
Diseño e implementación de una interfaz de medición y control de condiciones ambientales en un invernadero a escala para el cultivo de hortalizas tipo C3

Jeferson Ezequiel Noj Cifuentes



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Diseño e implementación de una interfaz de medición y control de condiciones ambientales en un invernadero a escala para el cultivo de hortalizas tipo C3

Trabajo de graduación presentado por Jeferson Ezequiel Noj Cifuentes para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

2024

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería




Diseño e implementación de una interfaz de medición y control de condiciones ambientales en un invernadero a escala para el cultivo de hortalizas tipo C3

Trabajo de graduación presentado por Jeferson Ezequiel Noj Cifuentes para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica


Guatemala,

2024

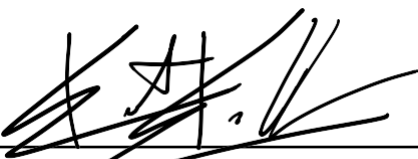
Vo.Bo.:

(f) 
M. Sc. Carlos Esquit

Tribunal Examinador:

(f) 
M.Sc. Carlos Esquit

(f) 
M. Sc. Miguel Enrique Zea Arenales

(f) 
Ing. Kurt Emmanuel Kellner

Fecha de aprobación: Guatemala, 13 de febrero de 2025

La elaboración de este trabajo de graduación ha sido un viaje de aprendizaje, dedicación e incluso superación personal. Desde el inicio, el desafío de investigar y desarrollar este proyecto representó una oportunidad para profundizar y poner en práctica el conocimiento adquirido a lo largo de mi formación académica.

Durante todo el proceso, encontré obstáculos que requirieron paciencia y perseverancia, sin embargo, cada uno de esos obstáculos también significó un crecimiento intelectual y profesional. La investigación presentada en este documento es el resultado de meses de esfuerzo, cuyo objetivo es aportar valor al campo de estudio y abrir nuevas perspectivas para futuras investigaciones.

La culminación de este trabajo no habría sido posible sin el apoyo y la orientación de las personas a mi alrededor. Agradezco principalmente a Dios por la oportunidad de haber iniciado y desarrollado el proyecto, agradezco también a mi asesor por su guía y consejos, así como a mi familia y amigos por su apoyo y motivación en cada etapa del trabajo realizado.

Espero que este trabajo contribuya al conocimiento en la materia y que sirva de inspiración para otros estudiantes e investigadores interesados en explorar el mundo del Internet de las Cosas.

Prefacio	III
Lista de figuras	IX
Lista de cuadros	X
Resumen	XI
Abstract	XII
1. Introducción	1
2. Antecedentes	2
2.1. Sistema de transmisión inalámbrico de largo alcance	2
2.2. Implementación de una red de sensores inalámbricos para el monitoreo de variables físicas en cultivos hidropónicos mediante tecnología LoRa	3
2.3. Diseño de una red inalámbrica de baja potencia para la agricultura de precisión en la “Finca La Habana” - Villa Rica, Cauca	5
3. Justificación	6
4. Objetivos	8
4.1. Objetivo general	8
4.2. Objetivos específicos	8
5. Alcance	9
6. Marco teórico	10
6.1. Invernaderos	10
6.1.1. Características generales	11
6.1.2. Modelos de invernadero	13
6.2. Hortalizas	15
6.2.1. Clasificación por eficiencia en la fotosíntesis [14]	15
6.2.2. Condiciones ambientales y estrés en los cultivos	17

6.3. Internet de las cosas [15]	19
6.3.1. Tecnologías de comunicación inalámbrica	19
6.4. LoRa [15]	21
6.4.1. The LoRa Alliance	21
6.4.2. LoRa y LoRaWAN	22
6.4.3. Arquitectura LoRaWAN [15]	23
6.4.4. Flujo de datos en una red LoRaWAN	26
6.4.5. Factor de Dispersión [15]	26
6.4.6. Indicadores de calidad de señal [16]	27
6.4.7. Pérdida de trayectoria	28
6.5. Free RTOS [17]	30
6.5.1. Propiedades	31
6.5.2. <i>Queues</i>	31
6.6. ESP-IDF [18]	32
6.7. The Things Network [19]	33
6.7.1. The Things Stack	34
6.7.2. Ubidots	34
7. Requerimientos de diseño	35
7.1. Selección de características	35
7.2. Selección de componentes	36
7.2.1. Sensores	36
7.2.2. Actuadores	38
7.2.3. Microcontrolador	41
7.2.4. Comunicación LoRa	42
8. Diseño de la interfaz de medición y control	45
8.1. Diagrama de bloques	45
8.1.1. Alimentación	46
8.1.2. Medición	47
8.1.3. Control	48
8.1.4. Transmisión	49
8.2. Placa de circuito impreso (PCB)	49
8.2.1. Diseño y fabricación	49
8.2.2. Soldadura de componentes	53
8.3. Firmware	55
8.3.1. Lectura del ADC	55
8.3.2. Entradas y salidas digitales	56
8.3.3. Comunicación I2C	57
8.3.4. Monitoreo y control	60
8.3.5. Transmisión de datos	60
9. Diseño y construcción del invernadero a escala	63
9.1. Estructura	64
9.2. Sistema de riego	66
9.3. Sistema de ventilación	67
9.4. Sistema de sombra	68

10. Implementacion	72
10.1. Monitoreo y control	72
10.2. Transmicion de datos a la nube	74
10.3. Despliegue en la interfaz grafica	75
10.4. Rangos de transmicion	76
10.4.1. Pruebas en ciudad	76
10.4.2. Pruebas en campo abierto	81
11. Conclusiones	85
12. Recomendaciones	86
13. Bibliografia	87

Lista de figuras

1. Prototipo del sistema implementado por José Ochoa, el bombillo simula la alarma de emergencia. [1]	3
2. Implementación del nodo final para el monitoreo del cultivo hidropónico. [2]	4
3. Interfaz gráfica implementada para el monitoreo del cultivo hidropónico	4
4. Circuito del <i>gateway</i> implementado en la red de baja potencia. [3]	5
5. Cubierta traslúcida de un invernadero	11
6. Ejemplo de estructura de un invernadero	11
7. Ejemplo de calefactor en un invernadero	12
8. Ejemplo de nebulizador para invernadero	12
9. Sistema de ventilación de un invernadero	12
10. Sistema de riego por aspersión	13
11. Invernadero tipo túnel	13
12. Invernadero tipo capilla	14
13. Invernadero tipo diente de sierra	14
14. Invernadero tipo venlo	14
15. Fotosíntesis en una planta	16
16. Tecnologías de comunicación inalámbrica	20
17. Logotipo de la tecnología LoRa	21
18. Diagrama de distribución de capas de LoRaWAN	22
19. Bandas ISM sub-GHz alrededor del mundo	23
20. Arquitectura de una red LoRaWAN	24
21. Ejemplo de un gateway para la red LoRaWAN	25
22. Factor de dispersión (SF) vs velocidad y tiempo en el aire	27
23. RSSI en una red LoRaWAN	28
24. SNR en una red LoRaWAN	28
25. Pérdida de trayectoria de una señal inalámbrica	29
26. Programación secuencial vs FreeRTOS	30
27. Propiedades de FreeRTOS	31
28. Queue en FreeRTOS	32
29. Espressif ESP-IDF	33
30. Logotipo de The Things Network	33
31. Logotipo de la plataforma Ubidots	34

32. Sensor de temperatura y humedad relativa - AHT10	37
33. Sensor capacitivo de humedad del suelo	37
34. Sensor de intensidad de luz - TSL2561	38
35. Actuador para el sistema de ventilación	39
36. Actuador para el sistema de riego por aspersión	40
37. Actuador para el sistema de sombra	41
38. ESP32 DevKit V1	42
39. Placa de desarrollo Wio-E5 Dev Kit	43
40. Gateway LoRaWAN - SenseCAP M2	44
41. Diagrama de bloques de la interfaz	45
42. Conexiones del circuito de alimentación	46
43. Conexiones del circuito de medición	47
44. Conexiones del circuito de control	48
45. Conexiones del circuito de transmisión de datos	49
46. Esquemático utilizado para el diseño de la PCB	50
47. Resumen del cálculo para ancho de pistas	51
48. Capa inferior de la PCB	52
49. Capa superior de la PCB	52
50. Modelo 3D de la PCB y los componentes	53
51. Fabricación de la PCB con fresadora CNC	53
52. Soldadura de componentes en la PCB	54
53. Resultado final de la soldadura	54
54. Diagrama de flujo para la configuración del ADC	55
55. Diagrama de flujo para la lectura del sensor capacitivo	56
56. Diagrama de flujo para la configuración de las entradas y salidas	56
57. Diagrama de flujo para la lectura de los finales de carrera	57
58. Diagrama de flujo para la configuración de la interfaz I2C	57
59. Diagrama de flujo para la lectura de los sensores de temperatura y luz	58
60. Estructura de datos que envía el sensor AHT10	58
61. Ecuaciones para cálculo de la intensidad de luz en luxes	59
62. Diagrama de flujo para la configuración de la interfaz UART	60
63. Diagrama de flujo de la tarea de transmisión de datos	61
64. Diagrama de flujo de la tarea de monitoreo y control	62
65. Modelo de invernadero seleccionado - Tipo capilla	63
66. Armario	64
67. Estructura base creada con el modelo 3D de la piezas	65
68. Estructura del techo tipo capilla	65
69. Base de madera para el invernadero	66
70. Diseño del sistema de riego	66
71. Diseño de los aspersores	67
72. Sujetadores para el ventilador <i>brushless</i>	67
73. Mecanismo modelo para el sistema de sombra	68
74. Diseño del sistema de sombra	68
75. Soporte tipo 1	69
76. Soporte tipo 2	69
77. Soporte tipo 3	70

78. Construcción del invernadero a escala	70
79. Alerta por temperatura y activación del sistema correspondiente	73
80. Alerta por humedad relativa y activación del sistema correspondiente	73
81. Alerta por radiación solar y activación del sistema correspondiente	73
82. Alerta por humedad del suelo y activación del sistema correspondiente	74
83. Decoder implementado en el servidor de red	75
84. Logs de los datos interpretados en el servidor	75
85. Dashboard de la interfaz gráfica	76
86. Comportamiento del RSSI a medida que avanzaba el tiempo y se modificaba la distancia	77
87. Mapa del entorno 1	77
88. Comportamiento del RSSI a medida que avanzaba el tiempo y se modificaba la distancia	78
89. Mapa del entorno 2	78
90. Comportamiento del RSSI a medida que avanzaba el tiempo y se modificaba la distancia	79
91. Mapa del entorno 3	79
92. Comportamiento del RSSI a medida que avanzaba el tiempo y se modificaba la distancia	80
93. Mapa del entorno 4	80
94. Comportamiento del RSSI a medida que avanzaba el tiempo y se modificaba la distancia	81
95. Mapa del entorno 5	82
96. Comportamiento del RSSI a medida que avanzaba el tiempo y se modificaba la distancia	82
97. Mapa del entorno 6	83

Lista de cuadros

1. Condiciones óptimas para el cultivo de algunas hortalizas tipo C3 [8].	19
2. Relación entre las características del invernadero	36
3. Características de los sensores de temperatura	36
4. Características de los sensores de humedad del suelo	37
5. Características de los sensores de intensidad de luz	38
6. Características de las bombas de agua	40
7. Microcontroladores considerados para la interfaz de monitoreo y control	42
8. Características de los módulos LoRaWAN	43
9. Características de gateways LoRaWAN	44
10. Requerimientos de diseño para PCB	50
11. Interpretación de la variable <estado de alertas>	61
12. Comparación de características entre los tipos de invernadero.	71
13. Datos obtenidos durante las pruebas del entorno 1	77
14. Datos obtenidos durante las pruebas del entorno 2	78
15. Datos obtenidos durante las pruebas del entorno 3	79
16. Datos obtenidos durante las pruebas del entorno 4	80
17. Datos obtenidos durante las pruebas del entorno 5	81
18. Datos obtenidos durante las pruebas del entorno 6	82
19. Distancias máximas para cada entorno	83

Este trabajo consistió en el diseño e implementación de una interfaz que permitiera medir y controlar las condiciones ambientales dentro de un invernadero a escala, esto con el fin de optimizar el cultivo de hortalizas y tener un seguimiento de dichas condiciones de forma remota.

El sistema propuesto permite ajustar automáticamente condiciones como temperatura, humedad y cantidad de luz solar mediante la activación de sistemas de ventilación, riego o sombra. Para la transmisión de datos se utilizó tecnología LoRa que ofrece largo alcance y bajo consumo energético, mejorando la comunicación en áreas rurales con baja cobertura de redes celulares o internet.

Se determinaron distancias de transmisión máximas de hasta 1.5 km en entornos urbanos y 2.5 km en campo abierto, distancias influenciadas por la altura de instalación de las antenas. El proyecto representa un punto de partida para la implementación de la agricultura de precisión en Guatemala, permitiendo un cultivo eficiente y con mayor producción.

Palabras clave: invernadero, monitoreo ambiental, tecnología LoRa, agricultura de precisión, telemetría.

This project involved the design and implementation of an interface to measure and control environmental conditions within a scaled greenhouse, aiming to optimize vegetable cultivation and enable remote monitoring of these conditions.

The proposed system automatically adjusts temperature, humidity, and sunlight levels by activating ventilation, irrigation, or shading systems. For data transmission, LoRa technology was used, providing long-range communication and low power consumption, improving connectivity in rural areas with limited cellular or internet coverage.

Maximum transmission distances of up to 1.5 km in urban environments and 2.5 km in open fields were determined, with distances influenced by antenna installation height. This project serves as a foundation for the implementation of precision agriculture in Guatemala, enabling more efficient and higher-yield farming practices.

Keywords: greenhouse, environmental monitoring, LoRa technology, precision agriculture, remote sensing.

CAPÍTULO 1

Introducción

Las plantas hortícolas como el tomate, el pepino y el pimiento pertenecen a la categoría de plantas denominadas C3 y conforman un amplio porcentaje de las plantas que utilizamos como alimento. Con el constante aumento de la población, se ha desarrollado la necesidad de abastecer al mercado con estas hortalizas en cualquier época del año; una tarea difícil si solamente se cultivan en condiciones naturales. Estas plantas presentan un mejor desarrollo y crecimiento bajo ciertas condiciones ambientales que no se cumplen en todo momento del día ni durante todo el año. Por esta razón, el cultivo de estas hortalizas se realiza en invernaderos donde es posible controlar y garantizar las condiciones adecuadas para su cultivo y un mayor aprovechamiento.

Con el avance continuo de la tecnología, se han desarrollado sistemas que permiten llevar un monitoreo y control preciso de las condiciones dentro de un invernadero, lo que incrementa el aprovechamiento de los cultivos. Algunos sistemas tienen la característica del monitoreo y control a distancia al implementar formas de comunicación inalámbrica como redes celulares o WiFi. Sin embargo, en lugares donde la señal de estas comunicaciones es deficiente, no es posible implementar este tipo de sistemas y surge la necesidad de implementar otras formas de transmisión de datos a larga distancia.

En este trabajo se presenta una propuesta para desarrollar una interfaz de monitoreo y control a distancia, de un invernadero a escala, para el cultivo de hortalizas C3. Se buscó medir y controlar magnitudes físicas como temperatura, humedad y radiación solar, así como implementar la comunicación inalámbrica utilizando tecnología LoRa cuyas características principales son el envío de datos a larga distancia y un bajo consumo de energía. El sistema no sólo se encarga de medir y controlar las condiciones ambientales del invernadero sino que es capaz de mostrar la información al usuario sin importar dónde esté.

Las tecnologías de comunicación inalámbrica han ido ganando terreno en los últimos años. Uno de sus principales usos es el monitoreo y control a distancia, esto permite acercar al usuario al entorno que desea controlar brindándole las herramientas para realizar mediciones o ejecutar acciones sin tener que estar presente. En el ámbito agrícola, estas tecnologías se han vuelto esenciales para el cultivo inteligente, ya que permiten medir parámetros clave como temperatura, humedad del suelo y radiación solar para optimizar los procesos de riego y ventilación. Existen distintos tipos de esta tecnología que varían en función de características como rango, la velocidad de transmisión y el consumo de energía, adaptándose a las necesidades específicas de cada aplicación.

2.1. Sistema de transmisión inalámbrico de largo alcance

El objetivo principal del proyecto desarrollado por José Ochoa en [1] fue el diseño y construcción de un sistema inalámbrico de largo alcance que permitiera realizar mediciones de temperatura. Esto con el objetivo de alertar de posibles incendios en el relleno sanitario de la Ciudad de Guatemala y poder garantizar la seguridad de los trabajadores que se encargan del manejo y clasificación de los desechos. El sistema se realizó mediante la implementación de ZigBee, un protocolo de comunicación inalámbrica similar a WiFi o Bluetooth, pero con la ventaja de que permite conectar una mayor cantidad de dispositivos (nodos) y reducir el consumo de energía para la transmisión de datos.

Haciendo uso del módulo Digi XBee 3 en conjunto con un sensor de temperatura y un módulo de alimentación, se implementó una red de tipo malla para realizar el monitoreo y medición de la temperatura en distintos lugares del relleno sanitario. En este tipo de red, cada nodo tiene la capacidad de enviar sus propios datos al nodo coordinador (maestro) y también de recibir datos de otro nodo y enviarlos al coordinador. Este tipo de comunicación permitió aumentar la distancia de transmisión, por lo tanto, el sistema fue capaz de recolectar, transmitir la información y activar la alarma de manera exitosa.

El resultado más importante está relacionado con la distancia de transmisión; se utilizó el software XCTU para realizar pruebas de rangos de comunicación y se determinó que la transmisión de los paquetes de datos fue efectiva hasta una distancia de 200 metros. En cuanto a los alcances del proyecto, solamente se realizó la medición de temperatura y activación de alarmas, por lo que otras aplicaciones podrían involucrar mayor cantidad de sensores (humedad, presión, etc.) y el desarrollo de una interfaz gráfica para el análisis de información.

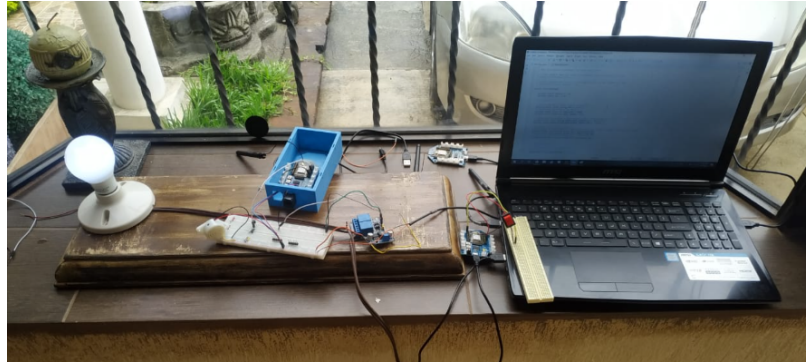


Figura 1: Prototipo del sistema implementado por José Ochoa, el bombillo simula la alarma de emergencia. [1]

2.2. Implementación de una red de sensores inalámbricos para el monitoreo de variables físicas en cultivos hidropónicos mediante tecnología LoRa

El objetivo principal del proyecto realizado por Jhonatan Loya en [2] fue implementar una red de sensores inalámbricos que permitiera realizar el monitoreo de variables físicas como temperatura, humedad, nivel de agua y pH en cultivos hidropónicos de lechuga y tomate. Esto con el fin de optimizar los procesos de control y producción agrícola en Ecuador, considerando que estos cultivos requieren un monitoreo constante de las condiciones ambientales para un óptimo desarrollo. Se decidió construir la red de sensores para un sistema hidropónico tipo NFT que se caracteriza por emplear la técnica de bombeo para la recirculación de la solución que se encarga de nutrir y oxigenar a las plantas.

Se optó por utilizar tecnología LoRa para la transmisión de datos debido al bajo costo de dispositivos e implementación en comparación con otras tecnologías de comunicación inalámbrica de largo alcance. El nodo final, que se muestra en la Figura 2, se construyó utilizando sensores para las variables antes mencionadas y un Arduino Uno que utiliza un transceptor adicional para establecer comunicación con el receptor LoRa. Los datos obtenidos por los sensores se envían al receptor y este se encarga de la conexión con el servidor en la nube que permite almacenar la información en una base de datos para su posterior análisis.

La red de sensores fue capaz de medir las variables físicas del cultivo, transmitir las utilizando tecnología LoRa y mostrarlas al usuario final. De esto se destaca el hecho de que solamente se tuvo una pérdida del 3% de los paquetes de datos enviados, por lo que se concluyó que el sistema es apropiado para la transmisión de datos en tiempo real.

El proyecto no se limitó a la obtención y transmisión de datos, sino que también se enfocó en el desarrollo de una interfaz gráfica que permitiera visualizar los datos de mejor manera, mediante gráficas y estadísticas, y el control remoto de la bomba de agua instalada en el sistema de riego del cultivo.



Figura 2: Implementación del nodo final para el monitoreo del cultivo hidropónico. [2]



Figura 3: Interfaz gráfica implementada para el monitoreo del cultivo hidropónico

2.3. Diseño de una red inalámbrica de baja potencia para la agricultura de precisión en la “Finca La Habana” - Villa Rica, Cauca

El objetivo principal del trabajo realizado por Christian Salazar en [3] fue diseñar una red inalámbrica de bajo consumo energético y baja potencia de transmisión para el monitoreo de la humedad del suelo en la Finca La Habana cuyo principal cultivo es el maíz. Esto con el fin de optimizar los tiempos de riego y cantidad de agua utilizada para evitar la humedad excesiva o el estrés hídrico del cultivo. Para esto se implementó una red de comunicación basada en la técnica de modulación LoRa, en la que el nodo final se compone de un sensor de humedad, el microcontrolador ESP8266 y un módulo transceptor que se encarga del envío de datos mediante comunicación LoRa. Por otro lado, para la recepción de datos se construyó un receptor utilizando un transceptor del mismo tipo y el microcontrolador ESP32, como se observa en la Figura 4.

El receptor es el encargado de establecer comunicación con la nube y enviar los datos recolectados por el sensor para mostrarlos en un gráfico desde el *host* del servidor ThingSpeak de donde pueden ser descargados como un archivo tipo csv. También se realizaron simulaciones utilizando el Radio Mobile Software para determinar las pérdidas de transmisión en dB y la cobertura de la red. Más allá de que el sistema cumplió con los requerimientos de funcionamiento al obtener y transmitir de forma exitosa los datos, el resultado que más destaca es el hecho de que el factor de dispersión (número de símbolos enviados por bit de información) permite adecuar los tiempos de transmisión de acuerdo con la cantidad de datos a transmitir, por lo tanto, un factor de dispersión menor se traduce a menor tiempo y menor distancia de transmisión. Respecto a los alcances del proyecto, se trabajó desde el diseño del PCB hasta la construcción del sistema, sin embargo, se limitó a la implementación de un solo nodo final con mediciones de una sola variable física.

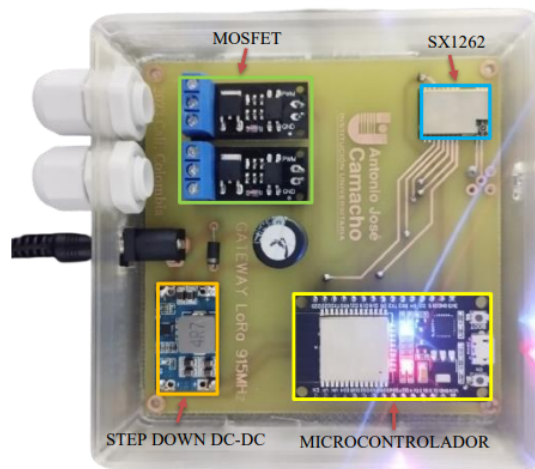


Figura 4: Circuito del *gateway* implementado en la red de baja potencia. [3]

Los invernaderos aíslan parcialmente a las plantas de las condiciones ambientales que varían constantemente en el exterior, tales como la temperatura, la humedad y la radiación solar. Esto permite tener un mejor control sobre dichas magnitudes y se garantizan condiciones óptimas para el desarrollo y crecimiento de los cultivos utilizando sistemas de riego para ajustar la humedad del suelo, sistemas de calefacción y ventilación para ajustar la temperatura y humedad del ambiente, así como mecanismos de sombra para la radiación solar [4].

Las plantas hortícolas como el tomate, el pepino y el pimiento pertenecen al grupo que los fisiólogos vegetales denominan como C3 y, de acuerdo con Adalberto Benavides [5], el proceso de fotosíntesis de estas plantas tiene mayor eficiencia en temperaturas de $25 \pm 5^\circ\text{C}$ durante el día y $22 \pm 3^\circ\text{C}$ durante la noche. También se tiene un mejor desarrollo, en relación al tamaño y fruto, cuando la radiación solar es menor a los 1000 μmol de fotones de radiación. Por estas razones, las hortalizas tipo C3 se cultivan principalmente en invernaderos que permiten ajustar las condiciones a las requeridas por el cultivo, esto facilita la obtención de cosechas fuera de la época normal de producción.

