



FACULTAD DE ARQUITECTURA E INGENIERÍAS

Trabajo de fin de Carrera titulado:

“Evaluación de la adaptabilidad de módulos tipo terrario basados en IoT para la agricultura de precisión en el cultivo de Fragaria x ananassa en la localidad de Limoncocha”

Realizado por:

Jeems Mateo Tipan Curco

Director del proyecto:

MSc. María Gabriela Mancheno Falconi

Como requisito para la obtención del título de:

INGENIERO EN MECATRONICA

QUITO, 12 de febrero del 2026

DECLARACIÓN JURAMENTADA

Yo, Jeems Mateo Tipan Curco, ecuatoriano, con Cédula de ciudadanía N° 1725042277, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido presentado anteriormente para ningún grado o calificación profesional, y se basa en las referencias bibliográficas descritas en este documento.

A través de esta declaración, cedo los derechos de propiedad intelectual a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido en la Ley de Propiedad Intelectual, reglamento y normativa institucional vigente.



Jeems Mateo Tipan Curco

C.I.: 1725042277

DECLARACIÓN DEL DIRECTOR DE TESIS

Declaro haber dirigido este trabajo a través de reuniones periódicas con el estudiante, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación.

Director del proyecto

MSc. María Gabriela Mancheno Falconí

LOS PROFESORES INFORMANTES:

MSc. Diana Belen Peralta Zurita

MSc. Jaime Vinicio Molina Osejos

Después de revisar el trabajo presentado lo han calificado como apto para su defensa oral ante el tribunal examinador.

MSc. Diana Belen Peralta Zurita

MSc. Jaime Vinicio Molina Osejos

Quito, 19 de febrero de 2026

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Jeems Mateo Tipan Curco', enclosed within a large, loopy oval shape.

Jeems Mateo Tipan Curco

C.I.: 1725042277

Agradecimientos

Dedico esta tesis a mis padres Luis y María, y a mis hermanas, los que fueron capaces de hacer hasta lo imposible por cumplir este sueño, les doy gracias por enseñarme a ser valiente y tener el coraje suficiente para afrontar cualquier reto sin importar lo difícil o complicado que se vea, por eso y mucho mas esta tesis va dedicada a ellos, ya que se ve reflejado el fruto de su esfuerzo, sacrificio, amor y la fe puesta en mí. Con mucho amor puedo decirles gracias por darme la oportunidad de convertirme en Ingeniero.

Agradezco de corazón a mis primeros amigos, Juan Diego, Danilo, Diego, Melany y Emilio, más que compañeros fueron el apoyo e impulso dentro del aula, con los cuales aprendí demasiadas cosas no solo académicas, también personales. Doy las gracias a Felipe, Alan, Washington, Juan José y Sebastián por ayudarme a salir adelante en momentos en donde estaba completamente perdido, por ayudarme a encontrar el camino de vuelta y seguir adelante con el doble de fuerza, gracias a ustedes se que existe la amistad verdadera y la confianza a ciegas, porque nunca me hicieron sentir solo y mostraron ser más que amigos, son y siempre serán mis hermanos. Agradecido eternamente a mi hermana de otra madre, mi mejor amiga, mi consejera, Damaris, la cual nunca dejo de creer en mí y siempre me mostro su apoyo incondicional cuando no había nadie mas que lo hiciera, la que siempre está pendiente de mí y me ayuda en cada paso que doy en la vida, por cada risa, por cada lagrima, por cada anécdota que hemos vivido le doy las gracias, porque parte de ella también esta plasmada en esta tesis, demostrando que es una de las personas mas importantes en mi vida.

Por último, me doy las gracias a mí, por no haberme rendido, por no decaer ante los problemas, y demostrar que, aunque todo el mundo esté en contra se puede salir adelante.

Resumen

Este trabajo tiene como objetivo principal diseñar e implementar un sistema de monitoreo y control agrícola basado en el Internet de las Cosas (IoT) para el cultivo de *Fragaria* × *ananassa* en la comunidad de Limoncocha, Ecuador. La propuesta busca analizar la adaptabilidad de módulos tipo terrarios, utilizando sensores inteligentes y protocolos de comunicación inalámbricas de bajo consumo energético, como el ESP32. El desarrollo incluye la construcción de los módulos mediante manufactura aditiva e integrando sensores para medir y controlar variables agroclimáticas clave: temperatura, humedad del suelo, pH, luminosidad.

La metodología abarca la simulación de las arquitecturas en entornos virtuales Proteus y Ubidots, seguida de la validación experimental en el campo. Se analizó la precisión en la adquisición de datos, la estabilidad de la comunicación inalámbrica y el consumo energético, así como el diseño modular y la protección IP67 de los dispositivos fabricados mediante impresión 3D, lo que permitirá su funcionamiento y adaptación en condiciones ambientales de la localidad de Limoncocha. Además, la visualización remota y en tiempo real de los datos a través de la plataforma Ubidots facilitará la toma de decisiones informadas por parte de los agricultores. Como posibles resultados, se espera que este tipo de módulos se adapte a varios entornos y así llevar diversos tipos de cultivos hacia otros ambientes. Asimismo, se anticipa que la experiencia adquirida pueda servir de modelo para futuras aplicaciones de agricultura de precisión en otras comunidades rurales o entornos con dificultades en relación con infraestructura o comunicación inalámbrica.

Palabras clave: Internet de las Cosas, agricultura de precisión, monitoreo agrícola, *Fragaria* × *ananassa*, sensores, ESP32, Limoncocha.

Abstract

The main objective of this work is to design and implement an agricultural monitoring and control system based on the Internet of Things (IoT) for the cultivation of *Fragaria × ananassa* in the community of Limoncocha, Ecuador. The proposal seeks to analyze the adaptability of terrarium-type modules, using intelligent sensors and low-energy wireless communication protocols, such as ESP32. The development includes the construction of the modules through additive manufacturing and integrating sensors to measure and control key agro-climatic variables: temperature, soil moisture, pH, luminosity.

The methodology includes the simulation of the architectures in Proteus and Ubidot virtual environments, followed by experimental validation in the field. Data acquisition accuracy, wireless communication stability and energy consumption were analyzed, as well as the modular design and IP67 protection of the devices manufactured by 3D printing, which will allow their operation and adaptation in environmental conditions of the Limoncocha locality. In addition, the remote and real-time visualization of data through the Ubidots platform will facilitate informed decision-making by farmers. As a possible outcome, it is expected that this type of module can be adapted to various environments and thus bring different types of crops to new environments. It is also anticipated that the experience gained could serve as a model for future applications of precision agriculture in other rural communities or environments with difficulties related to infrastructure or wireless communication.

Key words: Internet of Things, precision agriculture, agricultural monitoring, *Fragaria × ananassa*, sensors, ESP32, Limoncocha.

