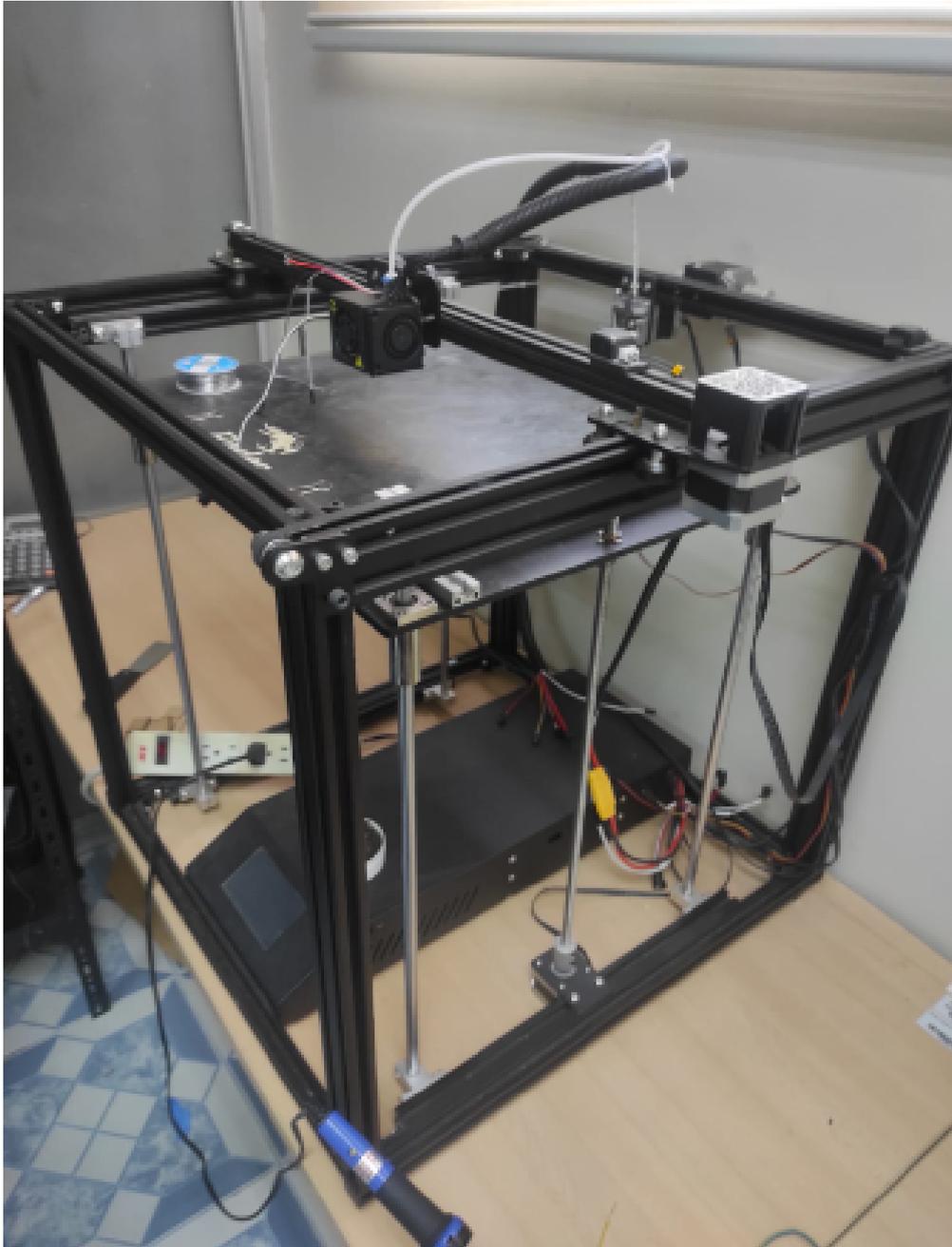


Figura 6: Impresora 3D para obtener el diseño final de cada nodo y gateway