Con base en lo anterior, se hace visible la necesidad de medir y corregir las magnitudes físicas dentro del invernadero con el objetivo de proporcionar las condiciones climáticas adecuadas para el crecimiento del cultivo y un mejor aprovechamiento del mismo. Considerando que estas estructuras se encuentran en campo abierto o lugares donde no se tiene cobertura de protocolos Bluetooth o WiFi y, comunicaciones como las redes GSM/GPRS elevan el gasto económico y energético, la necesidad se extiende a tener una forma económica de transmitir la información de forma inalámbrica a un punto de control.

En el presente trabajo, como una forma de satisfacer la necesidad planteada, se propone el diseño e implementación de una interfaz que utilice sensores de temperatura, humedad y radiación solar para obtener información de las magnitudes físicas de un invernadero a escala y que sea capaz de procesar dicha información para activar los sistemas de riego, sombra y ventilación de forma automática para poder ajustar las condiciones climáticas. Con respecto a la transmisión de datos, se plantea el uso de la tecnología de comunicación inalámbrica LoRa cuyas características son la transmisión a largo alcance, cerca de 10 km en campo abierto, y un bajo consumo de energía por cada paquete de datos que se envía, haciendo más eficiente los procesos actuales de comunicación via GSM/GPRS.

El desarrollo y futura implementación de la interfaz beneficiaría a las comunidades rurales de Guatemala cuya principal actividad económica es la agricultura, específicamente en departamentos como Quiché, Petén, Alta y Baja Verapaz. La cobertura de redes celulares e internet en estos departamentos es baja en comparación con el resto [6]. El uso de tecnología LoRa facilitaría la implementación de las interfaces de medición y control de condiciones en invernaderos como el que se ubica en el Centro de producción de pilones de hortalizas MUNI-MAGA en Melchor de Mencos, Petén [7]. En este lugar se cultiva principalmente chile jalapeño, tomate, cebolla, lechuga y apio, hortalizas que pertenecen al grupo C3.

4.1. Objetivo general

Diseñar e implementar una interfaz de medición y control de condiciones ambientales dentro de un invernadero a escala, utilizando tecnología LoRa como medio de comunicación inalámbrica.

4.2. Objetivos específicos

- Definir los requerimientos de diseño, sensores y actuadores para el control del invernadero.
- Diseñar y construir un prototipo de invernadero a escala para el cultivo de hortalizas tipo C3.
- Diseñar y fabricar el módulo de medición de la interfaz de monitoreo y control.
- Realizar pruebas de comunicación entre el módulo de medición y el punto de acceso de la red LoRaWAN para definir rangos óptimos de transmisión.
- Implementar una interfaz gráfica para mostrar los datos recolectados al usuario final.

El proyecto consiste en la construcción de un invernadero a escala diseñado para monitorear y controlar de manera automática las condiciones ambientales internas. La interfaz está equipada con sensores que miden temperatura, humedad relativa, radiación solar y humedad del suelo, proporcionando datos en tiempo real sobre el ambiente dentro del invernadero. Estos datos son procesados por un microcontrolador que se encarga de activar diferentes sistemas, como ventiladores, mecanismos de riego o de sombra, con el fin de mantener las condiciones óptimas para el cultivo de hortalizas.

Los alcances de este proyecto incluyen la capacidad de ajustar los niveles de temperatura y humedad según las necesidades específicas de los cultivos C3, reduciendo la temperatura cuando se exceda el límite superior del rango óptimo o incrementando la humedad cuando esta sea menor al límite inferior del respectivo rango óptimo. También será capaz de bloquear o permitir la entrada de luz solar según la cantidad de radiación mediante un mecanismo de sombra retraíble y garantizar el suministro de agua al cultivo a través de un sistema de riego por aspersión. La interfaz se encarga de regular el entorno de forma automática, reduciendo la necesidad de intervenciones manuales constantes y mejorando la eficiencia del invernadero.

Este invernadero a escala también servirá como una plataforma de experimentación para desarrollar nuevas estrategias de comunicación a larga distancia, debido a que implementa tecnología LoRa y el protocolo LoRaWAN para la transmisión de datos a la nube y posterior visualización en una interfaz gráfica.

6.1. Invernaderos

El constante aumento de la población y la exigencia de productos de calidad en el mercado han provocado que la agricultura se vea obligada a desarrollar o adoptar nuevas técnicas y tecnologías que permitan mejorar tanto la calidad de los productos como el rendimiento de los recursos que se utilizan para obtenerlos. Una de esas técnicas es el cultivo de hortalizas en invernaderos. Estos se definen como estructuras que aíslan al cultivo de las condiciones ambientales externas y permiten controlar la atmósfera interior (generalmente variables como la temperatura, humedad y radiación solar). Este control de condiciones hace posible el crecimiento y obtención de los cultivos fuera de temporada al mismo tiempo que se aumenta la eficiencia de los recursos que se utilizan durante el proceso de cultivo. [8]

Para poder tener el mayor aprovechamiento de la agricultura en invernaderos se deben considerar factores como la ubicación, orientación y diseño del invernadero, debido a que estos influyen directamente en la producción de las hortalizas. Para seleccionar la ubicación es importante tener en cuenta la fertilidad, nivelación y drenaje del suelo así como la ausencia de fuertes corrientes de viento. También es necesario ubicar el invernadero fuera de las vías de circulación de animales que puedan dañar tanto la estructura como el cultivo en sí. Por otro lado, para seleccionar la orientación se debe considerar el recorrido del sol para aprovechar al máximo la radiación solar durante el día así como la dirección de las corrientes de viento que pudieran causar daños a la estructura del invernadero. [9]

6.1.1. Características generales

Las características que no dependen del diseño o modelo del invernadero y lo destacan frente a otro tipo de estructuras son las siguientes [10]:

Cubierta traslúcida

El material de la cubierta debe permitir el paso de la luz solar al interior del invernadero, comúnmente se utiliza un plástico transparente con protección UV y dispersores de luz, pero también existen cubiertas de vidrio o policarbonato.



Figura 5: Cubierta traslúcida de un invernadero

Estructura resistente

La estructura debe tener la capacidad de soportar no solo el peso de la cubierta sino que también las condiciones climáticas del exterior e incluso las cargas que puedan aplicarse en el interior como cultivos aéreos o plantas en tutoreo (guiadas verticalmente).



Figura 6: Ejemplo de estructura de un invernadero

Control de temperatura

Un invernadero debe ser capaz de mantener una temperatura óptima para el crecimiento de los cultivos en el interior. Los sistemas de ventilación ayudan a controlar las temperaturas elevadas mientras que para bajas temperaturas, dependiendo el tamaño del invernadero, pueden necesitarse calefactores.



Figura 7: Ejemplo de calefactor en un invernadero

Control de humedad

También debe ser capaz de controlar el porcentaje de humedad interior con el fin de mantener la salud de las plantas. Comúnmente se utilizan humidificadores o nebulizadores, debido a que un porcentaje elevado de humedad favorece el desarrollo de enfermedades como hongos mientras que un porcentaje demasiado bajo induce estrés en el cultivo y afecta el crecimiento.



Figura 8: Ejemplo de nebulizador para invernadero

Sistema de ventilación

Escencial para evitar las altas temperaturas y acumulación de humedad dentro del invernadero, puede ser simplemente paredes de malla agrícola que permitan la circulación de aire desde el exterior y una cortina de plástico para anular dicha circulación cuando no se requiere, o bien, ventiladores y extractores de aire que se encargan de dicha tarea de una forma más controlada.



Figura 9: Sistema de ventilación de un invernadero

Sistema de riego

Un sistema automatizado que facilita la dotación de la cantidad de agua requerida por las plantas. Los más comunes son el riego por goteo (el agua se distribuye gota por gota a cierta distancia de la planta), el riego por aspersión (el agua se distribuye en forma de llovizna) y el riego por nebulización (el agua se distribuye en forma de neblina a todo el cultivo).



Figura 10: Sistema de riego por aspersión

6.1.2. Modelos de invernadero

Túnel

Es un modelo que ofrece gran resistencia a los vientos y capacidad de ajustarse a todo tipo de terreno por su fácil instalación. Se caracteriza por tener una estructura totalmente curva, es decir, no tienen paredes rectas sino que solamente arcos paralelos unidos entre sí. El volumen de aire retenido es relativamente pequeño por lo que se recomienda para cultivos pequeños como lechugas. [11]



Figura 11: Invernadero tipo túnel

Capilla

Este modelo se caracterizan por tener un techo en forma de capilla (triangular) o cúpula (semicircular) que brinda una mayor altura en el centro y permite una mejor circulación del aire interior. Está pensado principalmente para climas templados o fríos y presentan gran resistencia a vientos fuertes, así como rápida instalación. [11]



Figura 12: Invernadero tipo capilla

En Diente de sierra

Es una variación de los invernaderos tipo capilla que se utiliza principalmente en zonas con climas cálidos, baja precipitación y altos niveles de radiación [12]. Se caracteriza por la forma particular del techo que en conjunto emulan los dientes de una sierra, tal como se observa en la Figura [13].



Figura 13: Invernadero tipo diente de sierra

Tipo Venlo

Estos son los más utilizados en climas fríos debido a que están fabricados con materiales resistentes a la nieve y al aire, tales como aluminio extruido o acero galvanizado. Se destacan por no requerir de un gran mantenimiento, lo que suponen un ahorro de costo a largo plazo. Sin embargo, la abundancia de elementos estructurales implica una menor transmisión de luz al interior. [12]



Figura 14: Invernadero tipo venlo

6.2. Hortalizas

Se conocen como hortalizas a todas aquellas plantas que se cultivan en huertos y se destinan para el consumo humano. Pueden ingerirse de forma cruda o cocida mediante distintos métodos. Debido a la gran cantidad de hortalizas que se cultivan alrededor de todo el mundo, estas pueden clasificarse por diferentes principios [13]:

- Clasificación botánica: Según el tipo de flor, estructura, genética y evolución. Se agrupan en familias, géneros, especies y variedades.
- Por la eficiencia en el proceso de fotosíntesis: Según la ruta que toman las plantas para convertir la energía lumínica en energía química. Se agrupan en hortalizas con ruta metabólica C3, C4 o CAM.
- Por requerimientos térmicos: Según la temperatura óptima para el crecimiento, se agrupan en hortalizas de estación fría o cálida.
- Por sus partes comestibles: Según las partes que se usan como fuente de alimento (hojas, tallo, raíz, flores, frutos, bulbos o tubérculos).
- Por resistencia a heladas o bajas temperaturas: Se agrupan en hortalizas tolerantes, ligeramente tolerantes y no tolerantes.
- Por su ciclo de vida: Se considera la duración del tiempo entre siembra y cosecha, se agrupan en hortalizas anuales, bianuales y perennes (varios años de cosecha con una sola siembra).
- Por contenido de agua: Según el porcentaje de agua pueden agruparse en mayor de 90 %, entre 80 y 90 % y menor de 80 %.
- Por tolerancia a la acidez del suelo: Según los niveles de pH a los que pueden tener un crecimiento y desarrollo óptimo.

6.2.1. Clasificación por eficiencia en la fotosíntesis [14]

Uno de los principios fundamentales que se debe tener en cuenta es que las plantas obtienen energía al utilizar recursos como el agua, luz solar y dióxido de carbono (CO_2) en el proceso de fotosíntesis. Este proceso involucra reacciones fotoquímicas y bioquímicas que resultan en la obtención de los compuestos orgánicos requeridos por la planta y la liberación de oxígeno (O_2) a la atmósfera.

La fotosíntesis se completa en dos fases: Lumínica y Oscura. En la primera ocurre la transformación de la energía lumínica para obtener ATP y NADPH, que son formas de energía química. En la segunda se realiza la síntesis de glucosa fijando CO_2 (añadiéndolo a moléculas orgánicas) en combinación con la energía obtenida de la primera fase. Es en la fase oscura donde se diferencian las plantas tipo C3, C4 y CAM debido al primer compuesto que se obtiene durante el Ciclo de Calvin, el ácido 3-fosfoglicérico (3-PGA).

Las plantas tipo C3 abarcan cerca del 89 % de todas las plantas vasculares del planeta y se caracterizan por formar el 3-PGA cuya estructura contiene 3 átomos de carbono (por eso la denominación C3) y es el compuesto base para la producción de glucosa, el alimento que la planta utiliza para desarrollarse. Sin embargo, la parte encargada de generar el 3-PGA utilizando CO₂ puede utilizar oxígeno (O₂) en su lugar y con esto provocar el fenómeno de fotorrespiración. Este fenómeno se caracteriza por desperdiciar la energía química obtenida (ATP) y reducir la capacidad de la planta para producir su alimento. La fotorrespiración se ve favorecida en condiciones que provocan estrés por alta temperatura o estrés hídrico en la planta.

En las plantas tipo C4 el compuesto que se produce es el ácido oxaloacético cuya estructura contiene 4 átomos de carbono, de ahí la denominación C4. Este tipo de plantas han tenido una evolución del proceso de fotosíntesis que les permite inhibir el fenómeno de fotorrespiración y tener mayor eficiencia en cuanto al consumo de agua. Sin embargo, el porcentaje de plantas con estas características es bastante menor y no están adaptadas para tolerar el estrés hídrico. En este grupo destacan el maíz y la caña de azúcar.

Por último, las plantas tipo CAM abarcan alrededor del 7% de las plantas vasculares y destacan no sólo por inhibir la fotorrespiración sino que también por la capacidad de soportar un estrés hídrico severo. Se encuentran principalmente en zonas cálidas y secas pero también pueden desarrollarse sin problema en zonas tropicales y subtropicales. Algunos ejemplos de plantas en este grupo son la piña y las orquídeas.

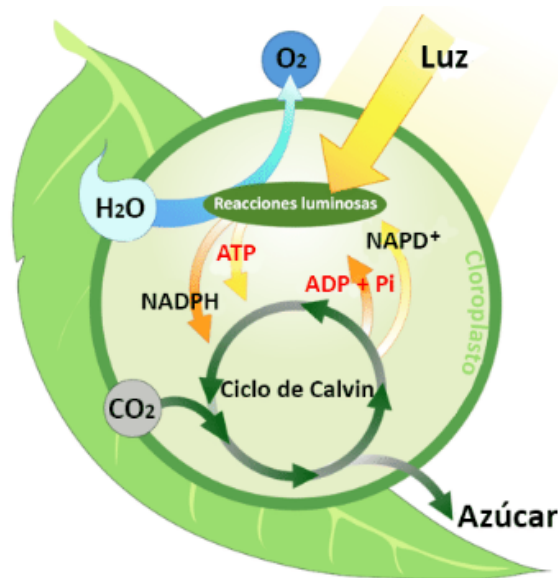


Figura 15: Fotosíntesis en una planta

6.2.2. Condiciones ambientales y estrés en los cultivos

Temperatura

Las plantas C3 se desarrollan de manera óptima en un rango de temperatura que va de los 20°C a los 30°C; fuera de este rango, la eficiencia de la fotosíntesis disminuye. Cuando la planta está expuesta a temperaturas bajas, las reacciones bioquímicas de la fotosíntesis se ralentizan y el crecimiento de la planta se ve limitado.

En temperaturas que exceden los 30°C, las plantas experimentan estrés por calor y se favorece la fotorrespiración. Como se indicó anteriormente, en este fenómeno la enzima que se encarga de la fijación de CO₂ utiliza oxígeno en su lugar. Por lo tanto, se desperdicia energía en la creación de moléculas que no se pueden utilizar para la formación de los azúcares que necesita la planta lo cual afecta su crecimiento.

El calor excesivo también puede dañar proteínas y membranas celulares e inhibir la función de los cloroplastos, los encargados de realizar la fotosíntesis. Si el estrés térmico se mantiene, la planta puede mostrar síntomas como quemaduras en las hojas, crecimiento atrofiado y mayor susceptibilidad a enfermedades y plagas. Por esta razón, es importante mantener la temperatura por debajo de los 30°C durante el día.

Humedad

La humedad relativa del aire es un factor clave en la transpiración de las plantas, un proceso en el que los estomas manejan la pérdida de agua. Los estomas son pequeñas aberturas en las hojas que también se encargan de realizar el intercambio de gases necesarios para la fotosíntesis. Cuando se enfrentan a la deficiencia hídrica, las plantas tienden a cerrar sus estomas para evitar la deshidratación, lo que también restringe la entrada de CO₂ que se utiliza para la fotosíntesis y afecta directamente el crecimiento de la planta. Una deficiencia hídrica prolongada puede llevar al marchitamiento e incluso a la muerte de los tejidos de la planta.

Las plantas C3 mantienen un delicado equilibrio entre la apertura de estomas para permitir la entrada de CO₂ y la pérdida de agua. En condiciones de alta humedad, este balance es más fácil de mantener, mientras que en condiciones de baja humedad, las plantas pueden enfrentar estrés hídrico. La humedad relativa ideal para las hortalizas C3 en invernadero es del 60 % al 80 %. Niveles demasiado bajos pueden provocar deshidratación de las plantas, mientras que una humedad excesivamente alta puede favorecer el desarrollo de enfermedades fúngicas.

Por otro lado, la humedad del suelo está directamente relacionada con la cantidad de agua disponible (un recurso esencial para el crecimiento y desarrollo de la planta). La importancia del agua radica en su función como medio de transporte de nutrientes, regulador térmico, y como componente esencial en la fotosíntesis. El agua es fundamental para disolver los nutrientes minerales presentes, como nitratos, fosfatos y potasio. Estos nutrientes son absorbidos por las raíces de las plantas a través de un proceso llamado absorción activa y pasiva.

Sin un suministro adecuado de agua, los nutrientes no pueden ser transportados eficientemente del suelo a las raíces, lo que resulta en deficiencias nutricionales y un crecimiento limitado. El agua también es un componente esencial en la fotosíntesis, para la generación de glucosa y es crucial en la transpiración que ayuda a enfriar la planta, protegiéndola del estrés térmico. Por lo tanto, se debe garantizar el suministro de agua dentro del invernadero utilizando sistemas de riego.

Intensidad de luz solar

La luz es el principal factor que impulsa la fotosíntesis, la cantidad que una planta recibe afecta directamente en su capacidad para producir energía. En exceso, y en combinación con altas temperaturas, la luz puede ser perjudicial debido que las plantas C3 no están adaptadas para manejar altos niveles de radiación. Esto puede llevar a un exceso de energía que la planta no puede utilizar eficientemente y que resulta en la generación de moléculas que pueden causar daño a las células vegetales, comprometiendo la capacidad de la planta para crecer y reproducirse.

La luz se mide comúnmente en términos de intensidad (lux), sin embargo, la radiación fotosintéticamente activa (PAR) cuyas unidades son $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ es una medida más relevante para la fotosíntesis y representa la cantidad de luz que las plantas pueden utilizar. En las plantas C3, la fotosíntesis ocurre principalmente bajo la luz cuya longitud de onda se encuentra en el rango de 400 a 700 nm y una densidad de flujo de fotones entre 200 a 800 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$.

La eficiencia fotosintética puede variar dependiendo de la calidad de la luz, siendo más efectiva bajo luz solar natural que bajo luces artificiales de espectro limitado. La fotoinhibición puede ocurrir bajo condiciones de luz excesiva, especialmente si las plantas también están bajo estrés térmico o hídrico. Las hortalizas C3 necesitan una buena cantidad de luz, en periodos de 12 a 16 horas de luz diaria. Sin embargo, la luz directa e intensa puede ser perjudicial, por lo que se utilizan coberturas de sombreado en días soleados.

Las hortalizas tipo C3 como el tomate, la lechuga, el pimiento y el pepino, requieren condiciones ambientales específicas para optimizar su desarrollo en las distintas fases de crecimiento. El Cuadro 1 muestra las condiciones óptimas de temperatura, humedad relativa e intensidad de luz necesarias para cada cultivo en sus diferentes fases y jornadas.

Cultivo	Fase	Jornada	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Radiación ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)
Tomate	Desarrollo	Diurna	23 a 26	60 a 80	400 a 600
		Nocturna	13 a 16		
	Floración	Diurna	23 a 26		
		Nocturna	15 a 18		
Maduración	N/A	15 a 22			
Lechuga	N/A	Diurna	15 a 18	60 a 70	200 a 300
		Nocturna	5 a 8		
Pimiento	Germinación	N/A	20 a 25	50 a 70	400 a 600
	Crecimiento	Diurna	20 a 25		
		Nocturna	16 a 18		
	Fructificación	Diurna	26 a 28		
Nocturna		18 a 20			
Pepino	Germinación	N/A	27	60 a 70 (día)	300 a 500
	Formación	Diurna	21		
		Nocturna	19		
	Fructificación	Diurna	19	70 a 90 (noche)	
Nocturna		16			

Cuadro 1: Condiciones óptimas para el cultivo de algunas hortalizas tipo C3 [8].

6.3. Internet de las cosas [15]

El Internet de las Cosas (IoT por sus siglas en inglés) es un concepto que ha estado abriéndose camino con el paso de los años y es característico en la mayoría de sistemas inalámbricos e inteligentes. El término hace referencia a la interconexión de dispositivos cotidianos por medio de internet, permitiendo la recopilación y transmisión de información del mundo a nuestro alrededor sin necesidad de una conexión física entre dispositivos. El IoT tiene aplicaciones en electrodomésticos, sensores industriales, dispositivos médicos e incluso algunas más complejas como robots y vehículos autónomos.

Uno de los temas principales que aborda el IoT es la conectividad, esto debido a que los dispositivos necesitan intercambiar información a través de la nube para poder operar. También toma en consideración el consumo de energía, este depende del tipo y cantidad de datos que se desan compartir y se ve reflejado en el costo de operación de los dispositivos.

6.3.1. Tecnologías de comunicación inalámbrica

Este tipo de tecnologías permiten la interconexión de dispositivos sin la necesidad de cables físicos. Actualmente existen diversos tipos que se utilizan para diferentes propósitos, por lo tanto, se consideran los siguientes factores para diferenciar cada tipo:

- Rango de transmisión entre emisor y receptor
- Ancho de banda, o bien, la velocidad a la que envían los datos
- Consumo de energía de los dispositivos

En la gráfica de la Figura 16 se muestran las tecnologías inalámbricas más comunes y cómo difieren entre sí considerando su velocidad (ancho de banda) y rango de transmisión.

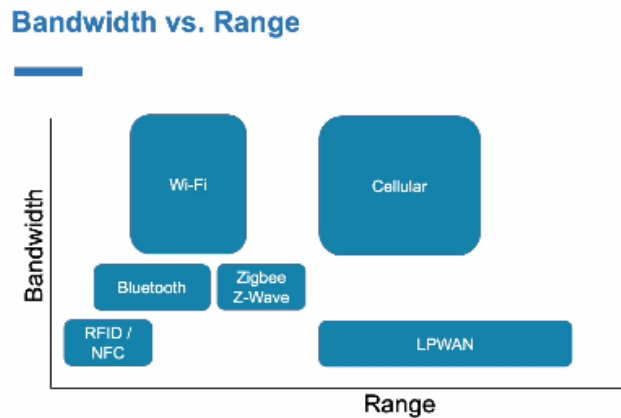


Figura 16: Tecnologías de comunicación inalámbrica

Redes de bajo consumo y área extensa (LPWAN)

Por sus siglas en inglés, *Low Power Wide Area Networks*, son un tipo de tecnología inalámbrica que se caracteriza por un bajo consumo de energía. Los equipos pueden operar con baterías durante años, o bien, únicamente con la energía que provee un panel solar. También se caracterizan por un largo alcance de comunicación que va desde 2 a 5 km en ambientes urbanos y más de 10 km en ambientes rurales. Se utilizan principalmente en aplicaciones que requieren la transmisión de pequeños paquetes de datos a largas distancias.

Algunos ejemplos de este tipo de tecnologías son:

- Sigfox: De las primeras tecnologías de este tipo, utiliza radiofrecuencia y opera en el espectro no licenciado (libre) de los sub-Gigahertz.
- Narrowband-IoT (NB-IoT): Utiliza el espectro licenciado (pagado), los dispositivos deben contar con tarjetas SIM para operar.
- LoRa: También utiliza el espectro libre de los sub-Gigahertz. Se fundamenta en la modulación por radio Chirp Spread Spectrum que se utiliza para comunicación militar y espacial.

6.4. LoRa [15]

LoRa (Long Range) es una de las tecnologías LPWAN que reduce el costo de dispositivos alimentados por batería y encargados de enviar pequeños paquetes de datos a larga distancia. Algunas aplicaciones donde se utiliza esta tecnología son el monitoreo de espacios libres en estacionamientos, medidores de humedad del suelo para control de sistemas de riego y seguimiento de animales salvajes en su ambiente natural.

Para lograr una comunicación inalámbrica es necesario implementar una técnica de modulación para transformar los datos (almacenados en formato de bits) en ondas electromagnéticas que se propagan por el aire. Como se mencionó anteriormente, LoRa emplea la modulación Chirp Spread Spectrum para realizar la transformación y de esta manera transmitir datos a larga distancia y con mayor tolerancia al ruido e interferencias.

La velocidad de transmisión con tecnología LoRa puede ir desde los 300 bps hasta los 11 kbps, por lo tanto, no es apta para el envío de imágenes o música. Se utiliza principalmente para el envío de datos captados por sensores o instrucciones de control para los dispositivos finales. El tamaño máximo del paquete de datos que se puede enviar depende de la región debido a que las regulaciones del espectro electromagnético son diferentes, por ejemplo, en Europa se tiene un máximo de 222 bytes a 11 kbps.