Tabla de Contenidos

DECLARACIÓN JURAMENTADA	2
DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE	5
Resumen.....	7
Abstract.....	8
Introducción	16
Antecedentes	18
Planteamiento del Problema.....	20
Justificación	20
Objetivos.....	22
Objetivo General	22
Objetivos Específicos.....	22
Objetivos ODS que persigue el proyecto.....	23
Hipótesis	24
Estado del arte.....	24
Definición de IoT:	25
Elementos de IoT:	26
Arquitectura de una red IoT	27
Tecnologías de comunicación.....	29
Comunicación Inalámbrica	30
LoRa.....	35
LoRaWAN	36
Ubidots.....	37
Protocolo MQTT.....	39
Sistema de control.....	40
Sistema de control de lazo cerrado.....	42
PID	43
Impresión 3D.....	44
Aplicaciones de la impresión 3D	45
Grados de protección IP	47
Implementación del IoT en la agricultura	48
Sistemas IoT para monitoreo de cultivos.....	48
Protocolos de comunicación en áreas remotas.....	49
Frutilla (Fragaria x annanasa)	49
Cultivo de frutillas	51
Variables ambientales por controlar.....	52
Variables físicas.....	52
Metodología	54
Establecimiento de parámetros de Cultivo.....	56
Realización y simulación del diagrama de conexiones en Proteus V8	64
Programación en ESP32 para adquisición de datos	67
Configuración del módulo Heltec LoRa32.	68
Establecimiento de conexión con Ubidots y LoRa32	70

Diseño y fabricación mediante manufactura aditiva de los módulos.....	76
Parámetros de configuración para impresión 3D.....	77
Verificación de protección ante el agua y polvo.....	82
Programación del control PID.....	95
Implementación y montaje de los módulos.....	98
Consumo energético.....	99
Resultados.....	102
Discusión de Resultados	128
Conclusiones.....	130
Recomendaciones.....	133
Lista de referencias	134
Anexos	143

Lista de tablas

Tabla 1. Comparación de parámetros de las tecnologías IoT.	32
Tabla 2. Características técnicas de las tecnologías utilizadas en sistemas IoT.	33
Tabla 3. Parámetros de cultivos.	56
Tabla 4. Componentes electrónicos para adquisición y transmisión de datos.	57
Tabla 5. Componentes electrónicos para el sistema de enfriamiento y control de crecimiento. .	61
Tabla 6. Características y parámetros de los materiales de impresión.....	77
Tabla 7. Parámetros de impresión.....	79
Tabla 8. Primer muestreo de temperatura y humedad de la carcasa sumergida en agua.	85
Tabla 9. Segundo muestreo de temperatura y humedad de la carcasa sumergida en agua.	86
Tabla 10. Tercer muestreo de temperatura y humedad de la carcasa sumergida en agua.....	87
Tabla 11. Primer muestreo en el exterior.	90
Tabla 12. Segundo muestreo en el exterior.....	91
Tabla 13. Tercer muestreo en el exterior.	92
Tabla 14. Parametrización del SetPoint para las variables ambientales necesarias.	96
Tabla 15. Valores técnicos de los dispositivos electrónicos.	100
Tabla 16. Características iniciales de las plantas de frutilla.....	104
Tabla 17. Caracterización del crecimiento de las plantas con el módulo implementado.	106
Tabla 18. Caracterización del crecimiento de las plantas con el módulo implementado.	108
Tabla 19. Recopilación de datos de CO ₂	109
Tabla 20. Recopilación de valores de CO ₂ en tiempo de 3 minutos.	110
Tabla 21. Recopilación de valores de humedad del suelo en tiempo de 3 minutos.....	111
Tabla 22. Recopilación de valores de temperatura ambiente en tiempo de 3 minutos.	113
Tabla 23. Recopilación de valores de luminosidad en tiempo de 3 minutos.	114
Tabla 24. Recopilación de valores de la humedad del entorno en tiempo de 3 minutos.	116
Tabla 25. Tabla de medidas de dispersión de datos de temperatura implementado el PID.	118
Tabla 26. Medidas de tendencia central.....	119

Lista de figuras

Figura 1. Arquitectura del sistema IoT para la agricultura de precisión.....	18
Figura 2. Elementos de un sistema IoT.....	27
Figura 3. Arquitectura de niveles de una red IoT.	28
Figura 4. Arquitectura del sistema IoT agrícola de 5 capas.....	29
Figura 5. Tecnologías de comunicación para la agricultura mediante IoT.....	31
Figura 6. Aplicación de la tecnología LoRa en la agricultura.	36
Figura 7. Arquitectura de red Lora WAN.....	37
Figura 8. Plataforma Ubidots.....	38
Figura 9. Ejemplo de protocolo MQTT.....	40
Figura 10. Esquema de los elementos de un sistema de control.....	41
Figura 11. Ejemplo de un sistema de control de lazo abierto.	42
Figura 12. Esquema de un sistema de control de lazo cerrado.	42
Figura 13. Diagrama de un control PID.....	43
Figura 14. Proceso de impresión 3D.....	45
Figura 15. Prototipos de pétalos para crecimiento de plantas en el hogar mediante impresión 3D.	46
Figura 16. Grados de protección IP	47
Figura 17. Etapas de crecimiento de la frutilla.	51
Figura 18. Diagrama de procesos.....	55
Figura 19. Esquemático del sistema de control para adquisición de datos.....	66
Figura 20. Diseño del sistema de control de temperatura.....	67
Figura 21. Modulo Heltec LoRa32 V3.	68
Figura 22. Esquema de comunicación.	69
Figura 23. Creación de dispositivo en Ubidots.....	70
Figura 24. Configuración de dispositivo.....	71
Figura 25. Creación de variables crudas en Ubidots.....	72
Figura 26. Creación de Widgets.....	73
Figura 27. Asignación de variables.....	73
Figura 28. Verificación de conexión y punto de acceso privado.....	74
Figura 29. Visualización de datos en Ubidots.	75
Figura 30. Visualización de datos en los Widgets.....	75
Figura 31. Modelado 3D del módulo terrario.....	76
Figura 32. Previsualización para la impresión 3D.....	80
Figura 33. Previsualización de impresión 3D de macetas.	81
Figura 34. Previsualización de impresión 3D de soportes externos.	82
Figura 35. Diseño de la carcasa de prueba para comprobación de filtración de agua.	83
Figura 36. Proceso de sellado con silicona fría en la sección de cableado.....	84
Figura 37. Proceso de adquisición de temperatura y humedad con la carcasa sumergida.....	85
Figura 38. Grafica de temperatura de los 3 muestreos realizados de la carcasa sumergida	89
Figura 39. Grafica de humedad de los 3 muestreos realizados de la carcasa sumergida en	90
Figura 40. Variación de temperatura en el exterior.	94
Figura 41. Variación de humedad en el exterior.....	95

Figura 42. Sellado del módulo tipo terrario.....	99
Figura 43. Estado inicial de las plantas tomada el 16/06/2025.....	103
Figura 44. Registro de las plantas tomada el 02-07-2025 implementadas dentro del	105
Figura 45. Registro tomado el 02-07-2025 del estado de las plantas implementadas dentro del módulo.	106
Figura 46. Registro tomado el 09-08-2025 del estado de las plantas implementadas dentro del módulo.	107
Figura 47. Grafica de dispersión de datos de temperatura.....	120
Figura 48. Grafica Humedad vs Tiempo.....	121
Figura 49. Grafica temperatura vs tiempo.	122
Figura 50. Grafica humedad del suelo vs tiempo.	123
Figura 51. Grafica luminosidad vs tiempo.....	124
Figura 52.. Grafica CO2 vs tiempo.....	125
Figura 53. Temperatura inicial.....	126
Figura 54. Estabilización del PID de temperatura.	127
Figura 55. Registro control PID.....	128