Figura 17: Logotipo de la tecnología LoRa

6.4.1. The LoRa Alliance

Esta es una organización sin fines de lucro que está conformada por miembros desarrolladores del sistema IoT mediante tecnologías LPWAN. La organización se encarga de desarrollar y mantener el estándar LoRaWAN, así como las especificaciones libres y globales para la seguridad de los datos y conectividad mediante LPWAN. Cuentan con un programa de certificación que se encarga de evaluar los dispositivos desarrollados por terceros y verificar que estos cumplan con el estándar LoRaWAN y puedan ser implementados en las redes de LoRaWAN.

6.4.2. LoRa y LoRaWAN

Como se mencionó anteriormente, LoRa es una tecnología LPWAN cuya técnica de modulación permite transformar datos en señales de radio frecuencia que se propagan por el aire. Por otro lado, LoRaWAN es un protocolo de software que emplea LoRa como su capa física. Los estándares de este protocolo definen la estructura de los paquetes de datos, cómo se deben cifrar para la transmisión y cómo se deben procesar en el servidor.

El modelo OSI por sus siglas en inglés *Open System Interconnection*, es un marco conceptual que se utiliza para describir las funciones de un sistema de red. En este modelo las comunicaciones dentro de un sistema informático se dividen en siete capas de abstracción: física, enlace de datos, red, transporte, sesión, presentación y aplicación. Con base en este modelo, se define la tecnología LoRa como la capa física mientras que LoRaWAN abarca las dos capas superiores del modelo (enlace de datos y red), tal como se muestra en la Figura 18.

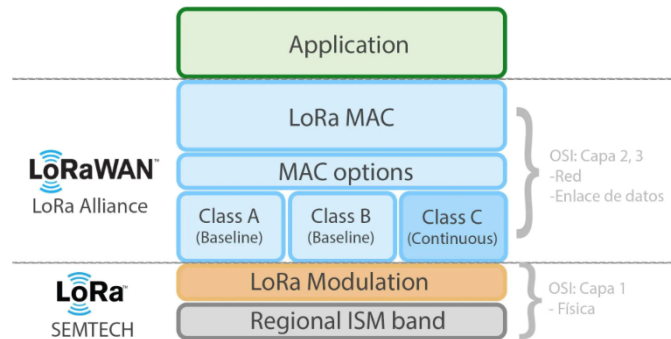


Figura 18: Diagrama de distribución de capas de LoRaWAN

Al igual que otros protocolos como WiFi o Bluetooth, LoRaWAN está diseñado para operar a frecuencias específicas, menores a 1 GHz (sub-GHz). Estas frecuencias se encuentran en el rango de las ISM bands (bandas industriales, científicas y médicas). Usar este tipo de bandas para la transmisión de datos no requiere de licencias otorgadas por las autoridades de telecomunicaciones, son libres y están destinadas para su uso en equipos industriales, científicos y médicos. En la Figura 19 se muestran las bandas ISM que se emplean en las distintas regiones del mundo.

En Europa, la banda denominada **EU868** abarca el rango de frecuencias de 863 a 870 MHz, cuenta con 8 canales para envío de datos (uplink) con velocidades de hasta 5.5 kps, 1 canal para envío con velocidad de 11 kbps y 1 canal cuya velocidad es de 50 kbps. Por otro lado, en América la banda denominada **US915** abarca el rango de frecuencias de 902 a 928 MHz, cuenta con 64 canales diferentes de los que algunos son dedicados únicamente para envío o recepción.

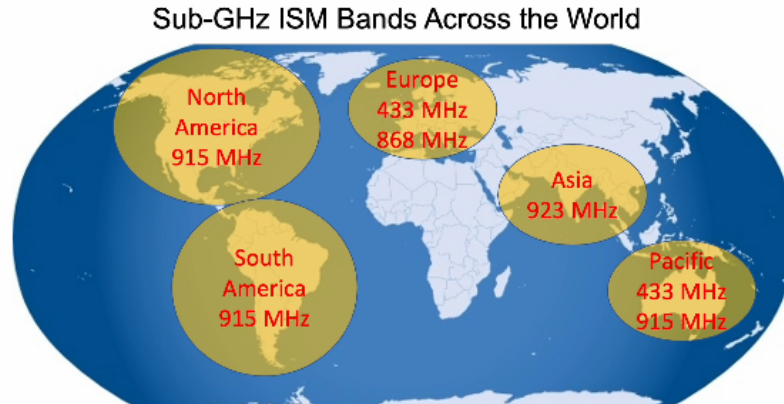


Figura 19: Bandas ISM sub-GHz alrededor del mundo

A pesar de que el espectro utilizado es libre, se deben cumplir ciertas regulaciones al momento de implementar una red LoRaWAN. Estas regulaciones son diferentes en cada región. En Europa se deben respetar los ciclos de trabajo de transmisión y deben ser de 0.1, 1 y 10 %, esto significa que los dispositivos pueden enviar datos durante una cantidad de tiempo limitada por cada hora. En Norte América, no se regula el ciclo de trabajo sino que se controla el tiempo de transmisión (time on air) el cual debe ser menor a 400 ms.

6.4.3. Arquitectura LoRaWAN 15

Los componentes principales de una red LoRaWAN son los siguientes:

- Dispositivos finales: También son conocidos como nodos y se encargan de recolectar datos del exterior y enviarlos a través de LoRaWAN. Los más comunes son sensores y actuadores.
- Gateways: Estos dispositivos son los que se encargan de establecer conexión entre los nodos y el servidor de red. Pueden conectarse al servidor a través de WiFi, Ethernet o la red de datos móviles mediante una tarjeta SIM.
- Servidor de Red: Es el software que se encarga de gestionar la red y dictar la lógica de la comunicación entre los nodos y el Gateway. Realiza la autenticación y activación de dispositivos.
- Servidor de aplicación: Es el software que recibe y almacena los datos procesados por el servidor de red. Recibe peticiones y da una respuesta con la información solicitada.

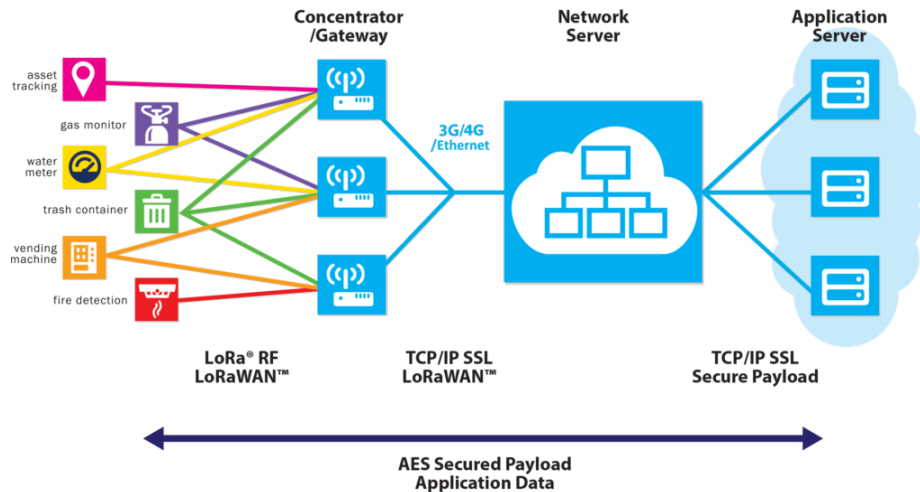


Figura 20: Arquitectura de una red LoRaWAN

Nodos

Son los dispositivos que utilizan sensores para medir magnitudes físicas y de esta manera recolectar datos para enviarlos implementando la tecnología LoRa. También son capaces de recibir instrucciones que permiten modificar su configuración o realizar una tarea por medio de actuadores. El uso de la tecnología LoRa les permite operar con baterías durante meses e incluso años.

Pueden operar en tres modos (Clase A, B o C) cuya diferencia es cuándo el dispositivo puede recibir mensajes desde el servidor lo cual influye en el consumo de energía. Pueden operar en cualquiera de los tres modos y cambiar de uno a otro cuando se requiera.

- Clase A: Es el modo más utilizado, el envío de datos se puede hacer en cualquier momento mientras que la recepción ocurre solo después de haber completado un envío. En este modo, es el dispositivo el que siempre inicia la comunicación con el servidor y, por lo tanto, es el modo con mayor eficiencia en cuanto a consumo de energía.
- Clase B: Bajo este modo de operación, los dispositivos pueden recibir mensajes en intervalos de tiempo específicos, es decir, crean una ventana de recepción cada cierto tiempo. Se utilizan marcas para sincronizar los tiempos con la red y se tiene mayor consumo de energía que la clase A.
- Clase C: En este modo los dispositivos pueden recibir mensajes desde el servidor en cualquier momento. Siempre están a la espera de recibir datos y la antena está siempre encendida, por lo tanto, es el modo que genera el mayor consumo de energía.

Gateways

También se conocen como hotspots o puntos de acceso, estos se encargan de recibir los paquetes de datos que contienen la información captada por los nodos y enviarlos al servidor de red. También reciben instrucciones del servidor y las envían a los nodos, por lo tanto, son el puente entre los dispositivos finales y el servidor de red. Bajo esta premisa, los gateway transforman las señales moduladas a bits que luego envían al servidor de red utilizando alguna conexión a internet como WiFi, Ehternet o por la red celular (GPRS).

Además de los datos enviados por los nodos, los gateways envían metadatos que permiten tener mayor información sobre lo que esta comunicando el dispositivo final. La intensidad de la señal, la tasa de ruido, el tiempo de llegada del mensaje, el canal utilizado y la velocidad a la que se envió el mensaje son algunos de los metadatos que el gateway añade a la información que envía al servidor.

Los gateways sólo trasladadan la información, se encargan de modular o demodular los paquetes de datos y no se interesan por saber a qué red LoRaWAN están asociados cada uno de los nodos. Esto les da la capacidad de manejar un gran número de paquetes y de escuchar en multiples canales al mismo tiempo. Los nodos pueden enviar datos en cualquier momento porque los gateways siempre están escuchando, la cantidad de canales que un gateway puede escuchar varía entre 1, 8, 16 e incluso 64 (dependiendo el hardware y la región donde opere).



Figura 21: Ejemplo de un gateway para la red LoRaWAN

Servidor de red

Este es el componente central de cualquier red LoRaWAN, tiene la lógica necesaria para gestionar la red y enviar datos a otros servidores como el servidor de aplicación. El servidor de red es responsable de las siguientes tareas:

- Consolidación de mensajes: A este servidor pueden llegar varias copias del mismo mensaje que provienen de distintos gateways, por lo tanto, el servidor debe dar un seguimiento, analizar y consolidar un solo mensaje.
- Enrutamiento: El servidor debe decidir cuál es la mejor ruta o el mejor gateway para enviar mensajes del servidor a los nodos. Esto lo hace considerando la intensidad de la señal recibida y la relación señal-ruido de los paquetes que llegan.
- Control de red: Se toma en consideración la calidad del enlace para que el servidor pueda decidir cuál es el mejor factor de dispersión (velocidad de comunicación) para un nodo final.
- Supervisión de red y gateways: Dispone de una interfaz de supervisión de gateways que permite gestionarlos y manejar situaciones de falla o monitoreo de alarmas

6.4.4. Flujo de datos en una red LoRaWAN

Envío de mensajes desde un nodo (*uplink*)

- El nodo transmite el mensaje y este es recibido por todos los gateways dentro del rango
- Cada gateway se encarga de enviar el mensaje al servidor de red
- El servidor de red analiza todos los mensajes y los consolida en uno solo, en este se incluye la calidad de la señal recibida desde el gateway
- El servidor de red reenvía el mensaje al servidor de aplicación utilizado
- El servidor de aplicación descifra los datos de la carga útil

Envío de mensajes desde el servidor (*downlink*)

- El servidor de aplicación encripta los datos y los reenvía al servidor de red.
- El servidor de red selecciona el mejor gateway y envía una respuesta que se transmite al nodo final.

6.4.5. Factor de Dispersión [15]

El factor de dispersión (SF) es un parámetro que permite modificar la velocidad a la que se envían los datos desde el dispositivo final, este factor puede adquirir valores enteros entre 7 y 12. Utilizar un SF pequeño resulta en una mayor velocidad de datos y menor tiempo en el aire, por otro lado, un SF grande implica una menor velocidad de datos y mayor tiempo en el aire, tal como se muestra en la gráfica de la Figura [22]

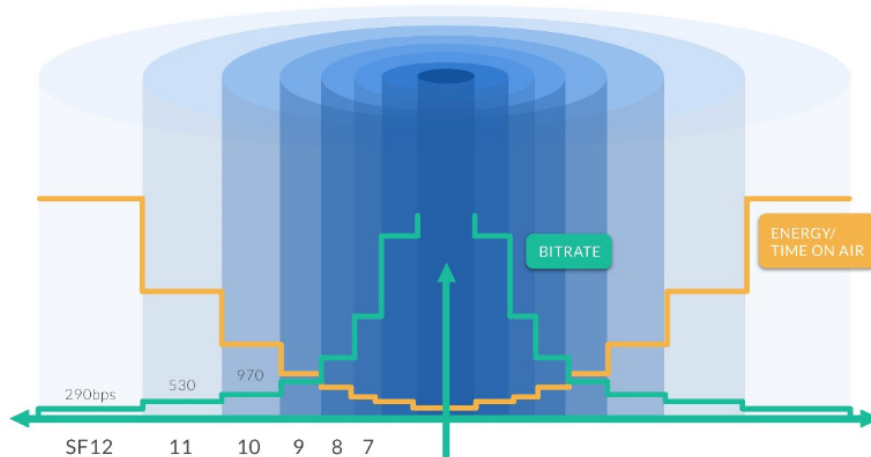


Figura 22: Factor de dispersión (SF) vs velocidad y tiempo en el aire

Un factor de dispersión de 7 (SF7) es el valor más utilizado debido a que tiene la mayor velocidad de datos y, por lo tanto, menor tiempo en el aire y menor consumo de energía. Sin embargo, se debe considerar que las velocidades altas de transmisión tienen mayor probabilidad de pérdida de datos al recorrer largas distancias, esto requeriría aumentar el SF para incrementar el alcance. Incrementar el SF trae consigo un aumento del consumo de energía y reducción la velocidad de transmisión, esto provoca que el proceso de comunicación sea más lento.

Considerando lo anterior, es necesario determinar un factor de dispersión óptimo para garantizar el envío de todos los datos en el menor tiempo posible. El protocolo LoRaWAN tiene la capacidad de adaptar de forma automática el SF de cada nodo, esta capacidad se conoce como *Adaptive Data Rate* (ADR) y permite optimizar la red, así como facilitar la escalabilidad de la misma. Al momento de añadir un gateway a la red, los dispositivos finales modifican su SF para cumplir con el requisito de transmisión completa en el menor tiempo posible.

La modificación automática del SF se logra cuando el servidor de red recibe los mensajes y evalúa la intensidad de la señal de cada uno. Si la intensidad es alta entonces el SF puede ser pequeño, ocurre lo contrario cuando la intensidad es baja. Finalmente, el servidor envía un mensaje al nodo con la instrucción de que este debe modificar su SF para optimizar la comunicación. Es importante resaltar que el ADR no es válido para dispositivos en movimiento debido a que en un momento pueden estar en el rango de ciertos gateways, pero al instante siguiente ya no están en ese mismo rango.

6.4.6. Indicadores de calidad de señal [16]

Los indicadores de calidad de señal son métricas utilizadas para evaluar la eficiencia y contabilidad de una señal de comunicación en un sistema de transmisión de datos. Estos indicadores miden aspectos clave de la señal, como su potencia, claridad y capacidad para sobreponerse al ruido y las interferencias. Los indicadores de calidad en una red LoRaWAN se describen a continuación.

Received Signal Strength Indicator (RSSI)

Indica la potencia de la señal recibida, se mide en dBm (decibelios relativos a un miliwatt) y su valor es negativo debido a que representa la atenuación de la señal. Puede emplearse como una medida de que tan bien un dispositivo receptor puede “escuchar” la señal de un emisor. Valores más cercanos a 0 dBm indican una señal más fuerte mientras que valores más negativos indican una señal más débil. Por ejemplo, un valor de -40 dBm indica una señal fuerte en comparación con un valor de -120 dBm que indica una señal muy débil.

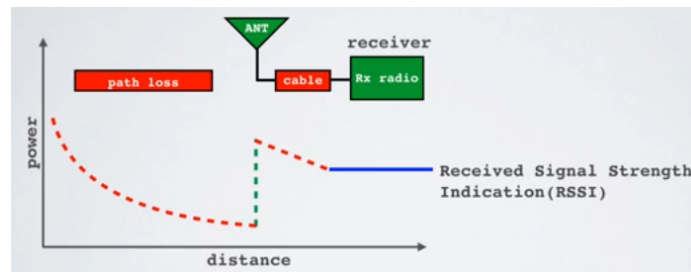


Figura 23: RSSI en una red LoRaWAN

Signal-to-Noise Ratio (SNR)

Este valor indica la relación entre la potencia de la señal y el nivel de ruido de fondo; se mide en decibelios (dB). Un SNR positivo significa que la señal es más fuerte que el ruido, mientras que un SNR negativo indica que el ruido es mayor que la señal. Por lo tanto, un SNR de 10 dB es una señal buena, mientras que un valor de -10 dB representa una señal muy débil en comparación con el ruido.

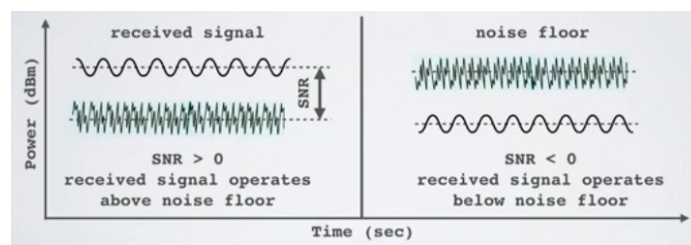


Figura 24: SNR en una red LoRaWAN

6.4.7. Pérdida de trayectoria

La pérdida de trayectoria (PL por sus siglas en inglés) es un concepto fundamental en el análisis de la propagación de señales inalámbricas. Representa la atenuación que sufre una señal al viajar desde un transmisor hasta un receptor debido a diversos factores, como la dispersión, la absorción y la difracción en el entorno. Comprender y modelar esta pérdida es esencial para diseñar sistemas de comunicación eficientes, especialmente en entornos complejos como áreas urbanas. En el diagrama de la Figura 25 se observa que la potencia de transmisión sufre de atenuación a medida que viaja a mayores distancias.

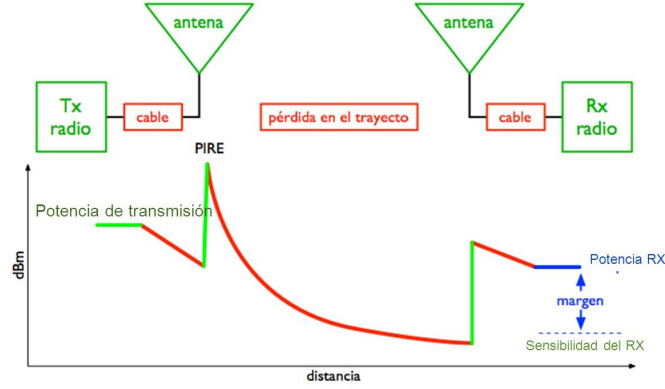


Figura 25: Pérdida de trayectoria de una señal inalámbrica

Pérdida neta

La ecuación de pérdida neta es una forma directa y observacional de calcular PL considerando la potencia de transmisión y la potencia de recepción (RSSI). Esta ecuación proporciona una medida exacta de la pérdida de señal en una distancia específica, sin asumir ningún modelo de propagación particular. Es útil en experimentos prácticos donde se tiene información o es posible medir las potencias de transmisión y recepción.

$$PL(d) = P_{tx} - RSSI \quad (1)$$

Donde:

- $PL(d)$: Pérdida de trayectoria neta a una distancia d , expresada en decibelios (dB).
- P_{tx} : Potencia de transmisión, medida en decibelios-milivatio (dBm).
- $RSSI$: Potencia captada por el receptor, medida en decibelios-milivatio (dBm).

Modelo logarítmico de pérdida de trayectoria

A diferencia de la ecuación de pérdida neta, los modelos teóricos de propagación consideran factores ambientales que influyen en la atenuación de la señal. Uno de los modelos más comunes es el modelo logarítmico de pérdida de trayectoria que se representa mediante la Ecuación 2. Este modelo permite estimar la pérdida de señal a distancias no medidas y es ampliamente utilizado en el diseño y optimización de redes inalámbricas. Sin embargo, sus parámetros deben ajustarse mediante experimentos para representar con precisión un entorno específico.

$$PL(d) = PL(d_0) + 10n \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (2)$$

Donde:

- $PL(d)$: Pérdida de trayectoria teórica a una distancia d , expresada en decibelios (dB).
- $PL(d_0)$: Pérdida de trayectoria a una distancia de referencia d_0 , expresada en decibelios (dB).
- d : Distancia entre el transmisor y el receptor, medida en metros (m).
- d_0 : Distancia de referencia, medida en metros (m).
- n : Exponente de pérdida de trayectoria, adimensional y es dependiente del entorno.

6.5. Free RTOS [17]

FreeRTOS es un sistema operativo en tiempo real (RTOS por sus siglas en inglés) diseñado específicamente para microcontroladores y sistemas embebidos. Se utiliza en aplicaciones que requieren la ejecución simultánea y programada de múltiples tareas, garantizando que cada una se ejecute en un marco de tiempo específico, algo crucial cuando el tiempo de respuesta es crítico, como en sistemas de control industrial, dispositivos médicos y automotrices.

A diferencia de un sistema secuencial, donde una tarea debe esperar a que la tarea anterior termine para poder ejecutarse, FreeRTOS permite que las tareas se ejecuten de forma concurrente, tal como se muestra en la Figura 26, haciendo que el sistema sea más eficiente. FreeRTOS garantiza que las tareas críticas se ejecuten en el tiempo necesario y también facilita el mantenimiento y la actualización del sistema debido a que cada tarea está aislada.

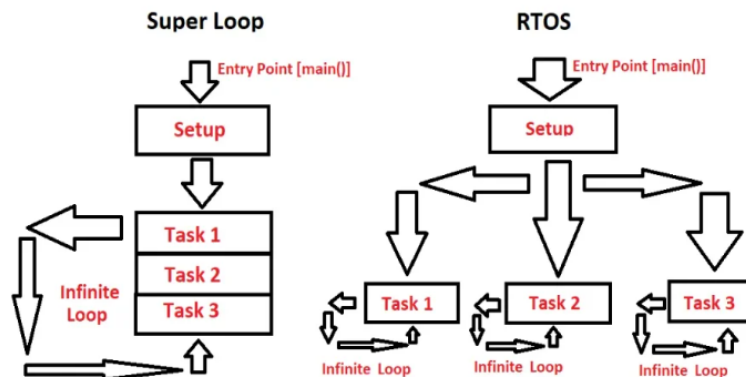


Figura 26: Programación secuencial vs FreeRTOS

6.5.1. Propiedades

- **Priorización:** Cada tarea puede tener un nivel de prioridad diferente. Por ejemplo, una tarea encargada de realizar la lectura de sensores podría tener una prioridad más alta para garantizar la obtención de datos.
- **Planificación:** FreeRTOS se encarga de la planificación de las tareas, si una tarea de lectura de sensores está configurada para ejecutarse cada 5 segundos, FreeRTOS se encarga de activarla, ejecutar el código, y luego ponerla en espera hasta que se cumpla el siguiente período de 5 segundos.
- **Sincronización:** Utiliza mecanismos de sincronización entre tareas, como colas o semáforos, para asegurarse de que no se realice una tarea determinada sin antes haber completado otra. Por ejemplo, una tarea de comunicación serial necesita esperar hasta que los datos sean obtenidos y procesados para poder enviarlos.

La Figura 27 resume las propiedades de FreeRTOS, en esta se observa el manejo de prioridades considerando que las tareas B y C tienen una prioridad mayor que la tarea A y se realizan antes. Por otro lado, también se observa la planificación y sincronización considerando que la tarea C se ejecuta únicamente después de haber completado la tarea B.

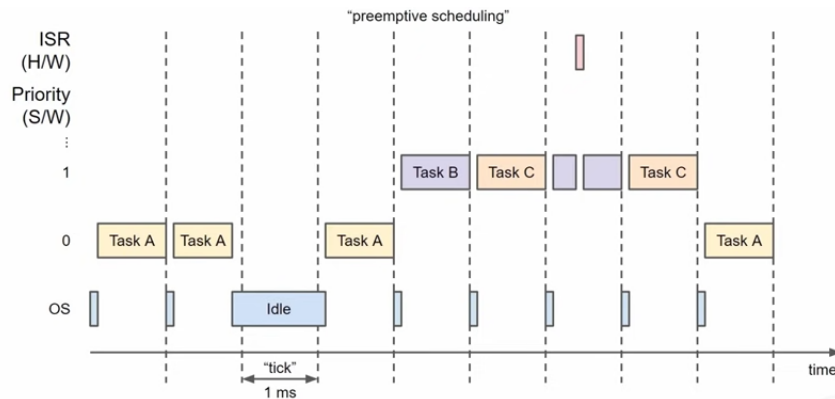


Figura 27: Propiedades de FreeRTOS

6.5.2. Queues

En FreeRTOS, las *queues* (colas) son una de las herramientas fundamentales para la comunicación y sincronización entre tareas. Son estructuras de datos FIFO (*First In, First Out*) que permiten a las tareas enviar y recibir datos asegurando que la información se transmite de forma ordenada y sin conflictos de acceso. Pueden almacenar cualquier tipo de datos, desde enteros y punteros hasta estructuras complejas.