Lista de ecuaciones

Ecuación 1. Calculo para determinar la señal de control PID.....	43
Ecuación 2. Consumo energético.....	100
Ecuación 3. Costo por kWh.	101
Ecuación 4. Ecuación para determinar si la muestra es correcta.	117
Ecuación 5. Error absoluto medio.....	127

Lista de anexos

Anexo 1. Programación del sistema de control del ESP32 en Arduino IDE.....	143
Anexo 2. Programación de comunicación inalámbrica utilizando el módulo LoRa32.	147
Anexo 3. Verificación de creación del punto de acceso privado.....	149
Anexo 4. Construcción de la caja de refrigeración.....	149
Anexo 5. Soldadura del módulo de enfriamiento.	150
Anexo 6. Proceso de construcción de los módulos con acrílico.....	151
Anexo 7. Proceso de construcción del módulo con acrílico.	151
Anexo 8. Pruebas del circuito de control.....	152
Anexo 9. Proceso de impresión 3D.	153
Anexo 10. Pruebas de montaje de piezas impresas en 3D.....	153
Anexo 11. Montaje sistema de control y plantas prototipo 1.	154
Anexo 12. Piezas resultantes para la prueba de verificación de ingreso de líquidos.....	154
Anexo 13. Ensamble final de la carcasa de prueba.....	155

Introducción

En estos últimos años, la agricultura de precisión ha surgido como una solución innovadora ante los retos actuales del sector agrícola, como el aumento de la demanda de alimentos, la escasez de recursos y la necesidad de minimizar el impacto ambiental (Gutiérrez-Flores et al., 2022; Sánchez et al., 2023). Esta área combina tecnologías avanzadas, como sensores inteligentes, sistemas de información geográfica, plataformas IoT y análisis de datos en tiempo real, para optimizar la gestión de insumos y aumentar la productividad de los cultivos (Abu et al., 2022; Quiroz-Valdez et al., 2024). En Ecuador, la implementación de la agricultura de precisión ha traído avances notables en sectores como la floricultura y la producción de banano, permitiendo el monitoreo remoto de variables agroclimáticas, la automatización del riego y un manejo más eficiente de los recursos hídricos y fertilizantes (Sánchez et al., 2023; Dialnet, 2022).

En el contexto ecuatoriano, la adopción de estas tecnologías en comunidades rurales y amazónicas enfrenta varias limitaciones técnicas y de infraestructura, lo que limita su acceso a los beneficios de la digitalización agrícola (Orozco Monje et al., 2023). Esta situación pone de manifiesto una brecha en el conocimiento y la necesidad urgente de adaptar soluciones tecnológicas que sean accesibles y sostenibles a los contextos rurales específicos.

Frente a este desafío, este trabajo presenta una propuesta para diseñar, construir e implementar un sistema de monitoreo y control agrícola que se basa en IoT. Utilizando módulos tipo terrario, se busca optimizar cultivos en un ambiente controlado. Esta solución tiene la capacidad de crear microclimas artificiales que imitan las condiciones

ideales para el crecimiento de las plantas, mediante el estudio de cultivo se seleccionará un fruto dado en la Sierra Ecuatoriana en este caso la Frutilla (*Fragaria x ananassa*), como propuesta de implementación dentro de la localidad, esto para demostrar a un futuro que el módulo puede albergar todo tipo de cultivos, en cualquier entorno, localidad y tiempo, solo configurando y controlando correctamente los parámetros necesarios para el crecimiento de cada tipo de planta.

La propuesta se lleva a cabo con un enfoque experimental y práctico, donde se valida el rendimiento del sistema al medir variables ambientales como la temperatura, la humedad, la luminosidad, el pH y el CO₂. Esto tiene como objetivo evaluar cómo se adapta el módulo tipo terrario en la Reserva Biológica de Limoncocha. Además, se utiliza la plataforma Ubidots para visualizar de manera remota y en tiempo real los datos recolectados, lo que permite a los agricultores tomar decisiones más informadas.

El desarrollo de este sistema basado en IoT no solo busca mejorar la eficiencia y productividad del cultivo de fresas, sino que también pretende servir como modelo para su implementación en otros tipos de cultivos en la región. Además, se planifico validar experimentalmente el sistema mediante pruebas en campo que permitan evaluar su desempeño en condiciones reales. La adaptabilidad y escalabilidad del sistema son factores clave para su aplicación en diferentes configuraciones agrícolas, asegurando su viabilidad técnica y económica (Atalla et al., 2023).

En este contexto, el objetivo de este trabajo es evaluar cómo se adaptan los módulos tipo terrario basados en IoT para cultivar *Fragaria × ananassa*. Esto se logra integrando sensores de monitoreo y un control PID, con el propósito de optimizar las

condiciones ambientales internas y validar su viabilidad técnica en condiciones reales de la Amazonía.

Antecedentes

Actualmente, la agricultura de precisión ha dado pasos importantes gracias a la incorporación de tecnologías del Internet de las Cosas (IoT). A nivel internacional, investigaciones como la de More, Patil y Gadekar (2025) en India han mostrado que los robots agrícolas, que utilizan redes de sensores y algoritmos de aprendizaje automático, pueden disminuir el consumo de agua en cultivos de arroz hasta en un 30%. Sin embargo, su necesidad de infraestructura urbana (como Wifi/5G) y los altos costos (USD 1,200 por hectárea) limitan su uso en regiones como la Amazonía ecuatoriana. Sin embargo, no se evaluó la resistencia de los dispositivos a niveles de humedad superiores al 90%, un aspecto crucial en áreas lluviosas como Limoncocha.

Figura 1.

Arquitectura del sistema IoT para la agricultura de precisión.



Nota. Adaptado de Sistema orientado al servicio IOT para el control de la agricultura [Fotografía], por Universidad Internacional de Riego, 2018, (<https://www.universidadderiego.com/sistema-orientado-al-servicio-iot-control-la-agricultura/>). CC BY 2.0

En el ámbito Latinoamericano, Orozco Monje, Arce Santacruz y Cerón Ríos (2023) en Colombia crearon una red IoT con comunicación satelital para comunidades indígenas, enfocándose en protocolos de bajo consumo como LoRa. A pesar de lograr un 89% de eficiencia en la transmisión de datos, no incluyeron actuadores para el control autónomo, lo que limita su utilidad práctica. Otro ejemplo claro es en México, Quiroz-Valdez, Almaraz-Damian y Ramos-Díaz (2024) desarrollaron un sistema IoT con microcontroladores ESP32 y el protocolo LoRaWAN para monitorear cultivos de maíz, logrando un ahorro del 25% en fertilizantes, pero esto solo se centró en el área de monitoreo remoto mas no en un proceso automatizado que permita un control más preciso.

En Ecuador, Gallegos Zurita, Rodriguez Castillo y Ortiz Mosquera (2023) llevaron a cabo la implementación de un sistema de riego automatizado en Manabí, utilizando el ESP8266 y la plataforma Ubidots, lo que resultó en un aumento del 15% en el rendimiento del maíz. Sin embargo, informaron que las baterías presentaron fallos después de seis meses de uso, debido a la alta humedad del ambiente, por lo que se demuestra que existen falencias en sistemas de protección y eficiencia energética para los sistemas de control. Por lo que estas investigaciones son la base para la implementación y desarrollo de nuevos sistemas inteligentes que se puedan aplicar en la agricultura, combinando dispositivos de bajo costos, materiales de alta resistencia y la adaptabilidad de estos dispositivos a los entornos en donde se lleve a cabo el proyecto.