Las colas se utilizan en diversas situaciones, especialmente cuando se necesita pasar datos entre tareas que se ejecutan en diferentes momentos o con diferentes prioridades. Algunos ejemplos que involucran el uso de colas son:

- Productor/Consumidor: Una tarea genera datos (productor) y los coloca en una cola, mientras que otra tarea los consume (consumidor) desde la cola.
- Sincronización entre tareas: Una cola puede utilizarse para sincronizar tareas, por ejemplo, una tarea espera a que otra termine de procesar los datos antes de continuar.
- Comunicación entre tareas y ISR: Las colas permiten que una ISR (interrupción) pase datos a una tarea, esto puede ser crucial para manejar eventos generados por hardware.

En la Figura 28 se puede observar que las tareas A y C se encargan agregar ciertos valores a la cola con el objetivo de que los datos llegen a la tarea B. También se observa que el primer dato en entrar a la cola es el primero en salir, en este caso, el dato colocado por la tarea A.

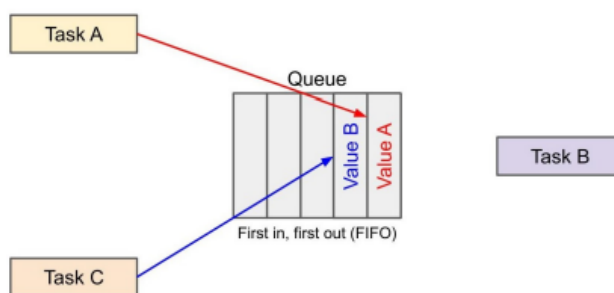


Figura 28: Queue en FreeRTOS

6.6. ESP-IDF [18]

ESP-IDF (Espressif IoT Development Framework) es un entorno de desarrollo de software ampliamente utilizado para programar microcontroladores ESP32 y ESP8266, fabricados por Espressif Systems. Este *framework* proporciona un conjunto completo de herramientas, bibliotecas y ejemplos que permiten a los desarrolladores crear aplicaciones para dispositivos IoT de manera eficiente. Entre sus características destacan las siguientes:

- Modularidad: Está diseñado con una arquitectura modular, por lo tanto, las funcionalidades se dividen en componentes independientes. Esto permite a los desarrolladores incluir solo los módulos necesarios en su aplicación, optimizando el uso de recursos.
- Soporte multiplataforma: Es compatible con múltiples sistemas operativos, incluyendo Windows, macOS y Linux. Además, utiliza CMake y Python como herramientas principales para la configuración y compilación, lo que facilita su integración en distintos entornos de desarrollo como VS Code.
- Sistema operativo FreeRTOS: Integra FreeRTOS, un sistema operativo en tiempo real (RTOS) que permite a los desarrolladores crear aplicaciones multitarea con eficiencia y control sobre la ejecución de procesos concurrentes.

- Soporte extenso de periféricos: Soporta una amplia gama de periféricos como GPIO, I2C, SPI, UART, ADC, DAC y PWM, facilitando la interacción con diversos sensores y dispositivos externos.

ESP-IDF está optimizado para los microcontroladores de Espressif, lo que permite un rendimiento más eficiente y acceso directo a características avanzadas del hardware. Al estar basado en FreeRTOS, ofrece un control detallado sobre la ejecución de tareas y el uso de recursos. Además, Espressif proporciona documentación oficial detallada y soporte continuo para el framework.



Figura 29: Espressif ESP-IDF

6.7. The Things Network [\[19\]](#)

The Things Network (TTN) es una plataforma global de infraestructura de red diseñada para dispositivos IoT que implementan el protocolo LoRaWAN. Permite a desarrolladores y empresas conectar sus nodos sin necesidad de invertir en una infraestructura propia. Se caracteriza por la capacidad de manejar una gran cantidad de dispositivos y un rango de comunicación que puede cubrir hasta varios kilómetros, ideal para aplicaciones en ciudades inteligentes, agricultura y monitoreo remoto. TTN funciona mediante la instalación de los gateways LoRaWAN que reciben las señales de los nodos y las envían al servidor de red. Entre sus ventajas destacan la escalabilidad, la facilidad de integración con diversas plataformas de análisis de datos, y su enfoque en la comunidad, permitiendo a los usuarios compartir infraestructura y reducir costos. Además, su naturaleza abierta y colaborativa fomenta la innovación y la expansión del IoT en todo el mundo.



Figura 30: Logotipo de The Things Network

6.7.1. The Things Stack

The Things Stack implementa el software requerido para la gestión de redes LoRaWAN de forma segura y escalable. Ofrece un conjunto de características robustas que incluyen soporte para múltiples aplicaciones, dispositivos y usuarios, así como la capacidad de manejar redes privadas y públicas. The Things Stack permite la gestión eficiente de dispositivos LoRaWAN a través de características como el control de autenticación y encriptación, la administración de actualizaciones por aire (OTA), y la integración con servicios en la nube y sistemas empresariales.

Su arquitectura facilita la personalización y expansión, permitiendo a las organizaciones adaptar la plataforma a sus necesidades específicas. Entre sus ventajas destaca el alto nivel de seguridad y su compatibilidad con estándares abiertos, lo que asegura la interoperabilidad con otros sistemas y dispositivos LoRaWAN. The Things Stack es ideal para implementaciones a gran escala en sectores como la agricultura, la logística, las ciudades inteligentes y la industria, ofreciendo una solución IoT integral y adaptable.

Para utilizar este servidor es necesario crear una cuenta de TTN para poder acceder a la consola de The Things Stack y registrar los gateways y nodos que se desean implementar en la red LoRaWAN, por lo tanto, es necesario conocer los EUI (identificadores) de cada dispositivo y el AppKey que se utilizará para autenticar los nodos y que el servidor pueda aceptar y descryptar los datos que cada uno envía.

6.7.2. Ubidots

Ubidots es una plataforma IoT que permite a los usuarios capturar, visualizar y analizar datos en tiempo real provenientes de los dispositivos conectados. Está diseñada para facilitar la creación de aplicaciones IoT personalizadas sin necesidad de un desarrollo complejo, ofreciendo una interfaz intuitiva y herramientas para la gestión de datos y dispositivos. Se caracteriza por la capacidad de crear dashboards interactivos, la integración con una amplia variedad de protocolos y dispositivos IoT, y la posibilidad de generar alertas y notificaciones basadas en reglas definidas por el usuario. Ubidots facilita la integración con servicios externos y sistemas heredados, como The Things Stack, lo que la convierte en una herramienta flexible que aprovecha el IoT para mejorar la toma de decisiones y optimizar operaciones en sectores como la manufactura, energía, salud, entre otros.



Figura 31: Logotipo de la plataforma Ubidots

7.1. Selección de características

Partiendo de las características generales de un invernadero (sección 6.1.1) y considerando las condiciones ambientales óptimas para plantas C3 (sección 6.2.2), se decidió implementar las siguientes características en el invernadero a escala:

- Monitoreo de temperatura y humedad relativa
- Monitoreo de humedad del suelo
- Monitoreo de cantidad de luz solar
- Sistema de riego por aspersión
- Sistema de ventilación
- Sistema de sombra

El Cuadro 2 muestra las variables monitoreadas y el sistema de control de condiciones que corresponde a cada una.

Variable	Sistema
Temperatura	Ventilación
Humedad del suelo	Riego
Humedad relativa	Ventilación
Radiación solar	Sombra

Cuadro 2: Relación entre las características del invernadero

Considerando que se trata de un invernadero a escala y que el diseño se hará para un ambiente con clima cálido (como el departamento de Petén donde las temperaturas promedio oscilan entre 25°C y 30°C durante todo el año), el invernadero no tendrá un sistema de calefacción.

7.2. Selección de componentes

La implementación de las características seleccionadas requiere sensores que se encargen de realizar mediciones de las cantidades físicas y también actuadores que se encarguen de poner en marcha los sistemas. Además, se debe contar con un microcontrolador que se encargue de procesar la información recolectada y los componentes necesarios para la implementación de la red LoRaWAN.

7.2.1. Sensores

Temperatura

Para el monitoreo de la temperatura y humedad ambiental se decidió utilizar el sensor AHT10. En el Cuadro 3 se muestra una comparación de tres sensores entre los que destaca el AHT10 debido a que posee mayor rango de medición, menor incertidumbre, menor consumo de energía y menor precio. La interfaz de comunicación con el sensor también influyó en la selección debido a que con I2C no es necesario desarrollar por completo un protocolo de recepción de datos, como en el caso del *Digital single-bus*, debido a que ESP-IDF ya incluye una biblioteca para el uso de I2C.

Sensor	DHT11	DHT22	AHT10
Interfaz	Digital single-bus	Digital single-bus	I2C
Voltaje de alimentación (V)	3 - 5.5	3.3 - 6	3.3 - 5
Corriente de operación (mA)	0.5 - 2.5	1 - 1.5	0.023
Potencia de operación (mW)	1.65 - 8.25	3.3 - 4.95	0.076
Rango de humedad (% RH)	20 - 90 \pm 5	0 - 100 \pm 2	0 - 100 \pm 2
Rango de temperatura (°C)	0 - 50 \pm 2	-40 a 80 \pm 0.5	-40 a 85 \pm 0.3
Precio (Q)	35	50	40

Cuadro 3: Características de los sensores de temperatura



Figura 32: Sensor de temperatura y humedad relativa - AHT10

Humedad del suelo

Para el monitoreo de la humedad del suelo se decidió utilizar un sensor de humedad del tipo capacitivo. En el Cuadro 4 se muestra una comparación de dos sensores que se utilizan para el monitoreo de esta variable. A pesar de que el sensor resistivo tiene menor costo, la elección se realizó con base en la vida útil y el consumo de energía.

Tipo de sensor	Resistivo	Capacitivo
Señal de salida	Digital y analógica	Analógica
Voltaje de alimentación (V)	3.3 - 5	3.3 - 5.5
Corriente de operación (mA)	35	5
Potencia de operación (mW)	115.5	16.5
Vida útil	3 a 6 meses	3 años (mín.)
Precio (Q)	25	50

Cuadro 4: Características de los sensores de humedad del suelo

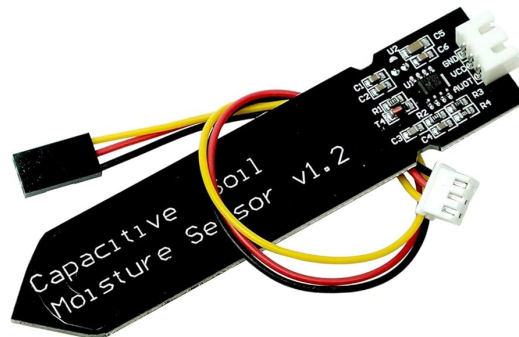


Figura 33: Sensor capacitivo de humedad del suelo

Radiación solar

Para el monitoreo de la cantidad de luz solar dentro del invernadero se decidió utilizar el sensor TSL2561. En comparación con los demás sensores que se muestran en el Cuadro 5, el TSL2561 presenta una mayor captación de longitud de onda (mayor rango de medición). A pesar de que la intensidad de luz medida por el sensor se expresa en luxes, la conversión de luxes a unidades $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ es sencilla y directa mediante el factor de conversión $1 \text{ lux} = 0.0185 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ para la luz solar.

Sensor	UVM-30A	ML8511	TSL2561
Interfaz	Salida analógica	Salida analógica	I2C
Voltaje de alimentación (V)	3 - 5	3.3 - 5	2.7 - 3.6
Corriente de operación (mA)	0.06 - 0.1	0.001 - 0.3	0.24 - 0.6
Potencia de operación (mW)	0.2 - 0.33	0.0033 - 1	0.75 - 2
Longitud de onda (nm)	200 - 370	280 - 390	300 - 1100
Unidad de medida	N/A	mW/cm^2	lux
Precio (Q)	50	100	40

Cuadro 5: Características de los sensores de intensidad de luz

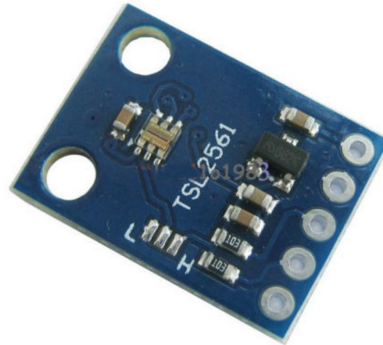


Figura 34: Sensor de intensidad de luz - TSL2561

7.2.2. Actuadores

Sistema de ventilación

Para controlar la temperatura en el interior del invernadero cuando se exceda el límite superior del rango óptimo, se decidió implementar un ventilador brushless como el que se muestra en la Figura 35. Este tipo de ventiladores se emplean principalmente para el control de la temperatura en las fuentes de voltaje para computadoras, sus características son las siguientes:

- Voltaje de alimentación: 12 V
- Corriente máxima de trabajo: 250 mA

- Velocidad: 3000 RPM \pm 10 %
- Flujo de aire mínimo: 0.983 CMM (m^3/min)
- Dimensiones: 80x80x25 mm



Figura 35: Actuador para el sistema de ventilación

La Ecuación 3 relaciona el flujo de aire de un ventilador con la tasa de ventilación (las renovaciones de aire que se hacen en una hora) y el volumen del lugar donde opera.

$$Q = ACH \cdot V \quad (3)$$

Donde:

- Q : Flujo de aire, en metros cúbicos por hora (m^3/h)
- ACH : Renovaciones de aire por hora
- V : Volumen del espacio, en metros cúbicos (m^3)

Dado el flujo de aire de 0.983 CMM y considerando 5 de renovaciones de aire por cada hora, se determinó que este ventilador es capaz de trabajar en un espacio de $11.8m^3$. Este volumen es similar al de una habitación de 2.5x2x2.5 m por lo que es suficiente para un invernadero a escala.

Para convertir el flujo de aire a m^3/h se utilizó el factor:

$$1 \text{ CMM} = 60 \text{ m}^3/h$$

Por lo tanto, el flujo de aire es igual a:

$$Q = 0.983 \cdot 60 = 58.98 \text{ m}^3/h$$

Despejando la Ecuación 3 para el volumen y sustituyendo los valores:

$$V = \frac{Q}{ACH} = \frac{58.98}{5} = 11.8 \text{ m}^3$$

Sistema de riego

Se decidió implementar un sistema de riego por aspersión con el objetivo de controlar la humedad del suelo cuando las lecturas sean menores al límite inferior del rango óptimo. Este sistema requiere una bomba de agua para suministrar este líquido a la tubería y de esta manera regar el cultivo, el Cuadro 6 muestra las características de dos bombas que se consideraron para el proyecto.

Bomba	Opción 1	Opción 2
Voltaje de alimentación (V)	6	12
Corriente máxima de trabajo (mA)	220	350
Potencia de operación (W)	1.5	4.8
Caudal máximo (Litros/h)	120	240
Vida útil (horas)	200	30000
Elevación máxima (cm)	110	300

Cuadro 6: Características de las bombas de agua

Se utilizó la Ecuación 4 para comparar las bombas y se determinó que, teniendo la misma densidad del agua y misma área de sección transversal, la segunda bomba ofrece una mayor presión de salida debido a que su caudal es mayor. Considerando que una presión más grande favorece el riego por aspersión y que la segunda bomba ofrece una vida útil mayor que la primera, se decidió implementar esta segunda opción (Figura 36).

$$P_d = \frac{1}{2}\rho\left(\frac{Q}{A}\right)^2 \quad (4)$$

Donde:

- P_d : Presión dinámica debida a la velocidad de salida
- ρ : Densidad del agua
- Q : Caudal de la bomba
- A : Área de la sección transversal de la tubería



Figura 36: Actuador para el sistema de riego por aspersión

Sistema de sombra

Para controlar la cantidad de luz solar se decidió implementar un mecanismo de sombra que se extiende bajo el techo del invernadero, esto para reducir la cantidad de radiación que llega a las plantas. El mecanismo de este sistema requiere un motorreductor para generar el movimiento y sensores para determinar el estado de la sombra (extendida o retraída). Por lo tanto, se decidió implementar el motorreductor que se muestra en la Figura 37 cuyas características se listan a continuación. También se decidió utilizar dos finales de carrera para determinar el estado de la sombra y de esta manera saber cuándo detener el motorreductor.

- Voltaje de operación: 12 V
- Corriente con carga: 0.2 A (1.2 A Máx.)
- Potencia nominal: 0.95 W
- Velocidad nominal: 100 rpm



Figura 37: Actuador para el sistema de sombra

7.2.3. Microcontrolador

La selección del microcontrolador se fundamentó en los aspectos que se muestran en el Cuadro 7. Considerando el uso de FreeRTOS para desarrollar la lógica de funcionamiento, se decidió utilizar la placa de desarrollo que implementa el módulo ESP32.

Este microcontrolador posee mayor cantidad de memoria flash, por lo que permite almacenar el sistema operativo FreeRTOS, bibliotecas y el *firmware* sin problemas. Por otro lado, una mayor memoria RAM y velocidad de reloj de hasta 160 MHz favorece la ejecución de múltiples tareas en paralelo y con mayor eficiencia. No está de más mencionar que cuenta con un amplio ecosistema de documentación y bibliotecas que facilitan el desarrollo, depuración y mantenimiento de proyectos basados en FreeRTOS.

Placa de desarrollo	ESP32 DevKitV1	Arduino Nano	Blue Pill
Voltaje de operación	3.3 a 5 V	5 V	3.3 o 5 V
Corriente de operación máxima	500 mA	19 mA	150 mA
Consumo en modo sleep	10 μ A - 1 mA	2 - 15 μ A	2 - 20 μ A
Número de pines GPIO	25	22	37
Pines analógicos	15	8	10
Periféricos	Wi-Fi, BT, UART(3), I2C, SPI, ADC, DAC	UART(1), I2C, SPI, ADC, PWM	UART(3), I2C, SPI, ADC, PWM
Resolución de ADC	12 bits	10 bits	12 bits
Corriente de salida por cada pin	20 mA	20 mA	25 mA
Memoria Flash	4 MB	32 KB	64 KB
SRAM	520 KB	2 KB	20 KB
Velocidad de Reloj	80/160 MHz	16 MHz	72 MHz
Precio	Q110	Q100	Q70

Cuadro 7: Microcontroladores considerados para la interfaz de monitoreo y control



Figura 38: ESP32 DevKit V1

7.2.4. Comunicación LoRa

La característica principal de este trabajo es el módulo de comunicación que utiliza la tecnología LoRa y el protocolo LoLaWAN para transmitir datos a larga distancia. Considerando la arquitectura de esta red, sección 6.4.3, fue necesario seleccionar un nodo final y un gateway que cumplieran con los requerimientos estándar del protocolo LoRaWAN.

Nodo

Como se observa en el Cuadro 8, a pesar de que los módulos *Wio-E5* y *RAK3172* presentan características bastante similares, se decidió implementar el *Wio-E5* debido a que el fabricante de este módulo ofrece placas de desarrollo como el *Wio-E5 Dev Kit* (Figura 39) que facilitan el proceso de pruebas e implementación.

Módulo	Wio-E5	RYLR993 Lite	RAK3172
Frecuencia de operación	868/915 MHz	868/915 MHz	868/915 MHz
Potencia de salida (máx)	22 dBm	22 dBm	20 dBm
Sensibilidad	-137 dBm	-148 dBm	-148 dBm
Memoria Flash	256 KB	256 KB	256 KB
SRAM	64 KB	N/A	64 KB
Voltaje de alimentación	1.8 - 3.6 V	1.8 - 3.6 V	2.0 - 3.6 V
Consumo máximo durante transmisión	118 mA	140 mA	87 mA
Corriente en modo bajo consumo	2.1 μ A	5 μ A	1.69 μ A
Interfaz de comunicación	UART, I2C, SPI	UART	UART, I2C, SPI
Modo de operación	A/B/C	A/B/C	A/B/C
Antena	Externa	Externa	Externa
Temp. de operación	-40°C a 85°C	-40°C a 85°C	-40°C a 85°C
Precio	\$6.49	\$23.00	\$6.49

Cuadro 8: Características de los módulos LoRaWAN



Figura 39: Placa de desarrollo Wio-E5 Dev Kit

Gateway

El Cuadro 9 resume las características de tres gateways LoRaWAN comunes en el mercado. A pesar de que el *Milesight UG67* presenta las mejores características, su precio es elevado en comparación con los otros. Se decidió utilizar el *SenseCAP M2* debido a que tiene prácticamente las mismas características que el *RAK7268V2*, pero con un menor costo y mayor compatibilidad con servidores de red.

LoRaWAN gateway	SenseCAP M2	RAK7268V2	Milesight UG67
Velocidad de procesamiento	580 MHz	560 MHz	1.5 GHz
RAM	DDR2 128 MB	DDR2 128 MB	DDR4 512 MB
Memoria Flash	32 MB	32 MB	8 GB
Transceptor LoRa	SX1302	SX1302	SX1302
Tipo de nodos soportados	A/B/C	A/C	A/B/C
Número de canales	8 canales	8 canales	8 canales
Sensibilidad	-139 dBm	-139 dBm	-140 dBm
Potencia de transmisión	26 dBm	27 dBm	27 dBm
Conexión a la nube	Ethernet, Wi-Fi	Ethernet, Wi-Fi	Ethernet, Wi-Fi
Servidores compatibles	TTN, ChirpStack	ChirpStack	TTN, ChirpStack
Alimentación	12V DC, PoE	12V DC, PoE	12V DC, PoE
Ambiente de instalación	Interiores	Interiores	Exteriores
Precio	\$99.00	\$139	\$650

Cuadro 9: Características de gateways LoRaWAN



Figura 40: Gateway LoRaWAN - SenseCAP M2

8.1. Diagrama de bloques

En la Figura 41 se observan los principales componentes de la interfaz y la forma en la que el microcontrolador debe comunicarse con cada uno, tanto para la obtención de datos como para la activación de sistemas. Los sensores conforman el módulo de medición, el puente H y los relés el módulo de control y el transceptor LoRaWAN el módulo de transmisión de datos.

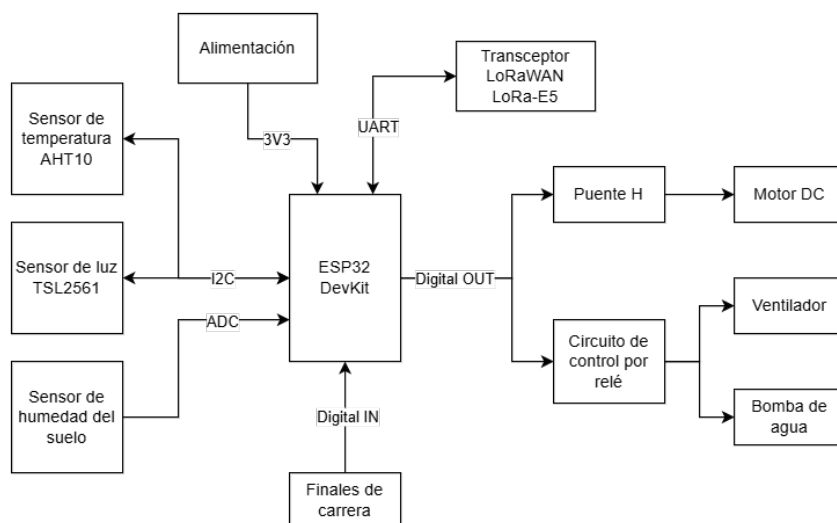


Figura 41: Diagrama de bloques de la interfaz

El diseño de los circuitos se realizó utilizando el software EasyEDA, esto debido a que posee una amplia biblioteca de componentes que facilitan la creación de esquemáticos y placas de circuito impreso (PCB). Sin embargo, considerando que la mayoría de componentes de este proyecto no poseen un modelo SPICE que simule su comportamiento eléctrico real, las pruebas de funcionamiento de cada circuito se realizaron de forma física.

8.1.1. Alimentación

Considerando que el microcontrolador y los sensores requieren un voltaje mínimo de 3.3V para poder operar, se decidió utilizar una batería de iones de litio (LI-ion) para suministrar energía a la interfaz. Esta se caracteriza por ser recargable y tener un voltaje nominal de 3.7V. Con el objetivo de eliminar la dependencia de fuentes de energía externa para recargar la batería, se decidió utilizar un panel solar con salida nominal de 5.5 V y un cargador para baterías LI-ion que brinda protección contra sobrecarga.

Por otro lado, para garantizar el nivel de voltaje requerido por los componentes, se decidió implementar un regulador lineal con voltaje de salida de 3.3 V. En el recuadro rojo de la Figura 42 se observa la conexión de los componentes del circuito de alimentación: el módulo cargador de baterías *TC4056A*, la batería *Li-ON 103035* y el regulador *LD1117V33* para mantener el suministro constante de 3.3 V a los componentes.