Planteamiento del Problema

La falta de implementación de sistemas de monitoreo y control mediante IoT en el ámbito agrícola limita la capacidad de los agricultores para supervisar y ajustar en tiempo real variables ambientales críticas como la temperatura, humedad, luminosidad, pH del suelo o el sustrato. Ante esta necesidad, la agricultura de precisión y la implementación de módulos de ambiente controlado tipo terrario, equipados con sistemas IoT, se presenta como una alternativa innovadora para crear microclimas ideales y gestionar con precisión las condiciones necesarias para el crecimiento de cultivos de frutilla (*Fragaria x ananassa*) la cual no es originaria de la Amazonia, ya que requiere condiciones agroclimáticas diferentes a las de la localidad de Limoncocha. Sin embargo, la viabilidad y adaptabilidad de estos sistemas en la Amazonía ecuatoriana aún no se ha explorado lo suficiente, lo que resalta la necesidad de investigar su potencial para facilitar la introducción y sostenibilidad de cultivos no tradicionales en la región.

Justificación

Esta investigación tiene como finalidad la implementación y adaptación de sistemas tecnológicos sostenibles y accesibles en zonas donde las condiciones del entorno y la limitada infraestructura tecnológica dificulta la adopción de estos sistemas de control. En la comunidad de Limoncocha, que se encuentra en la provincia de Sucumbíos, Ecuador, la producción agrícola de *Fragaria x ananassa*, más conocida como fresa, no son originarios de esta región, por lo que el cultivo en estas localidades es casi nulo. Esta situación y la poca influencia con las nuevas tecnologías relacionadas con la automatización e IoT, complican la optimización del rendimiento de nuevos cultivos,

especialmente frente a la variabilidad climática y las características propias de la Amazonía. A pesar de los avances en tecnologías de agricultura de precisión y el desarrollo de sistemas de monitoreo basados en IoT en otras áreas, la adopción de estas soluciones en Limoncocha es bastante limitada. Esto se debe a la falta de infraestructura tecnológica, a la conectividad restringida y a la escasez de dispositivos accesibles y fáciles de implementar. Todo esto se traduce en una menor competitividad agrícola, mayores costos de producción y una gestión ineficiente de los recursos naturales, lo que afecta negativamente tanto a la economía local como a la sostenibilidad del sistema productivo.

La creación de ambientes cerrados tipo terrario con IoT se presenta como una solución innovadora para superar diversas barreras. Estos sistemas permiten proteger los cultivos de condiciones climáticas adversas, automatizar el control de variables clave como la temperatura, la humedad y el CO₂, además de controladores PID para que mantener en rangos óptimos estas condiciones dentro del módulo. Gracias a los avances con la manufactura aditiva nos permitió la implementación y fabricación de módulos de protección y estructuras de bajo costo y que puedan ser replicados fácilmente.

Investigaciones como la de IoT-Driven Solutions for Improved Plant Care in Terrariums (Septiawan, D., 2024) han demostrado que los terrarios inteligentes pueden aumentar la eficiencia fotosintética en un 25% y ahorrar un 35% de agua en comparación con los métodos tradicionales, todo gracias a la integración de sensores y actuadores controlados por algoritmos PID.

Objetivos

Objetivo General

Evaluar la adaptabilidad del módulo tipo terrario con un sistema de monitoreo y control en un ambiente cerrado basado en IoT en cultivos de *Fragaria* x *ananassa* mediante sensores y equipos de monitoreo en tiempo real, para la implementación en la Reserva Biológica de Limoncocha.

Objetivos Específicos

- Investigar tecnologías de monitoreo agrícola implementadas en la actualidad, mediante revisión bibliográfica para conocer la distribución de sensores y actuadores, protocolos de comunicación y plataformas embebidas de bajo consumo energético.
- Diseñar en el software Proteus la arquitectura del sistema de monitoreo agrícola, utilizando el microcontrolador ESP32 en conjunto con protocolos de transmisión de datos MQTT.
- Diseñar la base de datos e interfaz gráfica en la plataforma virtual Ubidots, permitiendo conocer las variables ambientales de forma remota y en tiempo real para la toma de decisiones.
- Fabricar 2 módulos tipo terrarios físicos y las carcasas de los sistemas de control en software CAD Inventor e impresión 3D para los cultivos de *Fragaria* x *ananassa* en sustrato en ambiente controlado, cumpliendo con los estándares de la protección IP67 para la seguridad el sistema de control.

- Implementar el control PID que permita controlar los parámetros ambientales mediante la adquisición de los datos en tiempo real de los sensores para el control ambiental en interiores cerrados.
- Comprobar el rendimiento del sistema de control y el módulo en conjunto, analizando su precisión en la adquisición de datos en tiempo real, consumo energético, escalabilidad y estabilidad de comunicación, para su implementación en el área rural de Limoncocha.
- Evaluar la capacidad de adaptación del módulo y sistema de control en distintos entornos geográficos, estableciendo un sistema agrícola modular estable frente a variaciones ambientales externas.

Objetivos ODS que persigue el proyecto

Objetivo 7 – Energía asequible y no contaminante:

Fomentar el uso eficiente de los recursos naturales como fuente de energía, como la implementación de paneles solares para la optimización de consumo energético de los sistemas eléctricos y sistemas de distribución de agua dentro de los módulos de cultivo.

Objetivo 8 – Trabajo decente y crecimiento económico:

Promover nuevas oportunidades de trabajo en nuevas áreas de instalación, mantenimiento y gestión de sistemas digitales, impulsando el crecimiento económico y educativo en el ámbito de automatización y producción agrícola.

Objetivo 12 – Producción y consumo responsables:

Mejorar la gestión de los insumos agrícolas como fertilizantes y pesticidas, minimizando y reduciendo su impacto ambiental, promoviendo técnicas prácticas sostenibles y rentables para la comunidad.

Hipótesis

Mediante la implementación de sistemas de monitoreo y control agrícola, utilizando tecnologías de comunicación inalámbricas LoRaWAN, sensores ambientales y dispositivos de bajo consumo energético en módulos tipo terrarios permitirá mantener condiciones ambientales controladas y estables, estas son: temperatura, humedad y luminosidad adecuadas para la evaluación del crecimiento de *Fragaria x anannasa* en ambientes cerrados.

Las variables independientes consideradas en esta investigación incluyen, diseño y fabricación de las carcasas en impresión 3D, red de sensores, microcontrolador ESP32, modulo LoRa y el sistema de alimentación energética, empleando un protocolo de comunicación LoraWAN. Por su parte, las variables dependientes se encuentran las condiciones ambientales dentro del módulo. Este se va a adaptar con una eficiencia promedio del 85% para el correcto crecimiento del fruto con relación a sus etapas de crecimiento.

Estado del arte

Los sistemas de monitoreo y control basados en Internet de las Cosas (IoT) se han incorporado en la agricultura moderna como una tecnología innovadora que está redefiniendo la forma de optimizar los cultivos. Estas soluciones, que integran sensores, plataformas embebidas y conectividad inalámbrica, amplía sus aplicaciones que van

desde el monitoreo ambiental en espacios cerrados en tiempo real hasta la automatización de procesos. La incorporación de ambientes cerrados tipo terrario y sistemas de control con IoT ha demostrado ser sistemas robustos para adaptar cultivos sensibles en diversos entornos.

La innovación en este campo no solo facilita un manejo más preciso del ambiente, sino que también promueve la sostenibilidad y la eficiencia en el uso de recursos, permitiendo tomar decisiones adecuadas para el manejo de los cultivos. Así, el desarrollo y la aplicación de tecnologías IoT en ambientes controlados representan una oportunidad única para superar las limitaciones impuestas por la falta de infraestructura y la variabilidad climática.

Definición de IoT:

El Internet de las Cosas (IoT), inicio a mediados de los años 90, como una manera de conectar el mundo físico con el virtual, estos se integran y permite a los usuarios compartir información con millones de máquinas inteligentes (Sanchez *et al.*, 2024). La red está conformada por dispositivos compuestos por hardware y software que son capaces de registrar señales de su entorno, los cuales pueden ser recolectados, analizados y utilizados para controlar elementos de forma remota y tomar decisiones en tiempo real (Marquez *et al.*, 2024). Este es capaz de generar información de sentido computacional con la mínima o sin intervención humana, siendo los sensores instrumentos los encargados de realizar tal acción, los cuales conforman un sistema nervioso central de ciudades o villas inteligentes, con redes interconectadas y el manejo de grandes cantidades de datos (Perez *et al.*, 2020).

En los últimos años se ha masificado el uso de IoT, desde la implementación en dispositivos de uso domésticos hasta dispositivos industriales, lo que permite que miles de personas avanza hacia la conectividad global (Lozano, E.; Oñate, R, 2024).

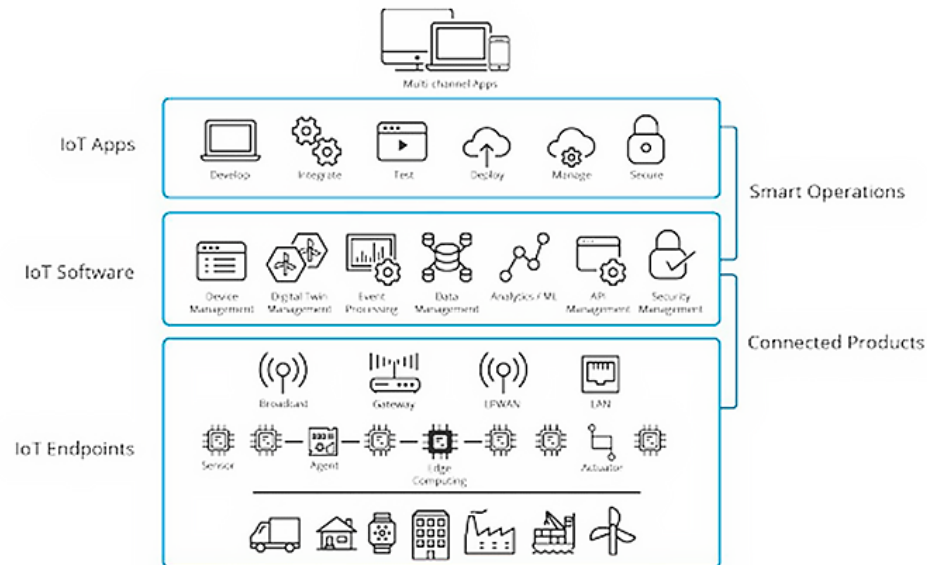
Elementos de IoT:

En el campo de la interacción con el IoT, existen 4 elementos necesarios para su funcionamiento:

- **Hardware:** Integran dispositivos que controlan el sistema como son los sensores y actuadores de todo tipo. (Lema, 2023)
- **Middleware:** Permite el intercambio de información entre las aplicaciones y herramientas de almacenamiento para el análisis en la nube y análisis de miles de datos. (Lema, 2023)
- **Computación y almacenamiento:** El apartado de la computación de los datos se puede realizar de manera local o un servidor en la nube, de igual forma el almacenamiento lo puede realizar de la misma forma. (Tonato, C.; Sinche, S., 2022)
- **Servicios:** Abarca todas las aplicaciones para las cuales fueron creados los sistemas IoT. Entre los más destacables Smart Cities, automatización de procesos industriales, monitoreo y control de forma remota. (Tonato, C.; Sinche, S., 2022)

Figura 2.

Elementos de un sistema IoT.



Nota. Niveles del sistema IoT. [Fotografía], Enterprise CIO, 2017,

(<https://www.enterprise-cio.com/news/2017/may/15/anatomy-iot-solution-three-layers-success/>)CC BY 2.0.

Arquitectura de una red IoT

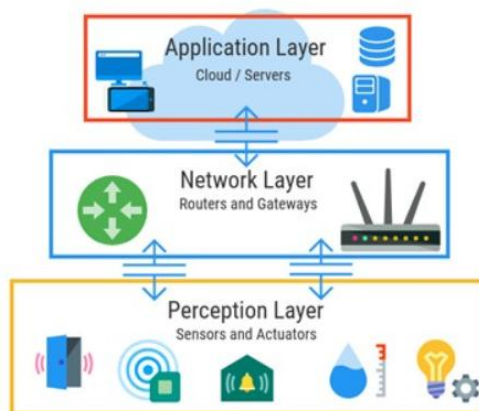
Según Medina (2022), la arquitectura de los elementos IoT es simple, el cual se define en 3 bloques principales:

- **Capa de percepción:** Es la red de sensores, los cuales cumplen con la identificación y adquisición de información de parámetros físicos, así como la interacción con el mismo (Medina, 2022). Este gestiona cada uno de los sensores usados en la agricultura, por lo que se sugiere utilizar sensores multifuncionales con el objetivo de monitorear más parámetros con menos dispositivos. (Tang *et al.*, 2022).

- **Capa de red:** Esta en la mitad de la red IoT, es el encargado de procesar los datos obtenidos en la capa de percepción. También es el encargado de la integración de redes inteligentes, gestión de dispositivos de red y servidores.
- **Capa de aplicación:** Es la capa en donde se muestran los datos y servicios al usuario a través de diversos medios como, aplicaciones web o aplicativos móviles.

Figura 3.

Arquitectura de niveles de una red IoT.

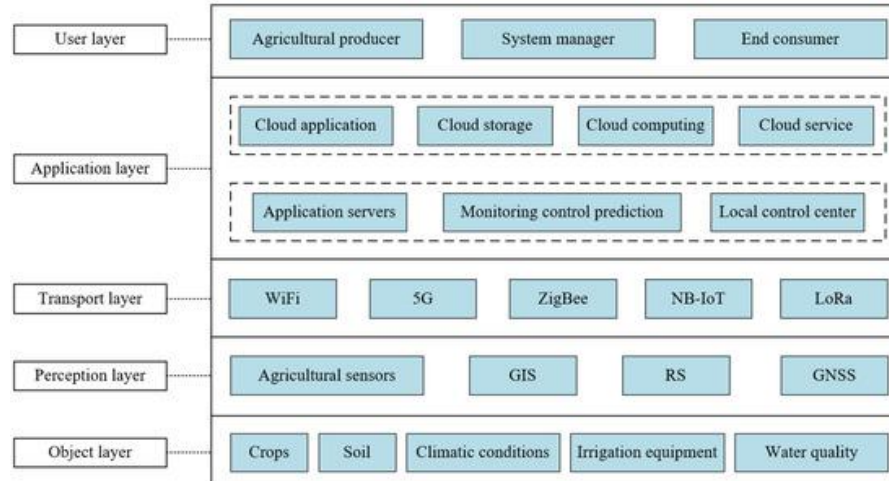


Fuente: (Medina, 2022)

Para Tang *et al.* (2024) este tipo de arquitectura no puede caracterizar con precisión las características y diferencias de la tecnología IoT, de la misma forma este no puede reflejar las características y diferencias de usuarios específicos. Por lo tanto, para superar estas deficiencias se optó por la arquitectura de 5 capas para el ámbito agrícola.