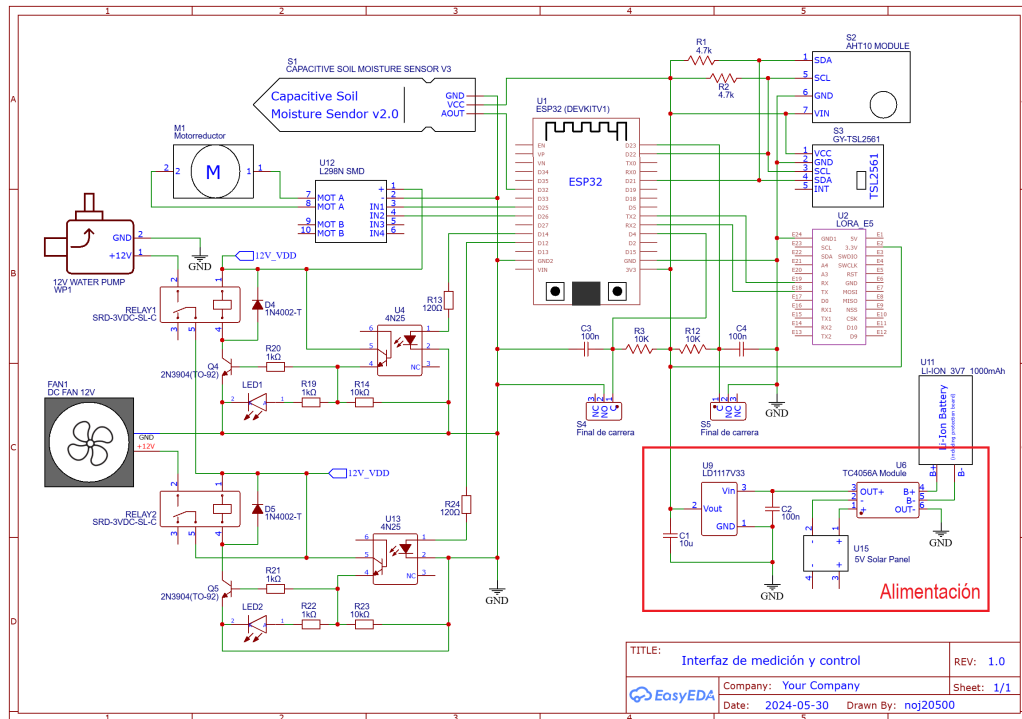


Figura 42: Conexiones del circuito de alimentación

8.1.2. Medición

Para realizar el diseño de este circuito fue necesario considerar la interfaz que cada sensor utiliza para enviar los datos recolectados al microcontrolador.

- Los sensores de temperatura e intensidad de luz utilizan comunicación I2C para la transmisión de datos, por lo tanto, fue necesario colocar las resistencias *pull-up* requeridas por este tipo de comunicación e interconectar las líneas *SCL* y *SDA* de cada sensor a los correspondientes pines en el microcontrolador.
- El sensor capacitivo de humedad del suelo tiene una salida de datos analógica, por lo tanto, se decidió conectarlo a uno de los canales ADC que ofrece el microcontrolador.
- Los finales de carrera que se utilizarían para determinar el estado de la sombra, se conectaron en configuración *pull-up* a dos pines de entrada digital del microcontrolador.

En los recuadros de color rojo de la Figura 43 se observan la conexiones entre los distintos sensores y el microcontrolador.

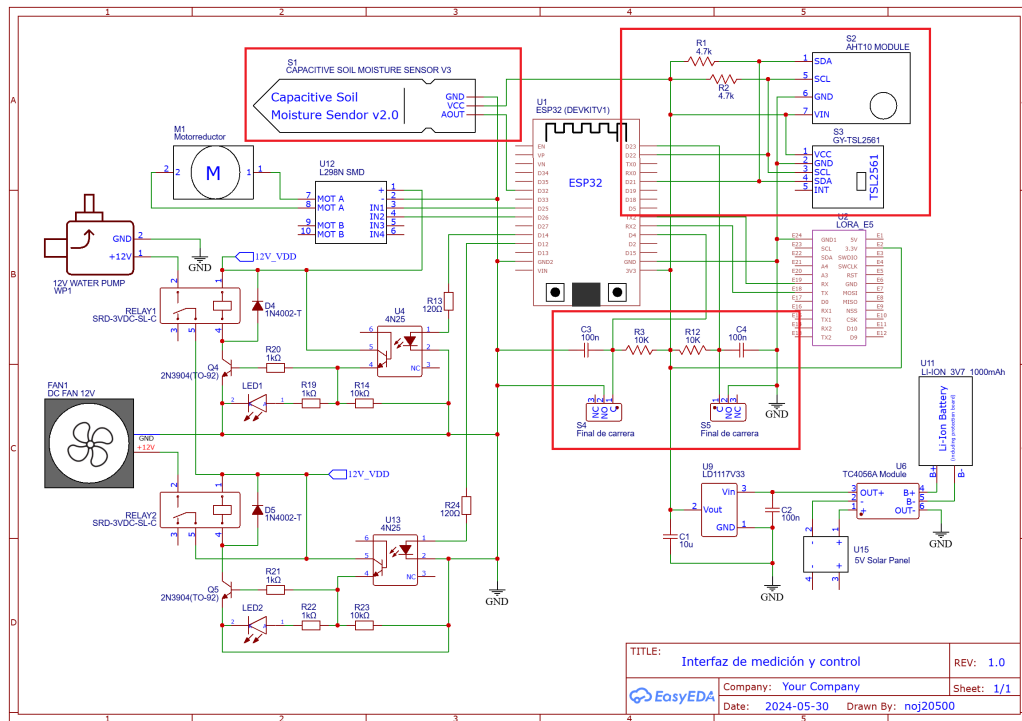


Figura 43: Conexiones del circuito de medición

8.1.3. Control

El propósito de este circuito es controlar la activación de los sistemas de riego, ventilación y sombra. Considerando que los actuadores requieren un voltaje de operación superior a los 3.7 V que proporciona la batería, y una corriente mayor a los 20 mA que suministra cada pin del microcontrolador, se decidió utilizar un adaptador de corriente de 110 VAC a 12 VDC para alimentar a los actuadores. Por esta razón, también se decidió implementar un circuito compuesto por relés cuya ventaja es el control de circuitos de mayor potencia utilizando una señal de bajo voltaje.

También se decidió utilizar optoacopladores para aislar y proteger al microcontrolador de picos de voltaje o corriente que podrían generar los relés y dañarlo. Sin embargo, esto requiere la implementación de un transistor adicional para amplificar la señal de control y brindar la corriente necesaria para la activación del relé.

Considerando que el sistema de sombra debe extenderse y retraerse cuando sea necesario, el motor debe ser capaz de cambiar el sentido de giro para cumplir con estas acciones. Por lo tanto, para cumplir con esta característica se decidió implementar un módulo de puente H. Este módulo permite controlar la dirección de giro del motor con dos salidas digitales del microcontrolador. En el recuadro rojo de la Figura 44 se observan las conexiones para del sistema de control con sus respectivos actuadores. Se implementó un led con su respectiva resistencia para tener un indicador visual de la activación de los sistemas de riego y ventilación durante las pruebas.

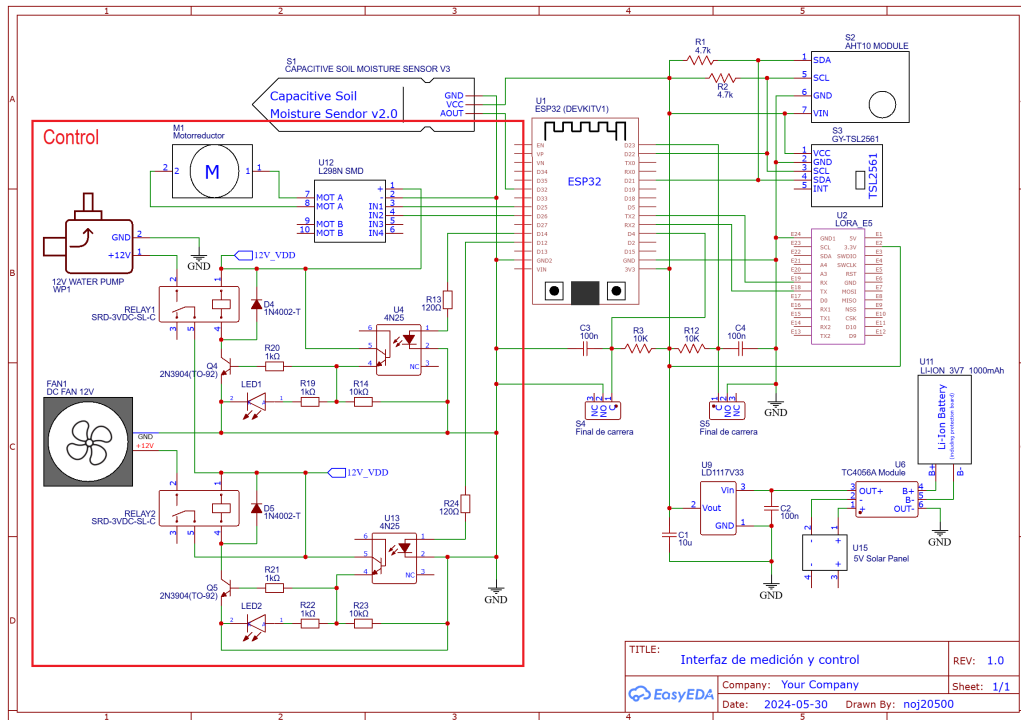


Figura 44: Conexiones del circuito de control

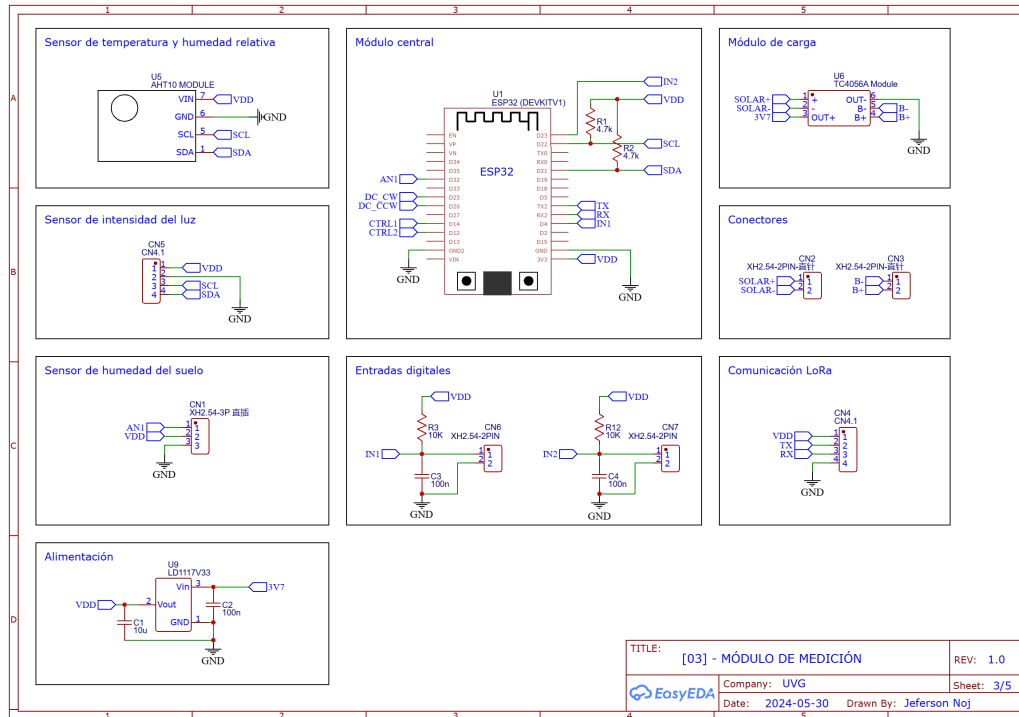


Figura 46: Esquemático utilizado para el diseño de la PCB

Debido a que la placa sería fabricada utilizando una fresadora CNC, propiedad del Makerlab de la Universidad del Valle de Guatemala, fue necesario considerar los requerimientos de diseño que se muestran en el Cuadro 10.

Tamaños de pista	mm	mil
Ancho mínimo de pista	0.254	10
Ancho mínimo recomendado de pista	0.508	20
Espacio mínimo entre pistas	0.254	10
Espacio mínimo recomendado entre pistas	0.508	20
Tamaños de pads		
Tamaño mínimo de pad	Tamaño agujero + 0.508	Tamaño agujero + 20
Tamaño mínimo entre pads	0.254	10
Tamaño mínimo de pad para vias	1.524	60
Tamaño recomendado para pad de resistores y capacitores	1.5748 (agujero de 0.9)	62 (agujero de 36)

Cuadro 10: Requerimientos de diseño para PCB

El cálculo para los anchos de pista se realizó con base en el espesor del material ($1oz/ft^2$), un aumento de temperatura de máximo $10^{\circ}C$ y la corriente total máxima de cada net. Se utilizó la Ecuación 5 para calcular el área necesaria para soportar y conducir la corriente de cada net. Este resultado se utilizó en la Ecuación 6 para determinar el ancho de pista mínimo requerido. 20

$$A = \left(\frac{I}{k \cdot T_{\text{Rise}}^b} \right)^{\frac{1}{c}} \quad (5)$$

Donde:

- A : Área requerida para conducción de la corriente
- I : Corriente de la net, en amperios
- T_{Rise} : Aumento máximo de temperatura, en °C
- k, b, c : Constantes que dependen del tipo de pista (externa o interna).
 $k = 0.048$, $b = 0.44$, $c = 0.725$ para pistas externas.

$$W = \frac{A}{t \cdot 1.378} \quad (6)$$

Donde:

- W : Ancho de pista mínimo, en mil
- A : Área requerida para conducción de la corriente
- t : Espesor del material, en oz/ft^2

La columna de color verde en la Figura 47 muestra los anchos de pista mínimos que resultaron de hacer el cálculo para cada net, sin embargo, en la columna azul se muestran los anchos de pista que realmente se utilizaron para las conexiones en la PCB. Se utilizaron valores mayores a los requeridos con el objetivo de cumplir con los requerimientos del Cuadro 10 y sobredimensionar la placa para aumentar tanto la seguridad como la capacidad de conducción de las conexiones. Para la net de GND no se seleccionó un ancho de pista debido a que se decidió utilizar un polígono de cobre.

Pistas Externas								
Net	Componentes	Corriente de operación (mA)	Corriente máx. Total (mA)	Corriente de diseño I (A)	Área de pista A (mm ²)	Ancho de pista mín. W (mm)	Ancho de pista mín. W (mil)	Ancho de pista utilizado (mil)
3V3	ESP32-DevKitV1	500	823.623	1	16.296	0.3004	11.8258	30.0
	Wio-E5	118						
	AHT10	0.023						
	TSL2561	0.6						
	Sensor capacitivo	5						
	Bobina de relés (2)	200						
GPIO#								
UART								
I2C	*	20	20	0.1	0.680	0.0125	0.4938	25.0
CTRL#	Reles	1000	1000	3	74.162	1.3670	53.8183	55.0
GND	-	1000	1000	1	16.296	0.3004	11.8258	N/A

Figura 47: Resumen del cálculo para ancho de pistas

En las Figuras 48 y 49 se observa el posicionamiento de los componentes en la placa y sus respectivas conexiones, estas se realizaron siguiendo el esquemático que se muestra en la Figura 46. También se puede observar que se utilizaron dos polígonos de cobre, uno para la red de GND y otro para la net de alimentación para los actuadores.

La mayoría de conexiones se hacen en la capa inferior de la placa, esto debido a que los componnetes son del tipo *Through Hole* (THT), por lo que necesitan orificios pasantes para poder montarse y soldarse a la placa. Considerando esta característica de los componetes, se decidió utilizar una placa con una sola cara de cobre para la fabricación. Por lo tanto, se buscó minimizar al máximo las conexiones en la capa superior y únicamente dejar tramos rectos para poder utilizar *jumpers* en su lugar.

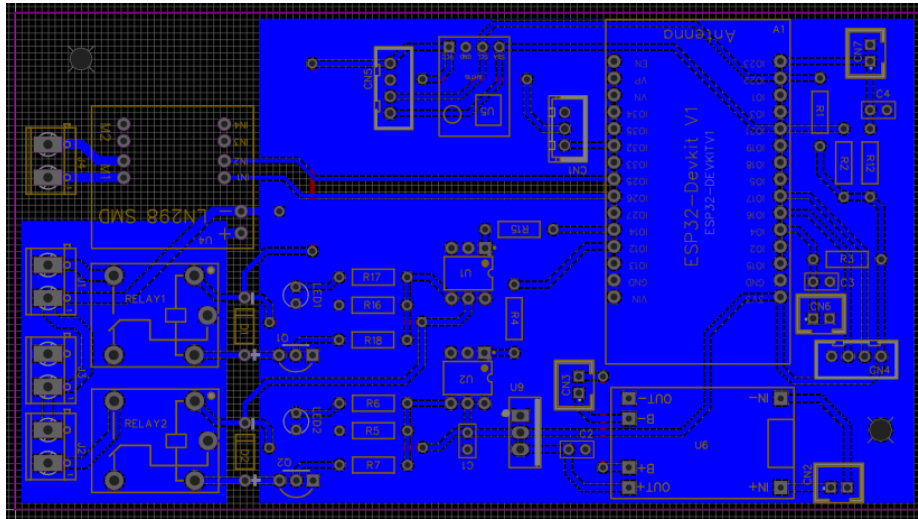


Figura 48: Capa inferior de la PCB

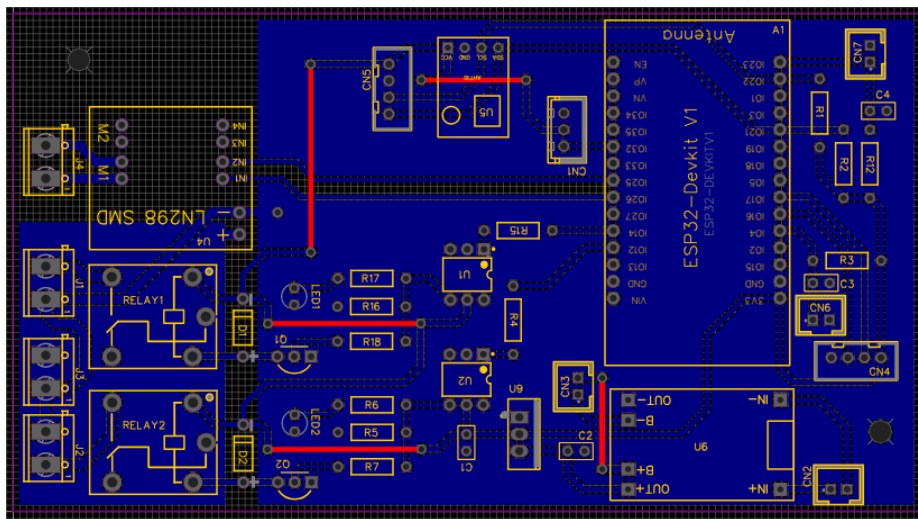


Figura 49: Capa superior de la PCB

En la Figura 50 se muestra una vista 3D de la placa y cómo quedarían montados los componentes una vez que se haya realizado la soldadura con estaño. Por otro lado, en la Figura 51 se muestra el resultado de la fabricación de la PCB utilizando una placa de cobre de una sola capa y la fresadora CNC.

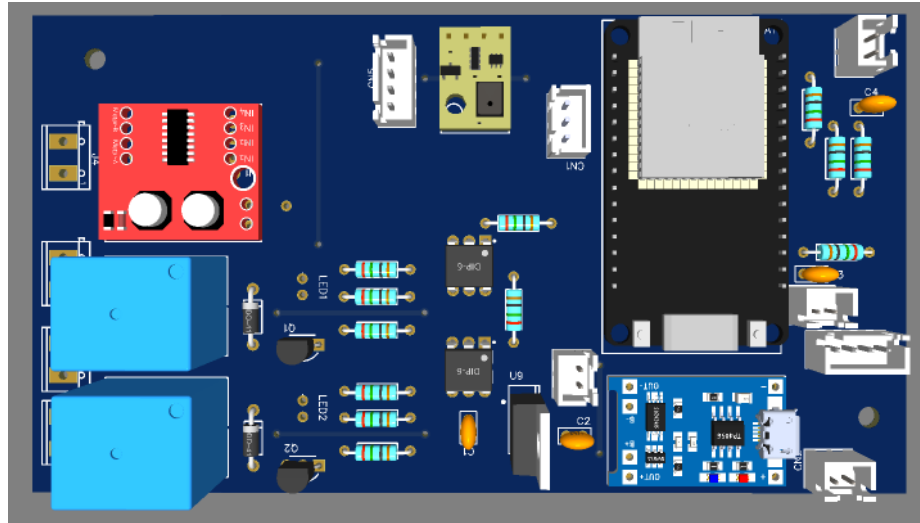


Figura 50: Modelo 3D de la PCB y los componentes

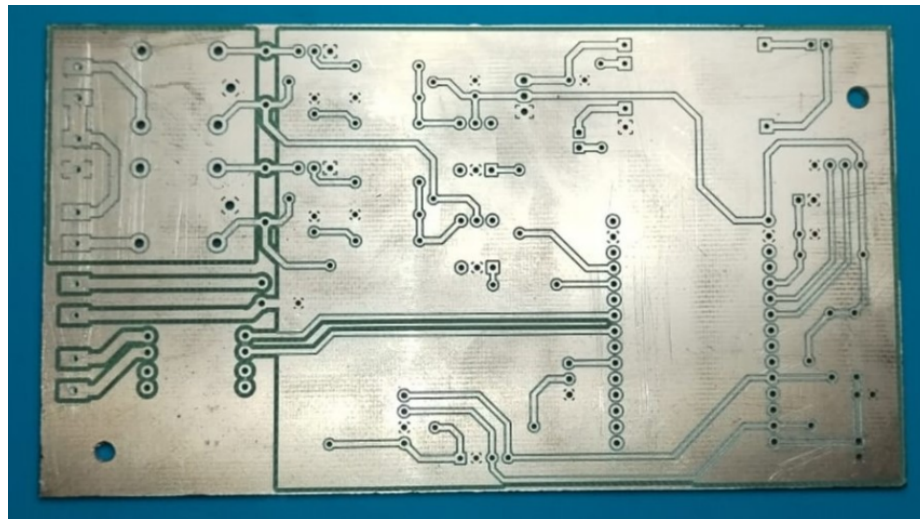


Figura 51: Fabricación de la PCB con fresadora CNC

8.2.2. Soldadura de componentes

El proceso de soldadura se realizó siguiendo los pasos que se listan a continuación:

- Montaje y soldadura de los *jumpers* en la capa superior
- Montaje y soldadura de resistencias, capacitores, diodos y conectores

- Montaje y soldadura de circuitos integrados y transistores
- Montaje y soldadura el sensor de temperatura y el driver para motor DC
- Montaje y soldadura del microcontrolador y el módulo de carga
- Montaje y soldadura de relés y borneras de conexión

En la Figura 52 se muestran los puntos de soldadura que se aplicaron en la capa inferior de la placa para poder fijar los componentes y de esta manera tener las conexiones diseñadas anteriormente.

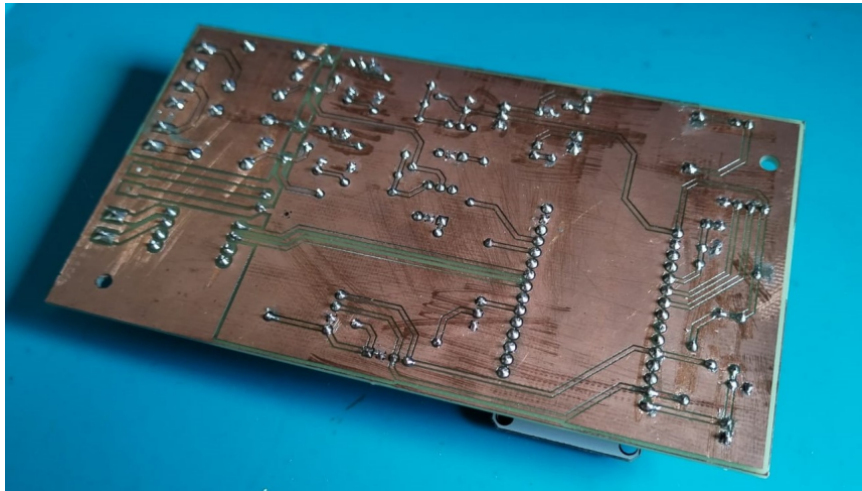


Figura 52: Soldadura de componentes en la PCB

Por otro lado, en la Figura 53 se muestra una vista de la capa superior donde se observan todos los componentes, de la misma forma que la vista 3D de la Figura 50, pero en esta ocasión con los componentes reales.