Figura 4.

Arquitectura del sistema IoT agrícola de 5 capas.



Fuente: (Tang *et al.*, 2024)

En donde se puede observar se añaden 2 capas más, siendo estas:

- **Capa de transporte:** En esta capa se realiza el envío de datos desde la capa de procesamiento hacia la capa de percepción, se lo realiza a través de redes inalámbricas como Wifi, LoRA, ZigBee. (Lema, 2023)
- **Capa de objeto:** En este nivel se encuentran los dispositivos físicos, como los sensores, actuadores, los cuales necesitan de energía de una batería para su buen funcionamiento, por lo que es necesario mejorar el uso energético. Así mismo se requiere de mayor protección para evitar la fuga de datos y optimizar su procesamiento en tiempo real para mayor adaptabilidad. (Tang et al., 2024)

Tecnologías de comunicación

El término de tecnología de comunicación hace referencia a la capacidad de transmitir información entre puntos lejanos. En el ámbito del sistema global se propone 4

escenarios con referencia a las tecnologías y protocolos de comunicación para la adaptación en la agricultura:

1. Los nodos de sensorización deben comunicarse directamente con plataformas en la nube mediante redes convencionales como puede ser el WiFi.
2. El sistema de conexión entre dispositivos necesitara una tecnología de comunicación diferente al resto que cumpla con los requisitos del problema, ya que la zona en la que se implemente puede ser amplia y remota, además existe la dificultad de alimentación eléctrica.
3. Se necesita conexión a internet segura para realizar la conexión con la nube. Cada nodo de sensorización deben ser capaces de redirigir el tráfico de datos hacia un elemento con salida a internet.
4. El sistema de comunicación que ejecutan en la nube se debe resolver de forma transparente para el usuario haciendo uso de la APIs de programación dadas por la plataforma seleccionada. (Díaz, 2022)

Comunicación Inalámbrica

Para el uso del IoT, se utilizan diversas tecnologías de comunicación entre las que se incluyen, LoRa, LoRaWAN, WiFi, Bluetooth, etc. (Lema, 2023). Por ello en el ámbito de la agricultura se opta por utilizar este tipo de tecnologías por sus ventajas, por mencionar algunas:

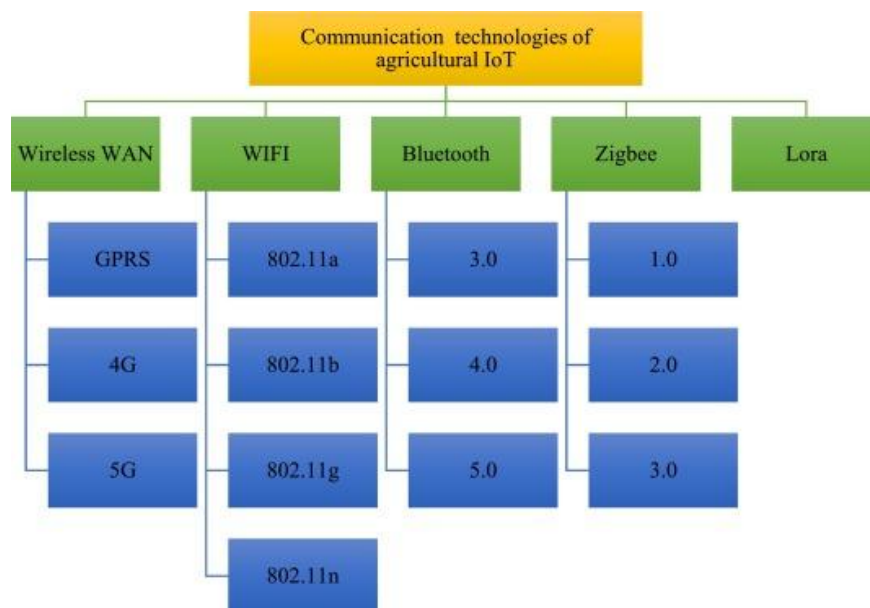
- Capacidad de posicionar los dispositivos en cualquier punto dentro del área de cobertura
- Evitar el uso de cableado entre el sistema de control y la red de sensores.

- Conexión de más dispositivos de forma rápida y sencilla.

Para la transmisión de información no se utiliza cualquier tecnología de comunicación, sino que se selecciona dependiendo las características del proyecto (Xu *et al.*, 2022), las tecnologías que se utilizan con mayor frecuencia se muestran en la Figura 5.

Figura 5.

Tecnologías de comunicación para la agricultura mediante IoT.



Fuente: (Xu *et al.* 2022)

Las diferencias que se pueden encontrar en estas tecnologías es su alcance o distancia de comunicación, lo que las divide en dos grupos: corto y largo alcance, variando entre centímetros, metros o hasta kilómetros. También se toma en consideración la velocidad de transmisión de datos y el consumo energético, siendo puntos claves en la

agricultura (Díaz, 2022). En la Tabla 1 se puede observar la comparativa entre cada una de las tecnologías.

Tabla 1.

Comparación de parámetros de las tecnologías IoT.

Tecnología	WAN inalámbrica (GPRS, 4G, 5G)	WiFi	Bluetooth	ZigBee	LoRa
Solicitud	Voz, datos	Medios de comunicación	Medios de comunicación , cable alternativo.	Monitoreo, sensores	Transmisión transparente de datos
Consumo de energía	Alto	Alto	Medio	Medio	Bajo
Distancia de transmisión	Larga Distancia	A menos de 100 m	A menos de 10m	10 – 100m	Hasta 2 – 5 km en ciudades y 15 km en suburbios

Ventaja	Gran cobertura, buena calidad de servicio	Alta Flexibilidad	Precio bajo y configuración sencilla	Bajo consumo de energía, topología de red flexible	Fuerte inmunidad y funcionamiento estable.
----------------	---	-------------------	--------------------------------------	--	--

Fuente: (Xu *et al.*, 2022)

En el ámbito de la agricultura también se han implementado sistemas IoT con diversas tecnologías de comunicación en la gestión de riego, Tang (2024) presenta una comparativa técnica entre cada una de estas, en la Tabla 2 se puede analizar las diferencias entre cada una de ellas:

Tabla 2.

Características técnicas de las tecnologías utilizadas en sistemas IoT.

Tecnologías	WiFi	5G	ZigBee	NB - IoT	LoRa
Frecuencia de operación	Sub – GHz 2.4 GHz	30-300 GHz	2.4 GHz 868 MHz	Bandas celulares con licencia LTE 150 MHz – 3.5 GHz	0.5 – 50 GHz
Velocidad de transferencia (kb)	1.1×10^4 – 5.5×10^4	$< 1 \times 10^7$	10-300	<100	0.3-50

Distancia de comunicación (diámetro/kilometro)	0.02 – 0.3	0.1 – 0.3	0.02 – 0.35	1- 10	2 - 20
Seguridad	Bajo	Alto	Medio	Bajo	Alto
Consumo de energia (mA)	>200 mA	172 – 343 mA	140 mA	47 mA	28 mA
Costo (USD)	15 – 25	30-60	8-15	10-20	8-10
Ancho de banda del canal	1/2/4/8/16/22 MHz	40/80 kHz	2 MHz	180/200 kHz	25/250/500 kHz
Estado latente	50 ms	1ms	20ms-30ms	1-30 s	3-10 s
Topología	Estrella, punto a punto	Estrella	Mixta, punto a punto, malla, estrella, arbol	Estrella	Estrella

Fuente: (Tang *et al.*, 2024)

Analizando las características y parámetros de la Tabla 1 y 2 se puede observar que gran parte de las tecnologías requieren de mayor consumo de energía como WiFi o 5G, también su rango de comunicación es muy limitado para la aplicación que se requiere

realizar, por lo que la tecnología de comunicación LoRa es la más indicada para su implementación en el sistema de monitoreo agrícola mediante IoT.

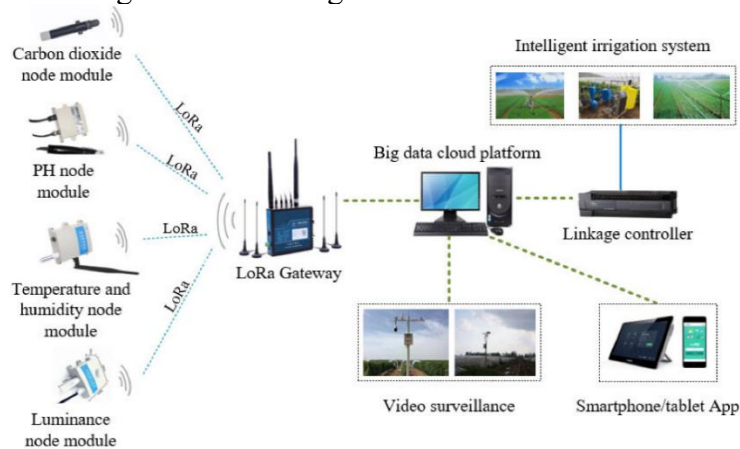
LoRa

La tecnología LoRa es aquella que envía datos mediante modulación de radiofrecuencia, tiene la capacidad de transmitir datos a largas distancias en áreas urbanas y rurales sin mayor número de interferencias, además su bajo consumo de energía permite su uso en proyectos de IoT (Astudillo, 2024). En su capa física de la transmisión inalámbrica utiliza CSS, el cual le permite superar los obstáculos, sumado a esto su esquema códec y la tecnología de modulación de espectro ensanchado lo hace mas resistente a las interferencias y mayor estabilidad frente a fenómenos desvanecimientos profundos (Tang *et al.*, 2024). Las capas superiores se basan en un estándar de código abierto, “LoRaWAN”, que son ideales para implementaciones de alta densidad con restricciones flexibles de latencia y confiabilidad (Jabbar et al. 2024).

Para la codificación de información utiliza tonos de frecuencia con variación lineal a lo largo del tiempo. Adicional es inmune al efecto Doppler, permitiendo un desplazamiento de frecuencia de hasta un 20% de ancha banda sin afectar el rendimiento de la decodificación (Astudillo, 2024).

Figura 6.

Aplicación de la tecnología LoRa en la agricultura.



Nota. LoRaWAN en la Agricultura. [Fotografía], KAZA, 2021,

(<https://www.kaza.es/producto/lorawan-monitoreo-agricola/?srsltid=AfmBOopR4ioHc0nBpzbwmic3ZcdgcGX3-GCzWnNTm9oL8QU9N9U3ln0O>). CC BY 2.0.

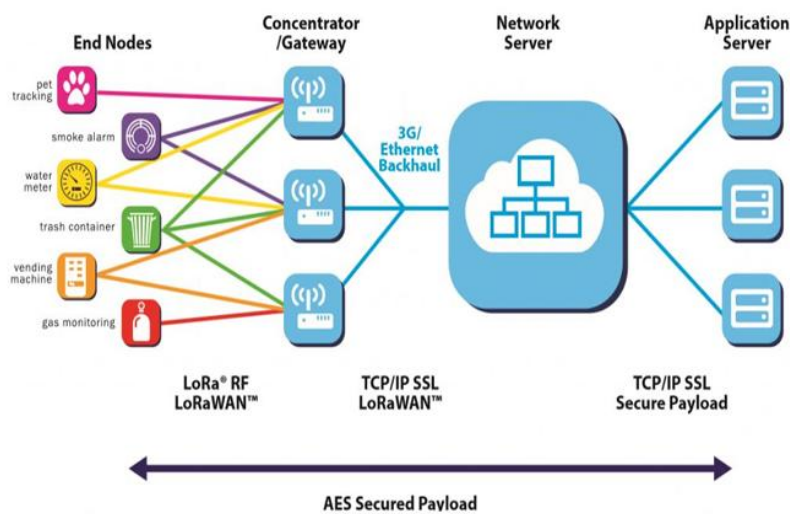
LoRaWAN

LoRaWAN es un tipo de arquitectura de comunicación inalámbrica que permite la conexión de varios dispositivos alimentados por batería (Kuntke et al., 2022), es una solución de conectividad de bajo consumo, escalable, rentables económicamente y seguro (Díaz, 2022). Utiliza la topología tipo estrella entre los nodos y las puertas de enlace, este facilita el diseño de nodos más sencillos sin pérdida de conectividad (Medina, 2022). Por lo que se utiliza con mayor frecuencia en dispositivos con baja transmisión de datos y de bajo consumo energético, logrando alargar la vida útil de las baterías de los dispositivos (Díaz, 2022). Por lo tanto, la relación entre LoRa WAN e IoT, es como presenta una

solución eficiente para la transmisión de datos en aplicaciones IoT que necesitan largo alcance y bajo consumo energético. (Lema, 2023).

Figura 7.

Arquitectura de red Lora WAN.



Fuente: (Medina, 2022)

Ubidots

Ubidots es una plataforma que permite crear aplicaciones que se conecten a través de Internet, esto mediante la comunicación de diversas tarjetas de red inalámbrica, el cual permite el control y monitoreo en tiempo real el estado en el cual se encuentra el proceso establecido (Guatapi, A. & García, E., 2022). La interfaz es amigable con el usuario el cual tiene la capacidad de crear tableros, dispositivos y variables dependiendo el uso que requiera. Además, tiene la capacidad de conectarse con otras plataformas y usar herramientas que permiten analizar los datos recolectados (Zambrano, 2021).

Figura 8.

Plataforma Ubidots.



Ubidots maneja 4 términos útiles para el manejo de la plataforma entre las cuales están:

1. **Event:** es la encargada de realizar una acción en un tiempo o instante determinado.
2. **Value:** es un valor actual de una variable en un momento determinado.
3. **Variable:** Se divide en dos tipos de variables, sintéticas y crudas, la primera recopila el dato y mediante una fórmula matemática aplicada por el usuario arroja el resultado en base a este proceso, el segundo solo muestra el dato tal cual sin ningún tipo de modificación.
4. **Data Source:** maneja la información del dispositivo en donde cada uno de estos depende del número de variables creadas.