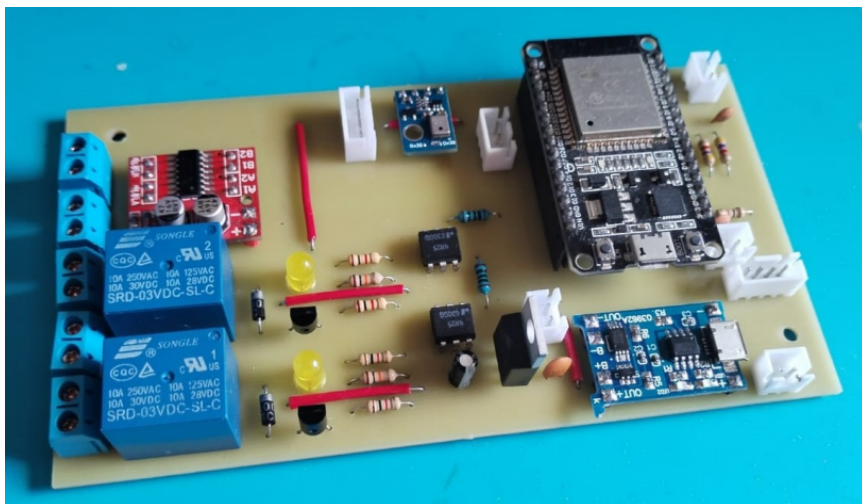


Figura 53: Resultado final de la soldadura

8.3. Firmware

Considerando el uso de un ESP32 como unidad de procesamiento de datos, se optó por desarrollar la lógica de funcionamiento en el entorno de programación *ESP-IDF*. Esto debido a que ofrece un amplio repertorio de bibliotecas entre las que destacan las necesarias para la implementación de FreeRTOS y todas sus propiedades.

Con el objetivo de mantener un código modular, escalable y fácilmente mantenible, se decidió realizar la implementación de módulos (conocidos como componentes en ESP-IDF). Estos permitieron organizar el código en bloques funcionales e independientes, cada uno con su propia responsabilidad. A continuación se muestra una lista de los componentes que se crearon e implementaron para desallorrar el *firmware* de la interfaz:

- `adc`: Se encarga de la configuración y lectura del adc.
- `digital-io`: Realiza la configuración de las entradas y salidas, así como el manejo de interrupciones para dichas entradas.
- `i2c-config`: Realiza la configuración del bus I2C para recibir datos de los sensores.
- `lora`: Realiza la configuración de la interfaz UART que se utiliza para la comunicación con el Wio-E5 y contiene las instrucciones para el envío de datos por LoRa.
- `system`: Se encarga de ejecutar la tarea principal, esta involucra el monitoreo de los datos obtenidos para la generación de alertas y activación de los sistemas correspondientes. También controla el tiempo de envío de los reportes a través de LoRa.
- `timers`: Se encarga de configurar y manejar las interrupciones de los timers que se utilizan para el sistema de riego.

8.3.1. Lectura del ADC

Para obtener los datos del sensor capacitivo fue necesario configurar y habilitar uno de los canales ADC que proporciona el microcontrolador. Esto se realizó tomando como base la documentación de Espressif para la biblioteca `adc_oneshot` [18]. Esta se caracteriza por realizar lecturas del adc bajo petición y no de forma continua, reduciendo el consumo de recursos y energía.

En el diagrama de la Figura 54 se muestra el proceso que se implementó para configurar el ADC mientras que en la Figura 55 se muestra el proceso para la obtención de datos del sensor.

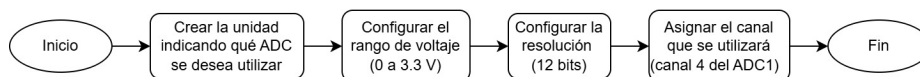


Figura 54: Diagrama de flujo para la configuración del ADC

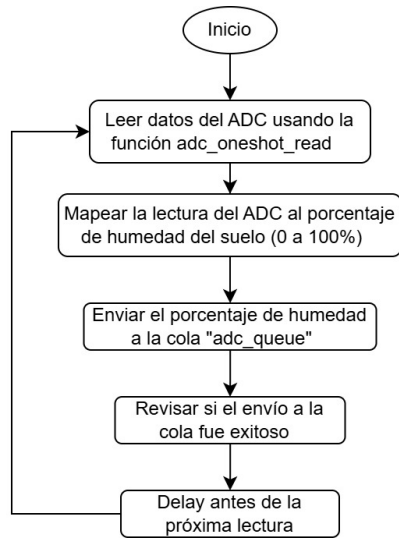


Figura 55: Diagrama de flujo para la lectura del sensor capacitivo

8.3.2. Entradas y salidas digitales

Para controlar los actuadores fue necesario configurar y habilitar algunos pines GPIO del microcontrolador como salidas, estas activan el circuito de control de los relés y, en consecuencia, los actuadores correspondientes. También se utilizaron salidas para controlar el giro del motorreductor que controla la extensión y retracción de la sombra. Debido a que el sistema también involucra el uso de finales de carrera para determinar el estado de la sombra, fue necesario configurar dos pines como entradas digitales.

En el diagrama de la Figura 56 se muestra el proceso que se implementó para configurar los pines GPIO del microcontrolador. Por otro lado, en la Figura 57 se muestra el proceso de obtención de datos de los finales de carrera.

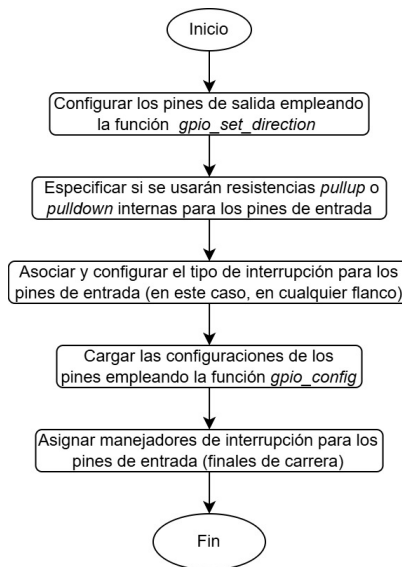


Figura 56: Diagrama de flujo para la configuración de las entradas y salidas

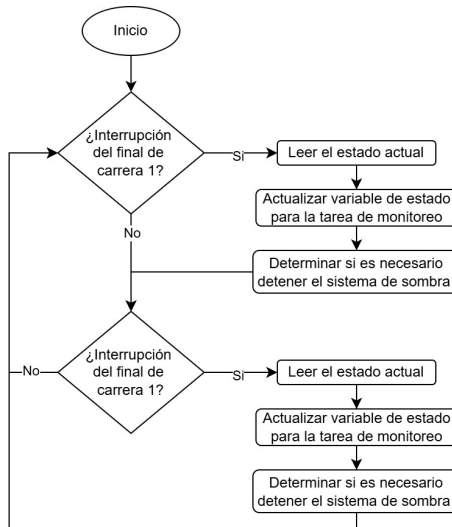


Figura 57: Diagrama de flujo para la lectura de los finales de carrera

8.3.3. Comunicación I2C

Para establecer comunicación con los sensores de temperatura e intensidad de luz y de esta manera obtener los datos de dichas variables, fue necesario configurar y habilitar el bus I2C del microcontrolador. Esto se realizó tomando como base la documentación de la biblioteca *i2c_master* que ofrece Espressif [18].

En el diagrama de la Figura 58 se muestra el proceso que se implementó para configurar el bus I2C mientras que en la Figura 59 se muestra el proceso para obtener los datos de temperatura, humedad relativa e intensidad de luz.

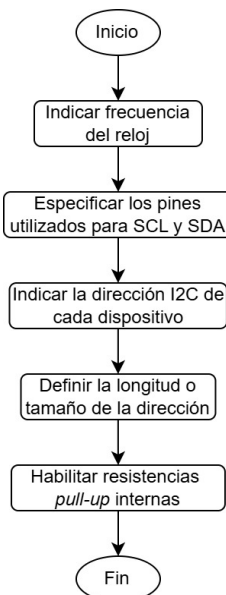


Figura 58: Diagrama de flujo para la configuración de la interfaz I2C

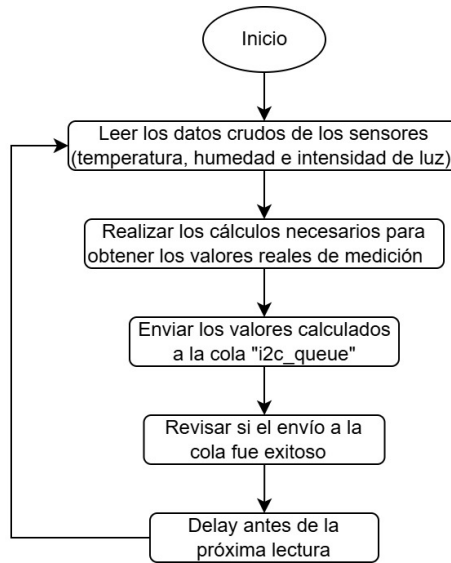


Figura 59: Diagrama de flujo para la lectura de los sensores de temperatura y luz

Para obtener los datos de temperatura y humedad reales, primero se requiere obtener los datos crudos del sensor. Este devuelve un total de 6 registros de datos, de 8 bits cada uno, cuando el microcontrolador inicia la comunicación y realiza una petición de lectura. De esos 6 registros, 5 corresponden a los datos de temperatura y humedad (2 registros completos para cada variable y un registro compartido) tal como se muestra en la Figura 60.

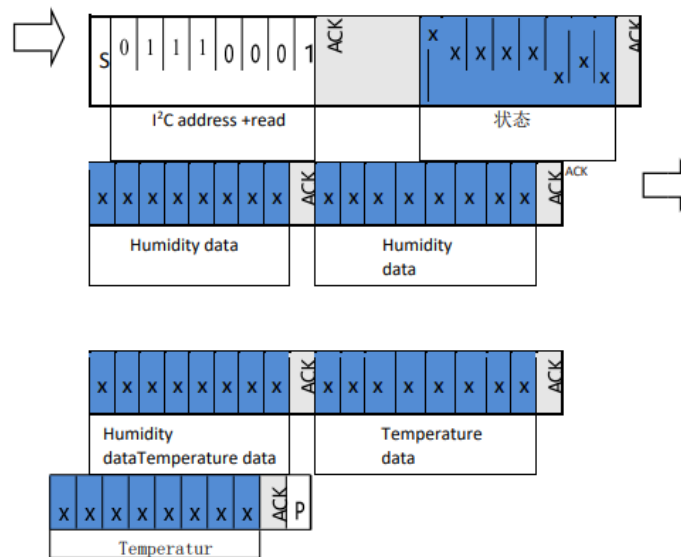


Figura 60: Estructura de datos que envía el sensor AHT10

Fue necesario manipular el registro compartido, mediante corrimiento de bits, para obtener los menos significativos de la humedad y los más significativos de la temperatura. Finalmente, se utilizaron las Ecuaciones 7 y 8 para calcular los valores reales de las magnitudes físicas correspondientes.

$$T = 200 \cdot \left(\frac{S_T}{2^{20}} \right) - 50 \quad (7)$$

Donde:

- T : Temperatura, en °C
- S_T : Datos crudos del sensor para la temperatura

$$RH = 100 \cdot \left(\frac{S_{RH}}{2^{20}} \right) \quad (8)$$

Donde:

- RH : Humedad relativa, en porcentaje
- S_{RH} : Datos crudos del sensor para la humedad

Por otro lado, para obtener los valores reales de intensidad de luz con el sensor TSL2561, primero fue necesario configurar el sensor estableciendo un tiempo de integración de 13.7 ms y una ganancia para la medición de 1, de acuerdo con la hoja de datos el fabricante.

Cuando el microcontrolador inicia la comunicación y lee los valores crudos de los dos canales de luz (canal de infrarrojo y canal de espectro completo), los utiliza para calcular la intensidad de luz en términos de luxes. Para esto, se realiza un escalamiento con base en el tiempo de integración y la ganancia, luego se determina la relación entre el canal infrarrojo y canal de espectro completo $CH1/CH0$ y, dependiendo el valor resultante, se utiliza una de las ecuaciones que se muestran en la Figura 61 para calcular la intensidad de luz en luxes.

T, FN, and CL Package	
For $0 < CH1/CH0 \leq 0.50$	$Lux = 0.0304 \times CH0 - 0.062 \times CH0 \times ((CH1/CH0)^{1.4})$
For $0.50 < CH1/CH0 \leq 0.61$	$Lux = 0.0224 \times CH0 - 0.031 \times CH1$
For $0.61 < CH1/CH0 \leq 0.80$	$Lux = 0.0128 \times CH0 - 0.0153 \times CH1$
For $0.80 < CH1/CH0 \leq 1.30$	$Lux = 0.00146 \times CH0 - 0.00112 \times CH1$
For $CH1/CH0 > 1.30$	$Lux = 0$

Figura 61: Ecuaciones para cálculo de la intensidad de luz en luxes

Finalmente, se utiliza la Ecuación 9 para obtener la radiación fotosintéticamente activa en términos de $\mu moles/m^2/s$ (la unidad que se utiliza para medir la cantidad de luz en una planta).

$$PAR = lux \cdot 0.0185 \quad (9)$$

Donde:

- PAR : Radiación fotosintéticamente activa, en $\mu moles/m^2/s$
- lux : Intensidad de luz, en luxes

8.3.4. Monitoreo y control

Esta parte del código se encarga de evaluar los datos obtenidos por los sensores y activar los sistemas de control según corresponda. La tarea realiza la lectura de los datos que se llegan a las colas *adc_queue* e *i2c_queue* y posteriormente los compara con los rangos óptimos para el crecimiento de las plantas C3. En la Figura 64 se observa el proceso que se realiza en la tarea principal de la interfaz.

8.3.5. Transmisión de datos

La comunicación entre el microcontrolador y el transceptor LoRa se realiza a través de UART, por lo tanto, es necesario configurar esta interfaz en el microcontrolador. En la Figura 62 se muestra el proceso que se implementó para configurar el puerto UART mientras que en la Figura 63 se muestra el proceso que se ejecuta para completar el envío de datos vía LoRa.

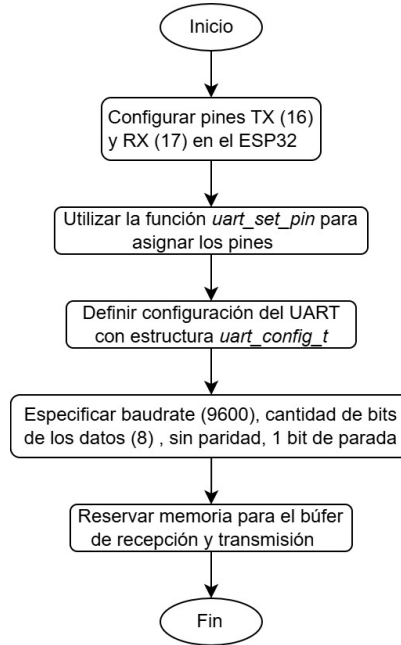


Figura 62: Diagrama de flujo para la configuración de la interfaz UART

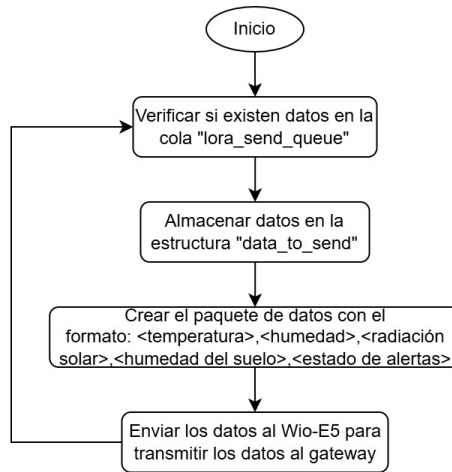


Figura 63: Diagrama de flujo de la tarea de transmisión de datos

Protocolo de transmisión

Es importante resaltar que toda la información se envía siguiendo el formato:

<temperatura>,<humedad>,<radiación solar>,<humedad del suelo>,<estado de alertas>

La variable <estado de alertas> contiene la información de qué alertas y sistemas están activos o inactivos. Por lo tanto, esta variable se interpreta tal como se muestra en el Cuadro [11](#).

Bit	Estado 0	Estado 1
0	Temperatura óptima	Temperatura excesiva, ventilación activa
1	Humedad relativa óptima	Humedad baja, ventilación activa
2	Radiación solar óptima	Radiación excesiva, sombra extendida
3	Humedad del suelo óptima	Humedad baja, riego activo

Cuadro 11: Interpretación de la variable <estado de alertas>

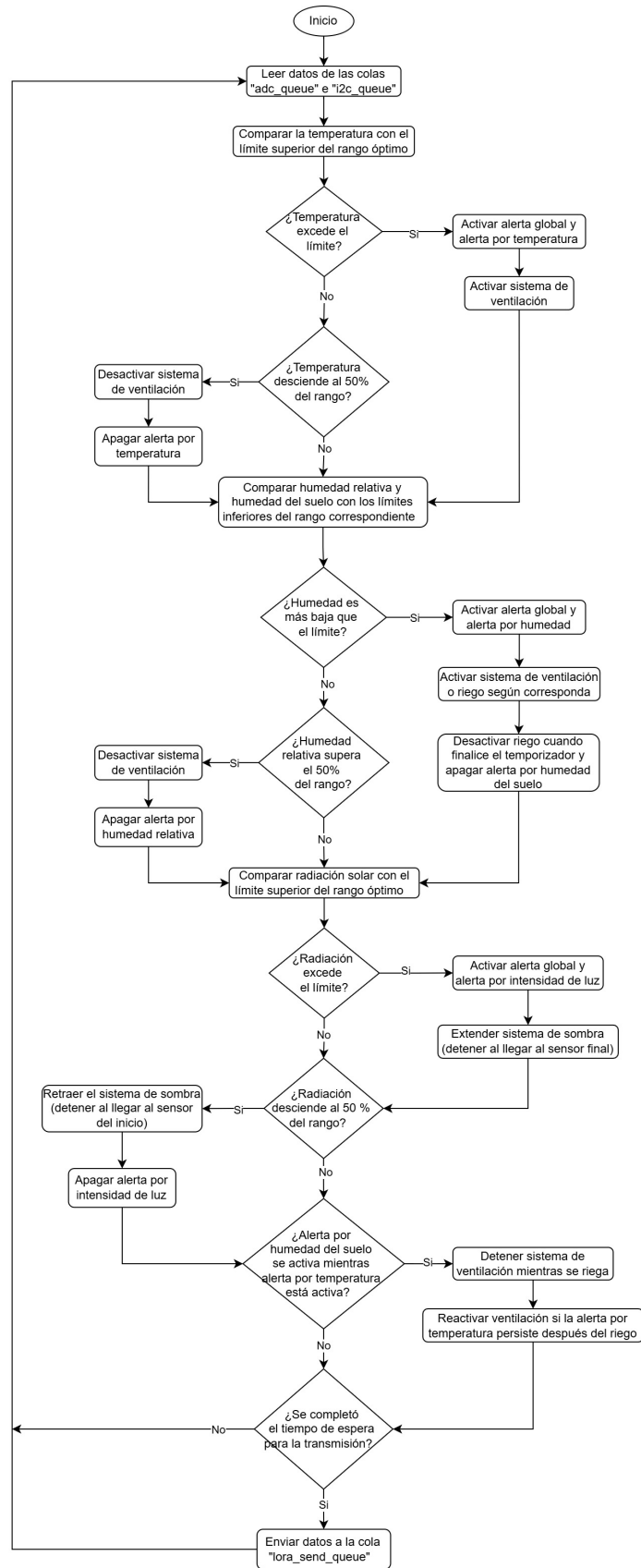


Figura 64: Diagrama de flujo de la tarea de monitoreo y control

Diseño y construcción del invernadero a escala

Como se mencionó anteriormente, los invernaderos son estructuras esenciales para la agricultura moderna, ya que permiten crear condiciones controladas que potencian el crecimiento de los cultivos. Existen diversos tipos de invernaderos, cada uno diseñado para adaptarse a diferentes climas y necesidades agrícolas, el Cuadro 12 muestra una comparación de los tipos de invernadero más comunes. Con base en esta información, se determinó que el invernadero tipo capilla es un modelo adecuado para realizar el invernadero a escala.

Este tipo de invernadero es capaz de adaptarse a diferentes climas, su diseño con techos en forma de capilla permite un buen control del microclima interno, facilitando la entrada de luz y reduciendo la condensación en cultivos sensibles como las flores y las hortalizas. Además, su estructura robusta es ideal para soportar condiciones climáticas adversas, como fuertes lluvias. Gracias a su capacidad de adaptación, el invernadero tipo capilla ofrece un equilibrio entre costo y funcionalidad, permitiendo un manejo eficiente de los cultivos sin requerir demasiados recursos adicionales para sistemas de ventilación o calefacción.



Figura 65: Modelo de invernadero seleccionado - Tipo capilla

9.1. Estructura

El diseño de la estructura del invernadero a escala se realizó con base en las dimensiones de las piezas que se reciclaron de un armario armable como el que se muestra en la Figura 66. Se decidió utilizar estas piezas debido a que los elementos estructurales son tubos de aluminio, por lo que se aprovecharon las siguientes ventajas:

- Resistencia a la corrosión: Necesaria para soportar las condiciones climáticas variables de un invernadero, tales como la exposición continua a la humedad y la radiación solar.
- Ligereza: Facilita el montaje y la manipulación de otros elementos, permitiendo una instalación rápida y sencilla, lo cual es importante en una estructura a escala.
- Rigidez estructural: Capacidad para soportar la cubierta y los accesorios del invernadero sin comprometer la estabilidad.
- Reutilización: Reduce los costos del proyecto y promueve prácticas sostenibles al dar un nuevo uso a materiales que de otra manera serían descartados.



Figura 66: Armario

Para facilitar el resto del diseño, se creó un modelo 3D de las piezas utilizando el software Autodesk Inventor. La longitud de los tubos de aluminio es de 34 cm mientras que su diámetro externo es de $5/8$ de pulgada. Los modelos se utilizaron para crear una estructura base como la que se muestra en la Figura 67 y a partir de esta poder diseñar el resto de elementos para el invernadero a escala.

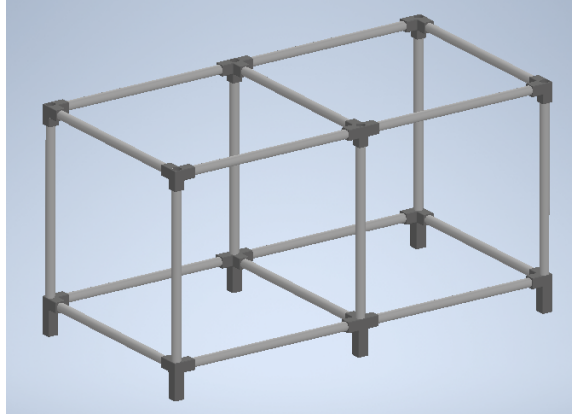


Figura 67: Estructura base creada con el modelo 3D de la piezas

Partiendo de la elección de un invernadero tipo capilla como modelo, el diseño del techo se realizó considerando como uniones dos piezas que son comunes en plomería: codos a 90° y codos a 45° . El diámetro interno de estas piezas es de $5/8$ de pulgada, por lo que no fue necesario realizar algún tipo de acople para utilizar los tubos de aluminio. En la Figura 68 se muestra el diseño para el techo tipo capilla, los codos a 45° unen los tubos inclinados con los tubos verticales que se insertan en la estructura base, por otro lado, los codos a 90° unen los tubos inclinados entre sí para formar la capilla.

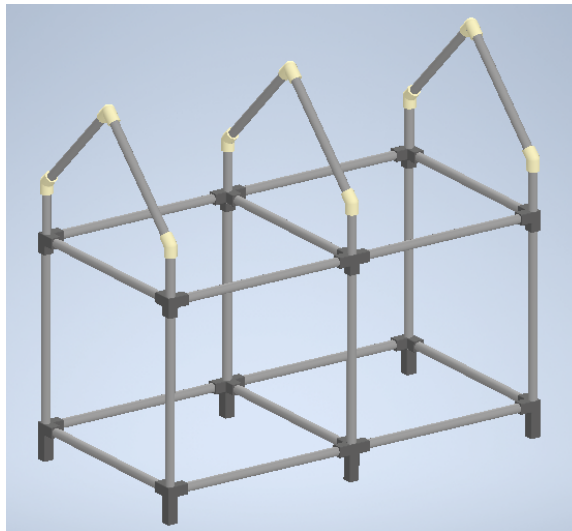


Figura 68: Estructura del techo tipo capilla

Finalmente, se decidió construir un cajón con piezas de madera para cubrir la parte inferior del invernadero, tal como se observa en la Figura 69. Esto con el fin de brindar mayor soporte a la estructura y poder transportar el invernadero al momento de agregar la tierra y cultivos en el interior.

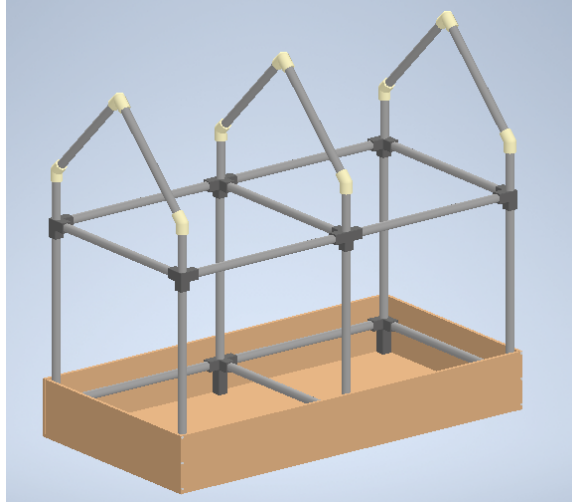


Figura 69: Base de madera para el invernadero

9.2. Sistema de riego

Tal como se mencionó en la Sección 7.1, el invernadero contará con un sistema de riego por aspersión. Para el diseño de este sistema se decidió considerar el uso de tubería CPVC con diámetro interior de 1/2 pulgada (el más pequeño disponible comercialmente) con el objetivo de tener una menor área de sección transversal y con ello mayor presión de agua, de acuerdo con la Ecuación 4.

El diseño de este sistema se realizó de tal forma que se tuviera un aspersor para cada sección cuadrada del invernadero y con esto distribuir de mejor forma el agua a todo el cultivo. En la Figura 70 se muestra la estructura del sistema de riego en la que se utilizan codos a 90° y una unión T para conectar las secciones de la tubería. Los aspersores se muestran dentro de los círculos rojos mientras que la pieza dentro del círculo azul es un acople que de diseño para conectar la manguera que viene de la bomba.

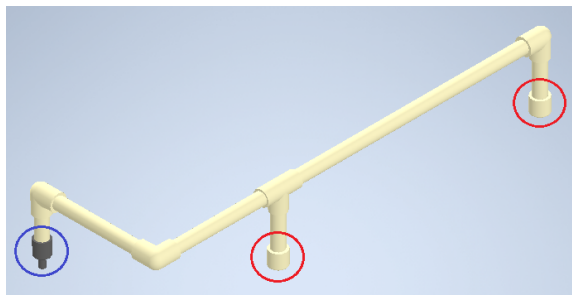


Figura 70: Diseño del sistema de riego

El diseño de los aspersores consiste en un tapón de tubería al que se le hace un orificio en el centro y cuatro orificios más alrededor, como se muestra en la Figura 71. En el orificio central se coloca un tornillo cuya cabeza debe cubrir los otros orificios. Cuando el agua fluye, choca con la cabeza del tornillo al momento de salir por los agujeros pequeños y se dispersa alrededor, de esta forma el agua cubre mayor área y no cae en un solo punto.



Figura 71: Diseño de los aspersores

9.3. Sistema de ventilacion

El sistema de ventilación está compuesto únicamente por su actuador, el ventilador *brushless*, por lo que solamente se realizó el diseño de un par de sujetadores que permitieran fijar el ventilador a la estructura del invernadero, tal como se muestra en la Figura [72](#).

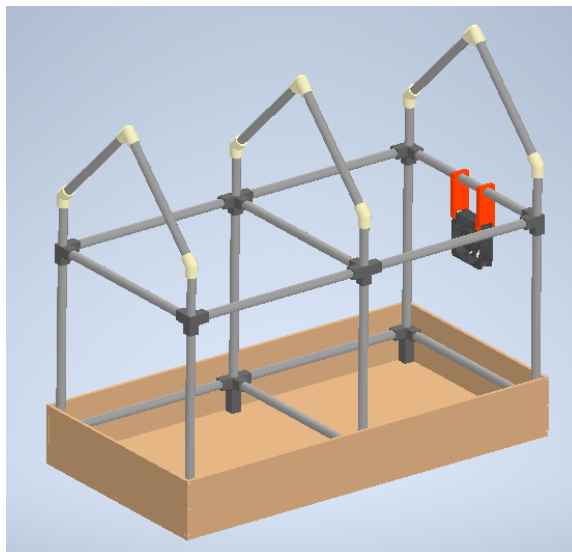


Figura 72: Sujetadores para el ventilador *brushless*

9.4. Sistema de sombra

El mecanismo de este sistema requirió un diseño con mayor detalle, ya que debía ser capaz de extender y retraer la sombra cuando fuera necesario y no se contaba con piezas ya fabricadas (como el caso de las tuberías CPVC). Por lo tanto, se tomó como base el mecanismo que utilizan las impresoras 3D para mover el extrusor (Figura 73).

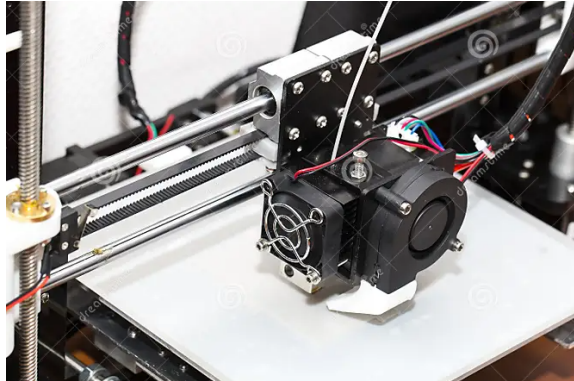


Figura 73: Mecanismo modelo para el sistema de sombra

Inicialmente se consideró un mecanismo compuesto por dos poleas lisas, estas sostenían cada extremo de una cuerda de 1 mm de grosor para mover la malla que serviría como sombra. Sin embargo, al momento de realizar pruebas se determinó que el peso de la malla provocaba que la cuerda se desviara de su recorrido normal, evitando el avance de la sombra. Por esta razón, se decidió implementar el mecanismo de las impresoras 3D en ambos lados del invernadero. Los carros se unieron utilizando una varilla, con el objetivo de que movieran al mismo tiempo y mantener tensada la malla sombra en todo el recorrido (Figura 74).

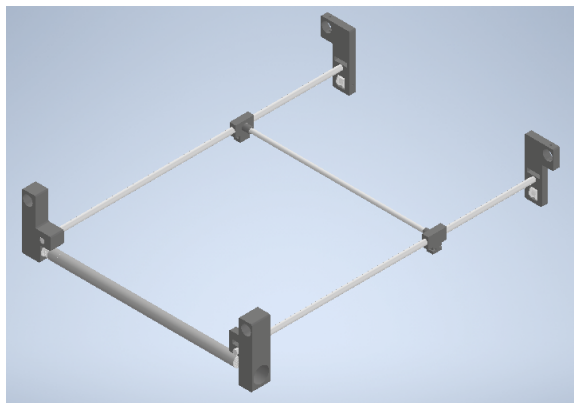


Figura 74: Diseño del sistema de sombra

Fue necesario diseñar tres tipos de soporte con el objetivo de montar todos los elementos del sistema: carriles, el motorreductor, las fajas dentadas que dan movimiento a los carros y el rodillo que se encargaría de enrollar la malla.

El primer tipo de soporte se muestra en la Figura 75, se caracteriza por tener un agujero para poder introducirlo en los tubos de la estructura, una cavidad circular en la parte trasera para alojar al motorreductor, una cavidad rectangular para el final de carrera y un agujero pasante para soportar el carril.

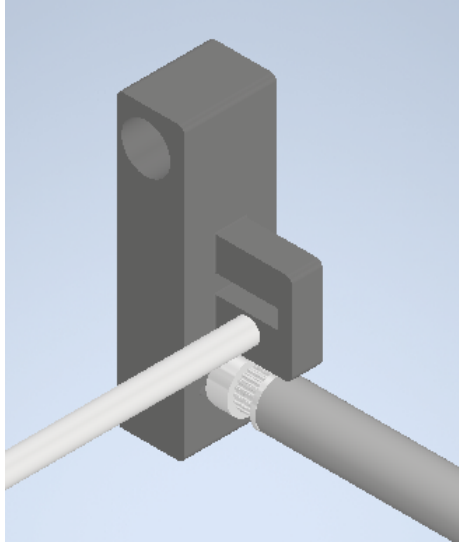


Figura 75: Soporte tipo 1

El segundo tipo se muestra en la Figura 76, este cuenta con el agujero para colocarlo en los tubos de la estructura, tiene una cavidad para alojar una de las poleas que sostiene la faja dentada del lado izquierdo y también un agujero para el carril correspondiente.

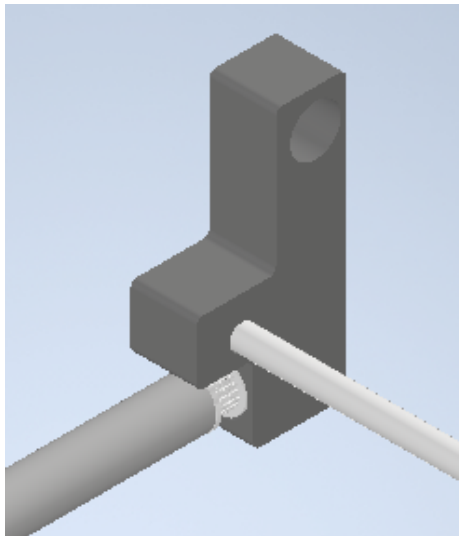


Figura 76: Soporte tipo 2

El tercer tipo se muestra en la Figura 77 y también cuenta con el agujero para colocarlo en los tubos de la estructura, una cavidad para alojar una polea lisa (esta funciona como tensor de la faja), una segunda cavidad para el final de carrera y el agujero para sostener el otro extremo del carril.

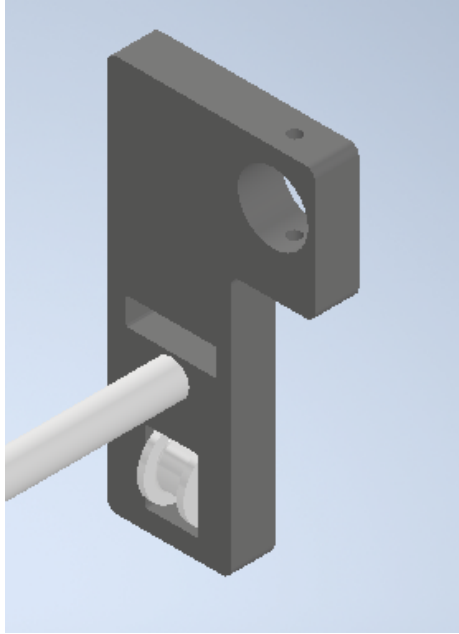


Figura 77: Soporte tipo 3

Finalmente, en la Figura 78 se observa la construcción de la estructura completa del invernadero a escala, así como el montaje de los sistemas de ventilación, riego y sombra en dicha estructura.

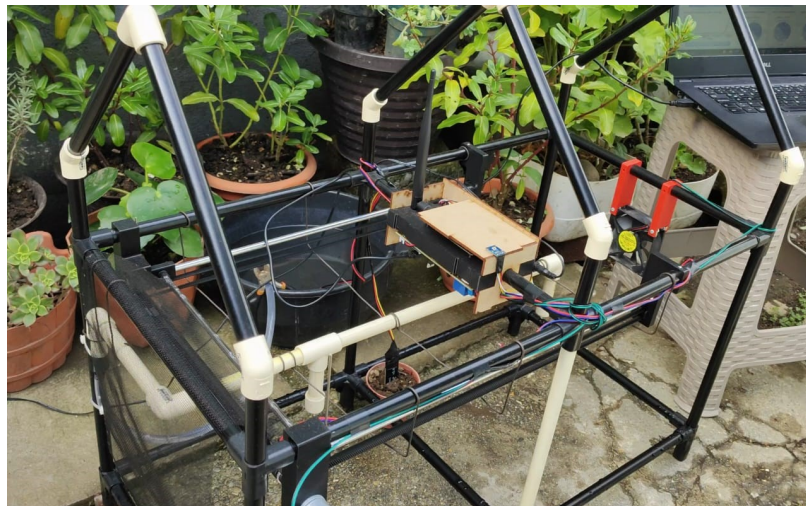


Figura 78: Construcción del invernadero a escala

Característica	Túnel	Capilla	Diente de Sierra	Venlo
Estructura	Arco semicircular simple	Techos en forma de capilla	Techos inclinados como una sierra	Techos múltiples con grandes paneles
Ventilación	Limitada	Moderada	Excelente	Alta
Uso de materiales	Menor cantidad de materiales	Mayor cantidad de materiales	Intermedio, requiere ventanas para ventilación	Mayor cantidad de materiales avanzados
Climas aptos	Fríos o templados con poca precipitación	Diversos climas	Cálidos y húmedos	Diversos climas
Aplicaciones típicas	Hortalizas y flores a pequeña escala	Hortalizas, flores	Hortalizas, frutales y cultivos tropicales	Hortalizas, floricultura y cultivo intensivo

Cuadro 12: Comparación de características entre los tipos de invernadero.

En este capítulo se detalla el procedimiento que se realizó para comprobar el funcionamiento de la interfaz de medición y control, desde la obtención de los datos hasta su visualización en la interfaz gráfica en la nube, así como de los sistemas de control en el invernadero.

10.1. Monitoreo y control

Para esta parte se utilizó la biblioteca *esp_log* que ofrece el entorno ESP-IDF para mostrar mensajes (*logs*) en la consola de VS Code, estos mensajes pueden ser de tres tipos: información, avisos o errores. Se decidió utilizar los mensajes de información para visualizar los datos recolectados por los sensores, mensajes de aviso para indicar la activación o desactivación de los sistemas de control y mensajes de error para indicar la activación de las alertas generadas al tener mediciones fuera de los rangos óptimos.

El mensaje de información (de color verde) contiene los datos de temperatura, humedad relativa, radiacion y humedad del suelo. El mensaje de alerta (de color rojo) da información de qué variable está fuera de su rango óptimo y cual es su valor actual. Por otro lado, el mensaje de aviso (de color amarillo) indica cuál de los sistemas de control se activó para corregir la variable que presentó la alerta.

En el caso de la Figura [79](#), el sistema de ventilación se activó debido a que el valor de esta variable excedió el rango óptimo, por otro lado, en la Figura [80](#) el sistema de ventilación se activó debido a un valor por debajo del rango aceptable para la humedad relativa.

```
PROBLEMS OUTPUT TERMINAL PORTS ESP-IDF SERIAL MONITOR DEBUG CONSOLE

I (11418) main_task: Returned from app_main()
I (11518) i2c: Temperature: 31.27 °C | Humidity: 51.70 RH | PAR: 18.76 µmol/m²/s
E (11618) main: Temperature too high! Current: 31.27
W (11618) digital-io: Ventilación activa
I (71418) adc-lecture: Soil Moisture: 30
```

Figura 79: Alerta por temperatura y activación del sistema correspondiente

```
PROBLEMS OUTPUT TERMINAL PORTS ESP-IDF SERIAL MONITOR DEBUG CONSOLE

I (11418) main_task: Returned from app_main()
I (11518) i2c: Temperature: 32.05 °C | Humidity: 48.89 RH | PAR: 0.68 µmol/m²/s
E (11618) main: Humidity too low! Current: 48.89
W (11618) digital-io: Ventilación activa
I (71418) adc-lecture: Soil Moisture: 28
```

Figura 80: Alerta por humedad relativa y activación del sistema correspondiente

El comportamiento ante una alerta por radiación solar excesiva se caracteriza por activar la extensión del sistema de sombra y desactivarlo cuando se detecta presencia en el sensor del final del recorrido. Sin embargo, la alerta se mantiene activa hasta que el nivel de radiación disminuya y de esta manera el sistema pueda retraerse y eliminar la alerta hasta que se vuelva a detectar presencia el sensor del inicio. Tal como se muestra en los logs de la Figura [81](#).

```
PROBLEMS OUTPUT TERMINAL PORTS ESP-IDF SERIAL MONITOR DEBUG CONSOLE

E (131918) main: Ligth too high! Current: 24.99
W (131918) digital-io: Sombra extendida
I (191418) adc-lecture: Soil Moisture: 30
I (191818) i2c: Temperature: 32.04 °C | Humidity: 48.85 RH | PAR: 22.18 µmol/m²/s
I (251418) adc-lecture: Soil Moisture: 30
I (251918) i2c: Temperature: 32.07 °C | Humidity: 49.25 RH | PAR: 18.65 µmol/m²/s
W (305818) digital-io: Sombra inactiva
I (311418) adc-lecture: Soil Moisture: 27
I (312018) i2c: Temperature: 31.92 °C | Humidity: 48.91 RH | PAR: 18.61 µmol/m²/s
I (371418) adc-lecture: Soil Moisture: 28
I (372118) i2c: Temperature: 31.83 °C | Humidity: 50.33 RH | PAR: 0.72 µmol/m²/s
W (372218) digital-io: Sombra retraida
W (386618) digital-io: Sombra inactiva
I (431418) adc-lecture: Soil Moisture: 28
```

Figura 81: Alerta por radiación solar y activación del sistema correspondiente

El problema que se identificó en la implementación del sistema de sombra fue que la malla avanza linealmente más lento de lo que se enrolla o desenrolla. Por ejemplo, la malla se desenrolla por completo antes de llegar al final de carrera, por lo tanto, el motor no detiene su movimiento y la malla se enrolla de nuevo sin haberse extendido por completo. Para resolver este problema se determinó que la mejor opción es implementar un sistema de engranes cuya relación permita igualar la velocidad a la que avanza la sombra con la velocidad a la que gira el rodillo.

El comportamiento ante una alerta de humedad del suelo baja se caracteriza por desactivar el sistema de ventilación (si estaba activo) para darle prioridad al sistema de riego durante el periodo establecido. Esto debido a que el riego por aspersión puede aumentar la humedad del ambiente y reducir la temperatura al momento de liberar el agua en el interior del invernadero, por lo tanto, el sistema de ventilación se activa después del riego solo si es necesario. Esto se puede observar en los *logs* de la Figura [82](#).

```
PROBLEMS  OUTPUT  TERMINAL  PORTS  ESP-IDF  SERIAL MONITOR  DEBUG CONSOLE
I (11518) i2c: Temperature: 31.27 °C | Humidity: 51.70 RH | PAR: 18.76 µmol/m²/s
E (11618) main: Temperature too high! Current: 31.27
W (11618) digital-io: Ventilación activa
I (71418) adc-lecture: Soil Moisture: 30
I (71618) i2c: Temperature: 31.32 °C | Humidity: 51.71 RH | PAR: 19.50 µmol/m²/s
I (131418) adc-lecture: Soil Moisture: 28
E (131418) main: Soil moisture too low! Current: 28
W (131418) digital-io: Riego activo
W (131418) digital-io: Ventilación inactiva
I (131718) i2c: Temperature: 31.35 °C | Humidity: 51.92 RH | PAR: 15.43 µmol/m²/s
W (151418) digital-io: Riego inactivo
E (151518) main: Temperature too high! Current: 31.35
W (151518) digital-io: Ventilación activa
I (191418) adc-lecture: Soil Moisture: 30
I (191818) i2c: Temperature: 31.42 °C | Humidity: 50.83 RH | PAR: 18.17 µmol/m²/s
```

Figura 82: Alerta por humedad del suelo y activación del sistema correspondiente

Habiendo observado el comportamiento del sistema, utilizando *logs*, se concluyó que el firmware desarrollado cumple con el objetivo de medir y activar sistemas para controlar las variables ambientales del invernadero.

10.2. Transmision de datos a la nube

Para enviar los datos recolectados por el nodo LoRaWAN (la interfaz de medición) a la nube, primero fue necesario configurar la capa física del protocolo LoRaWAN para que el gateway pudiera recibir los datos del nodo y redigirlos al servidor de red.

La configuración de la capa física requiere que el gateway escuche los mensajes en la misma banda de frecuencias en la que transmite el nodo, en el caso de Guatemala, se utilizan las frecuencias de la región US915 que van de los 902 a los 928 MHz. Considerando que el gateway es capaz de escuchar información en 8 canales diferentes al mismo tiempo, se configuraron ambos dispositivos (nodo y gateway) para operar en los canales 8 al 15 para el envío de datos (*uplink*) y el canal 65 para la recepción (*downlink*).

También se configuró el gateway para redirigir los datos al servidor de *The Things Stack* (TTS) donde previamente se había creado una cuenta y registrado el gateway utilizando su EUI. En la interfaz de este servidor también es necesario registrar al nodo mediante su EUI y un AppKey, esto con el objetivo de autenticar al dispositivo y que el servidor no rechace los datos que transmite.

Con los pasos anteriores se logró tener la transmisión de los datos desde el nodo al servidor de red, sin embargo, estos llegan en formato hexadecimal y es necesario crear un *decoder* en lenguaje *Javascript* para que el servidor pueda interpretar los datos que llegan desde el nodo: la temperatura, humedad, etc. En la Figura 83 se muestra el *decoder* que se creó para interpretar las variables dentro del servidor, tal como se muestra en la Figura 84.

Formatter type*

Custom Javascript formatter

Formatter code*

```

1 function decodeUplink(input) {
2   // Convertir cada byte de ASCII a caracteres
3   var payloadString = String.fromCharCode.apply(null, input.bytes);
4   // Separar el string en bytes usando la coma como delimitador
5   var bytes = payloadString.split(',');
6
7   var temperature = parseInt(bytes[0]);
8   var humidity = parseInt(bytes[1]);
9   var lighth = parseInt(bytes[2]);
10  var soil_moisture = parseInt(bytes[3]);
11  var alerts = parseInt(bytes[4]);
12
13  var temperature_alert = (alerts & 0b00000001); // Bit 0
14  var humidity_alert = (alerts & 0b00000010) >> 1; // Bit 1
15  var light_alert = (alerts & 0b00000100) >> 2; // Bit 2
16  var soil_moisture_alert = (alerts & 0b00001000) >> 3; // Bit 3
17
18  return {
19    data: {
20      temperatura: temperature,
21      humedad: humidity,
22      radiacion: lighth,
23      humedad_suelo: soil_moisture,
24      alerta_temperatura: temperature_alert,
25      alerta_humedad: humidity_alert,

```

Figura 83: Decoder implementado en el servidor de red

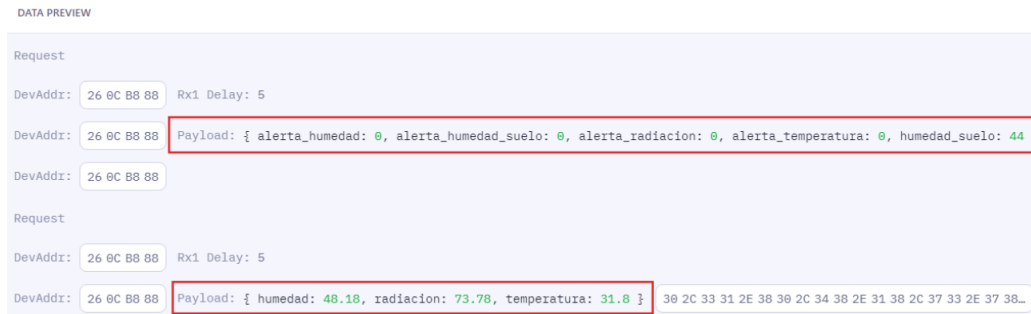


Figura 84: Logs de los datos interpretados en el servidor

10.3. Despliegue en la interfaz grafica

A pesar de que el *decoder* permite interpretar los datos dentro del servidor de red, estos no se almacenan de forma permanente y solo se pueden visualizar mientras se tiene una sesión activa en el servidor. Considerando esto y, con el objetivo de que el usuario final pueda tener una mejor visualización de los datos, se decidió implementar una interfaz gráfica utilizando la plataforma Ubidots.

Se escogió esta plataforma debido a que ofrece un plan gratuito y la integración con el servidor de TTS es sencilla, solamente se requiere crear una cuenta y un *plugin* que sirve como enlace entre la plataforma y el servidor. La plataforma cuenta con la opción de crear un *dashboard* para visualizar los datos y compararlo a través de un enlace, por lo que facilita la visualización de los datos en tiempo real debido a que no se requiere algún tipo de registro o inicio de sesión, a menos que se quiera analizar el historial de los datos.

En la Figura 85 se observan los elementos que se crearon en el *dashboard* para visualizar los datos del nodo. Se crearon gráficas para cada variable (temperatura, humedad relativa, radiación solar y humedad del suelo) para poder observar de mejor forma el comportamiento de estas variables a lo largo del tiempo y no solo el valor actual. Por otro lado, se crearon indicadores para el estado de cada alarma con el fin de indicar el estado de los sistemas correspondientes, es decir, si están activos o no.



Figura 85: *Dashboard* de la interfaz gráfica

El enlace al *dashboard* es el siguiente: [Interfaz gráfica - Medición y control del invernadero.](#)

10.4. Rangos de transmicion

Para evaluar la calidad de la transmisión de datos mediante modulación LoRa, se decidió realizar pruebas de comunicación en dos tipos de ambiente: ciudad (donde existen interferencias y obstáculos como edificios y otras señales) y campo abierto (donde las condiciones son menos obstructivas para la señal de transmisión). El objetivo de estas pruebas fue comparar los indicadores del RSSI de la señal transmitida por LoRa y de esta manera establecer rangos de transmisión óptimos.

10.4.1. Pruebas en ciudad

Las pruebas en ciudad se realizaron en los siguientes entornos:

- Entorno 1: Gateway en la azotea del edificio CIT de la Universidad del Valle y nodo en alrededores de la universidad
- Entorno 2: Gateway en la azotea del edificio Campus TEC de la zona 4 de la Ciudad de Guatemala y nodo en alrededores de dicha zona
- Entorno 3: Gateway en la azotea del CIT y nodo en la azotea del Campus TEC
- Entorno 4: Gateway en el nivel 2 del CIT y nodo en alrededores de la universidad

En la Figura 86 se muestra una gráfica del indicador de potencia de la señal recibida (RSSI) durante el tiempo que duraron las pruebas del entorno 1. Por otro lado, el Cuadro 13 muestra el RSSI promedio para cada distancia que se analizó en este entorno, así como la pérdida de la señal y el exponente de pérdida calculados con las Ecuaciones 1 y 2 respectivamente. En la Figura 87 se muestran las ubicaciones de los puntos que se describen en el Cuadro 13.

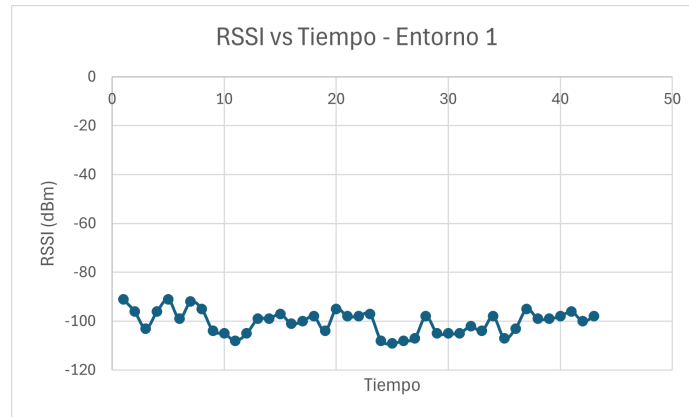


Figura 86: Comportamiento del RSSI a medida que avanzaba el tiempo y se modificaba la distancia

Punto	Distancia (m)	RSSI (dBm)	Pérdida (dBm)	n
A	84.66	-96.00	110.00	3.98
B	221.05	-98.89	112.89	3.40
C	308.07	-99.00	113.00	3.21

Cuadro 13: Datos obtenidos durante las pruebas del entorno 1



Figura 87: Mapa del entorno 1

De la misma forma, en la Figura 88 se muestra una gráfica del RSSI durante el tiempo que duraron las pruebas del entorno 2. El Cuadro 14 muestra el RSSI promedio para la distancia que se analizó en este entorno, así como la pérdida de la señal y el exponente de pérdida calculados con las Ecuaciones 1 y 2 respectivamente. En la Figura 89 se muestra la ubicación del punto que se describe en el Cuadro 14.

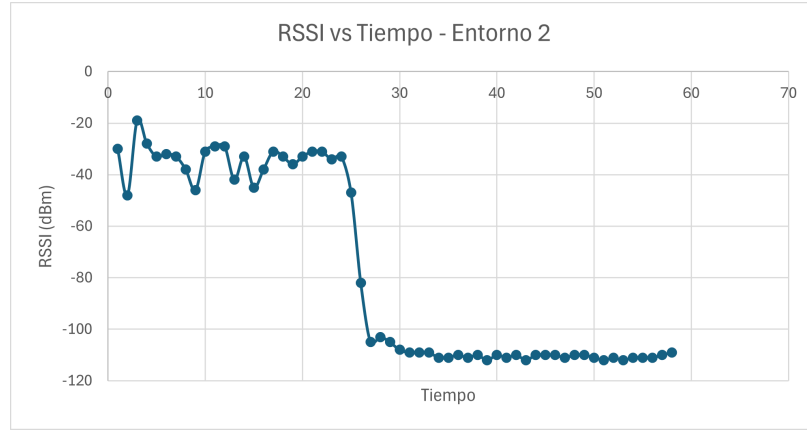


Figura 88: Comportamiento del RSSI a medida que avanzaba el tiempo y se modificaba la distancia

Punto	Distancia (m)	RSSI (dBm)	Pérdida (dBm)	n
A	322.29	-110.41	124.41	3.64

Cuadro 14: Datos obtenidos durante las pruebas del entorno 2

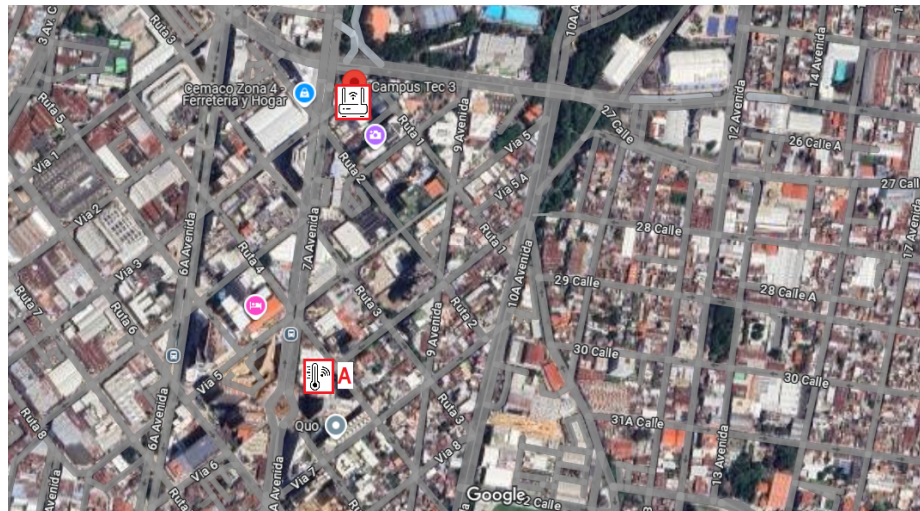


Figura 89: Mapa del entorno 2

Como antes, en la Figura 90 se muestra una gráfica del RSSI durante el tiempo que duraron las pruebas del entorno 3. El Cuadro 15 muestra el RSSI promedio para la distancia que se analizó en este entorno, así como la pérdida de la señal y el exponente de pérdida calculados con las Ecuaciones 1 y 2 respectivamente. En la Figura 91 se muestra la ubicación del punto que se describe en el Cuadro 15.

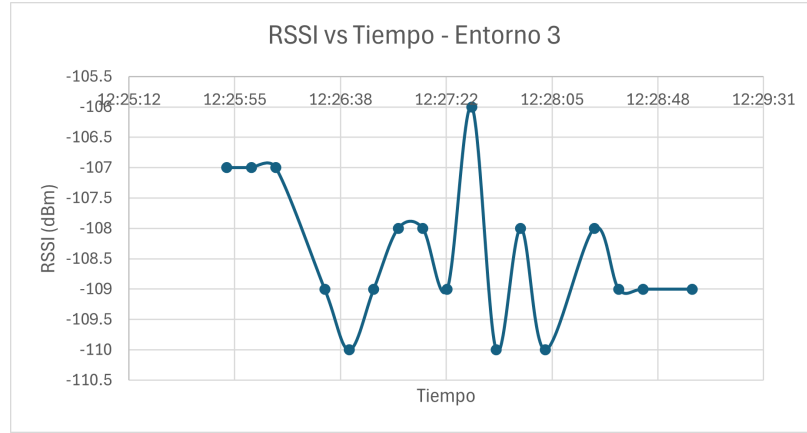


Figura 90: Comportamiento del RSSI a medida que avanzaba el tiempo y se modificaba la distancia

Punto	Distancia (m)	RSSI (dBm)	Pérdida (dBm)	n
A	3250.00	-108.41	122.41	2.54

Cuadro 15: Datos obtenidos durante las pruebas del entorno 3

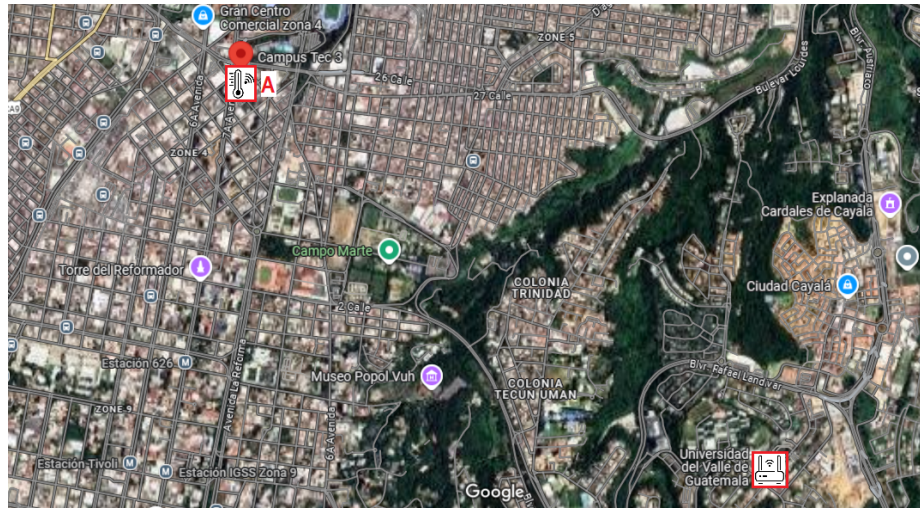


Figura 91: Mapa del entorno 3

Finalmente, en la Figura 92 se muestra la gráfica del RSSI durante el tiempo que duraron las pruebas del entorno 4. El Cuadro 16 muestra el RSSI promedio para las distancias que se analizaron en este entorno, así como la pérdida de la señal y el exponente de pérdida calculados con las Ecuaciones 1 y 2 respectivamente. En la Figura 93 se muestran las ubicaciones de los puntos que se describen en el Cuadro 16.

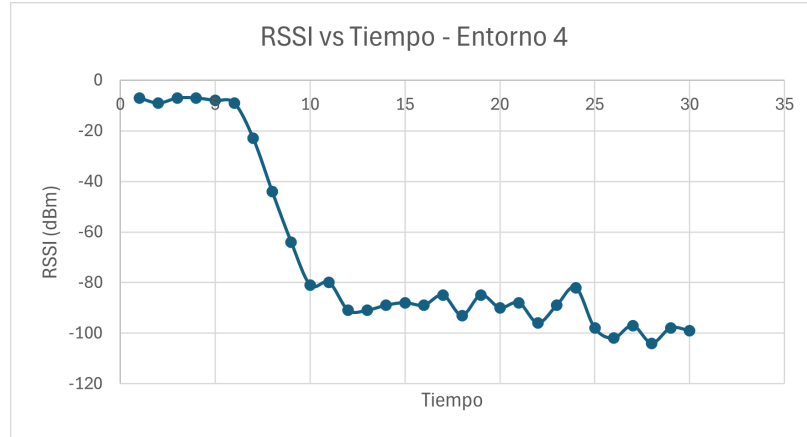


Figura 92: Comportamiento del RSSI a medida que avanzaba el tiempo y se modificaba la distancia

Punto	Distancia (m)	RSSI (dBm)	Pérdida (dBm)	n
A	106.94	-87.20	101.20	3.35
B	168.20	-94.82	108.82	3.40

Cuadro 16: Datos obtenidos durante las pruebas del entorno 4

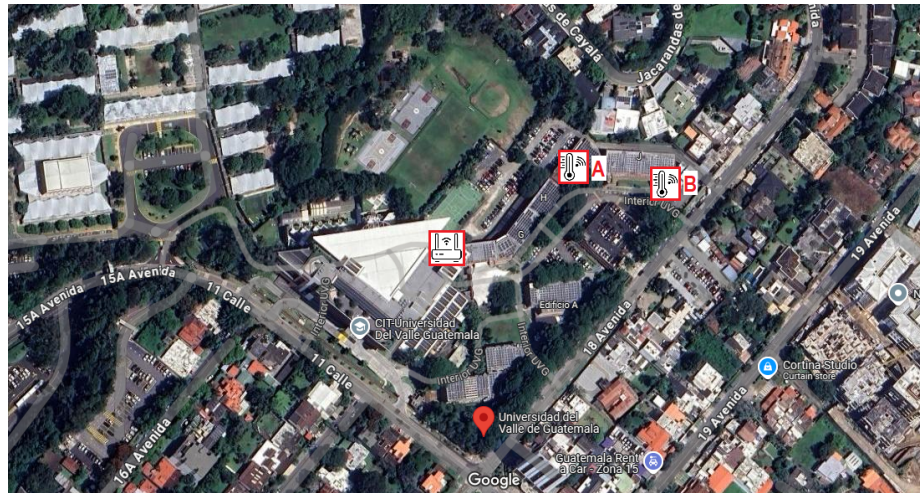


Figura 93: Mapa del entorno 4

10.4.2. Pruebas en campo abierto

Las pruebas en campo abierto se realizaron en los siguientes entornos:

- Entorno 5: Gateway en el estacionamiento del Parque Erick Barrondo y nodo en alrededores del interior del parque.
- Entorno 6: Gateway en el estacionamiento del Parque Ecológico Florencia, Santa Lucía Milpas Altas y nodo en alrededores del interior del parque

En la Figura 94 se muestra la gráfica del RSSI durante el tiempo que duraron las pruebas del entorno 5. El Cuadro 17 muestra el RSSI promedio para las distancias que se analizaron en este entorno, así como la pérdida de la señal y el exponente de pérdida calculados con las Ecuaciones 1 y 2 respectivamente. En la Figura 95 se muestran las ubicaciones de los puntos que se describen en el Cuadro 17.

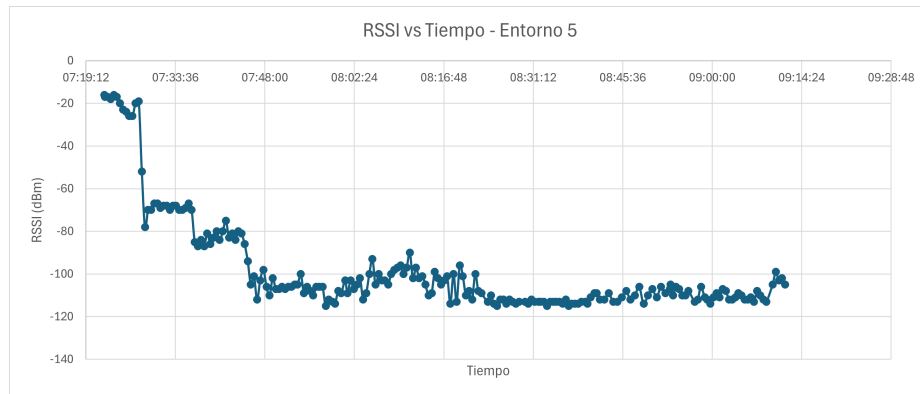


Figura 94: Comportamiento del RSSI a medida que avanzaba el tiempo y se modificaba la distancia

Punto	Distancia (m)	RSSI (dBm)	Pérdida (dBm)	n
A	162.27	-81.92	95.92	2.84
B	342.50	-106.25	120.25	3.43
C	573.95	-101.86	115.86	3.00
D	624.25	-110.64	124.64	3.27
E	767.98	-110.07	124.07	3.15
F	809.23	-113.19	127.19	3.23

Cuadro 17: Datos obtenidos durante las pruebas del entorno 5



Figura 95: Mapa del entorno 5

De la misma forma, en la Figura 96 se muestra la gráfica del RSSI durante el tiempo que duraron las pruebas del entorno 6. El Cuadro 18 muestra el RSSI promedio para las distancias que se analizaron en este entorno, así como la pérdida de la señal y el exponente de pérdida calculados con las Ecuaciones 1 y 2 respectivamente. En la Figura 97 se muestran las ubicaciones de los puntos que se describen en el Cuadro 18.

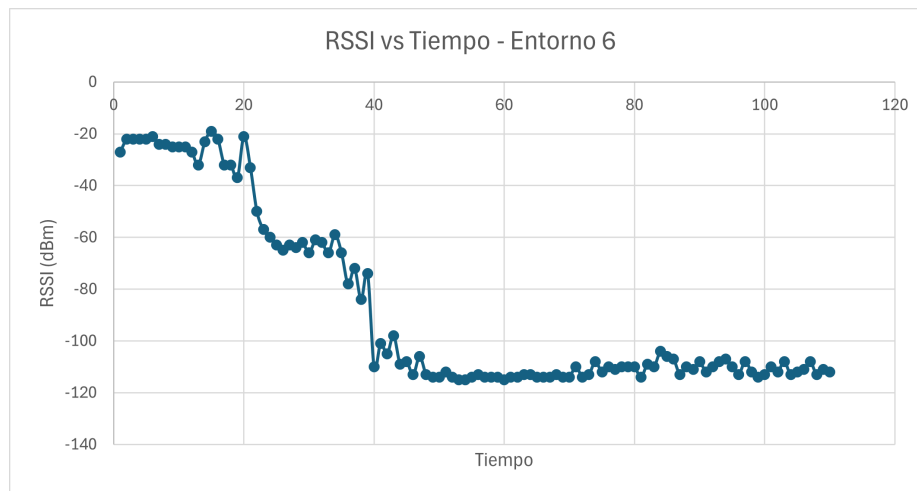


Figura 96: Comportamiento del RSSI a medida que avanzaba el tiempo y se modificaba la distancia

Punto	Distancia (m)	RSSI (dBm)	Pérdida (dBm)	n
A	349.71	-108.45	122.45	4.06
B	545.74	-113.11	127.11	3.94
C	693.96	-110.50	124.50	3.71
D	999.10	-112.00	126,00	3.56

Cuadro 18: Datos obtenidos durante las pruebas del entorno 6



Figura 97: Mapa del entorno 6

Con base en la información presentada en los Cuadros 13 al 18 se calculó un exponente de pérdida promedio para cada entorno y se utilizó el Modelo de Pérdida de Trayectoria (Ecuación 2) para calcular las distancias máximas a las que la interfaz del invernadero podría transmitir datos y que estos logren registrarse en el servidor y en la interfaz gráfica.

El Cuadro 19 muestra un resumen de los resultados obtenidos para cada entorno. Se observa que la distancia máxima es completamente dependiente de la interferencia que pueda existir en el entorno (ya sea por construcciones u otro tipo de señales).

Entorno	Descripción	Exponente de pérdida (n)	Distancia máxima (metros)
1	UVG y alrededores, gateway en nivel 7	3.53	993.75
2	Campus TEC zona 4 y alrededores	3.64	811.61
3	UVG-CAMPUS TEC	2.54	14618.10
4	UVG y alrededores, gateway en nivel 2	3.37	1366.22
5	Parque Erick Barrondo	3.10	2569.45
6	Finca Florencia	3.82	1375.80

Cuadro 19: Distancias máximas para cada entorno

La diferencia entre el entorno 2 (Alrededores de la zona 4 de la Ciudad de Guatemala) y el entorno 5 (Parque Erick Barrondo) es bastante notable debido a que un menor exponente de pérdida (el del ambiente 5) indica que la señal pierde menor cantidad de potencia debido a que existen menos obstáculos, esto se puede verificar al observar las Figuras 89 y 91, concluyendo que en el ambiente 2 existe mayor concentración de construcciones que atenuan la señal de transmisión.

Por otro lado, las pruebas en el ambiente 3 fueron una pieza clave para determinar que la altura, tanto del transmisor como el Gateway, influyen en el rango de transmisión de la señal. A pesar de ser un ambiente de ciudad, la altura a la que estaban ubicadas las antenas permitió tener un menor exponente de pérdida y por lo tanto mayor distancia de transmisión. El caso contrario ocurrió en el ambiente 6, si bien era un ambiente en campo abierto, tener el Gateway apenas 2 metros sobre el suelo no benefició la recepción de la señal.

- El invernadero cuenta con sistemas de regulación para la atmósfera interior: riego, ventilación y sombra.
- La interfaz cumple con el objetivo de monitorear las condiciones ambientales para generar alertas y controlar los sistemas de regulación
- La velocidad de giro del rodillo del sistema de sombra debe ser igual a la velocidad de avance lineal de la malla.
- La implementación de la interfaz gráfica facilita la visualización de los datos obtenidos y permite llevar un historial de estos.
- Los rangos de transmisión son completamente dependientes del entorno y altura de instalación del Gateway.

- Utilizar git para tener un mejor manejo y documentación del código, el control de versiones permitiría eliminar cambios que no funcionaron de la manera esperada sin comprometer lo que ya se ha trabajado.
- Experimentar el uso de FreeRTOS con aplicaciones sencillas para aprender acerca del manejo de tareas y comunicación entre estas, de esta forma se facilita la implementación.
- Realizar el diseño del invernadero tomando como base los materiales disponibles comercialmente.
- Utilizar una bomba de mayor caudal o una tubería de menor área de sección transversal para incrementar la presión del sistema de riego.
- Modificar el mecanismo del sistema de sombra para implementar un sistema de engranes que permitan igualar la velocidad del rodillo con la velocidad de avance lineal.
- Configurar por separado el módulo Wio-E5 (antes de conectarlo al sistema) para no cargar dicha configuración cada vez que exista un reinicio del microcontrolador.
- Definir de forma específica el entorno en el que se estará implementando LoRa y realizar pruebas de transmisión a diferentes distancias para poder definir un radio de transmisión que garantice el envío y recepción de datos en ese entorno específico.
- Utilizar un modelo de pérdida de trayectoria en el que se considere la altura de instalación de las antenas y no solo la distancia entre estas.
- Utilizar tiempos de envío superior a los 10 minutos para evitar la saturación del servidor gratuito y tener una pérdida de datos en la interfaz.

- [1] J. Á. O. Molina, “Sistema de transmisión inalámbrico de largo alcance,” Tesis de licenciatura, Universidad Del Valle de Guatemala, 2020.
- [2] J. A. L. Lasluisa, “Implementación de una red de sensores inalámbricos para la monitorización de variables físicas en cultivos hidropónicos mediante tecnología LoRa,” Tesis de licenciatura, Universidad de Las Fuerzas Armadas ESPE, 2022.
- [3] C. M. S. Bravo, “Diseño De Una Red Inalámbrica De Baja Potencia Para La Agricultura De Precisión En La Finca La Habana – Villa Rica, Cauca,” Tesis de licenciatura, Institución Universitaria Antonio José Camacho, 2023.
- [4] L. F. de Hoy, *Invernadero automático*, YouTube video, <https://www.youtube.com/watch?v=Vn7eGiRAr2M>, 2020.
- [5] A. B. Mendoza, “La importancia de la temperatura en la productividad de hortalizas en invernadero,” Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Informe técnico, 2011.
- [6] nPerf, *Mapa de cobertura 3G/4G/5G de en Guatemala-City, Guatemala*, <https://www.nperf.com/es/map/GT/3598132.Guatemala-City/-/signal?ll=14.640724&lg=-90.51327&zoom=12>, 2024.
- [7] M. de Agricultura Ganadería y Alimentación (MAGA), *MAGA entrega Centro de Producción de hortalizas en Petén*, <https://www.maga.gob.gt/maga-entrega-centro-de-produccion-de-hortalizas-en-peten>, 2022.
- [8] J. C. Jiménez, P. A. Reyes y C. A. Aguilera, *Manual de buenas prácticas y lecciones aprendidas para adaptación al cambio climático. Para la agricultura de secano de la Región de O’Higgins*. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, 2022, Cap. 9, <https://hdl.handle.net/20.500.14001/68837>.
- [9] M. I. Gonzáles, *Producción de hortalizas en invernadero*. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, 2004, <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/40389/NR31906.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [10] R. H. Villaseñor, *Guía: ¿Qué es un invernadero? Tipos y usos*, https://www.hydroenv.com.mx/catalogo/index.php?main_page=page&id=44, 2024.

- [11] J. D. Aucacatino, D. C. Zmallo, H. Q. Pérez, C. A. Rodríguez y A. S. Torcello, *Guía de construcción y manejo de invernaderos para la producción de hortalizas y frutas en zonas alto andinas*. Centro de Estudios Regionales Andinos Bartolomé de Las Casas, 2016, <https://www.cbc.org.pe/wp-content/uploads/2020/03/guiadeinvernaderos.pdf>.
- [12] A. Guardado, *Tipos de invernadero y sus características*, <https://www.lamastore.es/blog/tipos-de-invernaderos/>, 2022.
- [13] E. B. Téllez y V. R. Torres, *Unidad IV. Clasificación de las hortalizas*, Capítulo 4, <https://hope.chn.tecnm.mx/principal/syllabus/fpdb/recursos/r131276.PDF>, 2024.
- [14] I. I. para la Innovación Tecnológica en Agricultura, “Plantas C3, C4 y CAM,” *Serie Nutrición Vegetal*, n.º 125, pág. 5, mayo de 2018, <https://www.intagri.com/articulos/nutricion-vegetal/plantas-c3-c4-y-cam?p=registro>.
- [15] Semtech, *Academy for LoRaWAN: Curso en línea*, <https://learn.semtech.com/courses/view.php?id=2§ion=1>, 2024.
- [16] Mobilefish.com, *LoRa/LoRaWAN tutorial 10: RSSI and SNR*, YouTube video, <https://www.youtube.com/watch?v=RpTw1fGhI68>, 2018.
- [17] FreeRTOS, *Real-time operating system for microcontrollers and small microprocessors*, <https://freertos.org/>, 2024.
- [18] E. Systems, *ESP-IDF API Reference: Peripherals*, <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/v5.3.1/esp32/api-reference/peripherals/index.html>, 2024.
- [19] T. T. Network, *The Things Network: Community-Powered IoT Network*, <https://www.thethingsnetwork.org/>, 2024.
- [20] D. Electronics, *PCB Trace Width Conversion Calculator*, <https://www.digikey.com/en/resources/conversion-calculators/conversion-calculator-pcb-trace-width>, 2024.