Los beneficios que ofrece al utilizar esta plataforma como medio de recopilación, visualización y análisis de datos son:

- Conexiones entre la nube y variedades de bibliotecas.

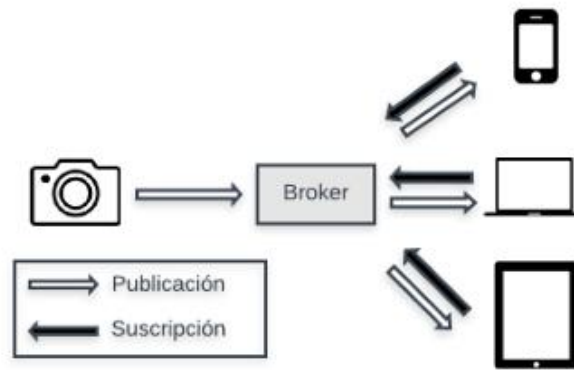
- Crear permisos y restricciones para usuarios al momento de la interacción con dispositivos, eventos y controles.
- Configuración de variables de manera automática, administrar sus propiedades y la apariencia en los dispositivos para realizar las mismas acciones en nuevos dispositivos.
- Conversión de datos de origen nativos a variables sintéticas.

Protocolo MQTT

En las aplicaciones de IoT uno de los protocolos más utilizados es el protocolo MQTT (*Message Queue Telemetry Transport*) el cual se basa en un tipo de mensajería asíncrona utilizado en el área machine-to-machine (Mahedero, 2020), por lo que está diseñado para que el envío de los mensajes sean seguros en el entorno de red (Pasika, 2020). Utiliza un modelo de publicación – suscripción, lo que implica que un cliente MQTT puede publicar un mensaje destinado a un servidor MQTT conocido como broker, para que este sea reenviado a varios suscriptores a un punto de información común (Monges *et al.*, 2021).

Figura 9.

Ejemplo de protocolo MQTT.



Fuente: (Monges *et al.*, 2021)

Según Mahedero (2022), se toma en cuenta tres dimensiones:

- Tiempo: los clientes no deben estar funcionando al mismo tiempo
- Espacio: los clientes no deben conocerse entre si
- Sincronización: no se produce interrupciones cuando los clientes publican o reciben un mensaje.

Sistema de control

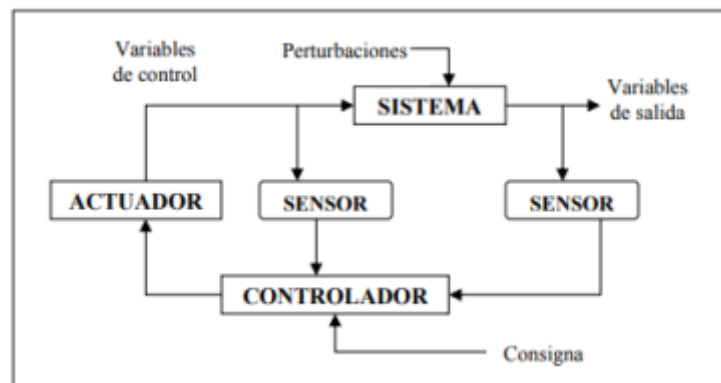
El sistema de control se caracteriza por la presencia de una serie de factores y elementos que influyen en el funcionamiento de un sistema (Chamochumbi, 2022). Se diseñan estos sistemas con la finalidad que puedan cumplir con ciertas tareas, que requieren estrategias de control, lo que en la industria permite cumplir con actividades de manera rutinaria, por ejemplo, líneas de ensamblaje, procesos de robótica, control de equipos y maquinaria, etc. (Corona, 2025).

Los elementos que conforman un sistema de control es el siguiente:

- Sensores: Recolectan datos externos del ambiente para que estas puedan ser medidos por el sistema.
- Controlador: Mediante los valores recolectados y el control aplicado, se calcula la acción a realizarse y este también pueda modificarse en base a las estrategias aplicadas.
- Actuador: Es el dispositivos o mecanismo que ejecuta la acción determinada por el controlador, al mismo tiempo este modifica las variables de control.

Figura 10.

Esquema de los elementos de un sistema de control.



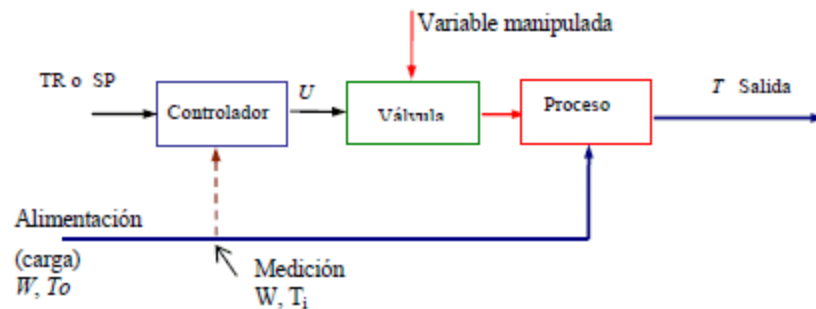
Fuente: (Chamochumbi, 2022)

Sistema de control de lazo abierto

Este tipo de sistema de control encuentra una señal de retroalimentación desde la salida que tiene como finalidad realizar una comparación entre la salida real del proceso con la respuesta de salida deseada. (Corona, 2025). Entonces el sistema de control de lazo abierto se divide en dos partes: control y proceso controlado (Kuo, 1996).

Figura 11.

Ejemplo de un sistema de control de lazo abierto.



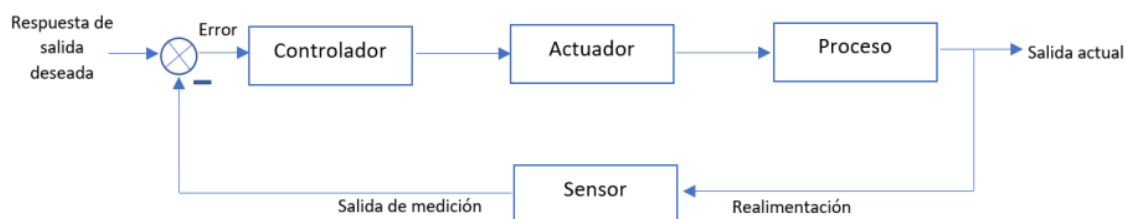
Fuente: (Corona, 2025)

Sistema de control de lazo cerrado

Es un sistema más completo en donde se recibe información sobre los estados que va tomando la variable. La retroalimentación se consigue mediante sensores, los cuales toman este valor proveniente de la salida y compara con el valor de respuesta de salida deseada, la diferencia radica en que este busca corregir los problemas que se presentan, en donde uno de los factores que más afectan es la inestabilidad, ya que al no alcanzar el valor deseado el sistema puede continuar haciendo ajustes y la variable controlada no para de cambiar (Corona, 2025).

Figura 12.

Esquema de un sistema de control de lazo cerrado.



PID

El controlador PID (Proporcional, Integral, Derivativo) es una herramienta utilizada en los sistemas de control, que influyen en la toma de decisiones en el control de salida tomando en cuenta los diversos factores (Corona, 2025). En donde el proporcional permite que el sistema reaccione ante el error, la integral elimina los errores de estado a largo plazo y por ultima la derivativa anticipa este comportamiento (Chamochumbi, 2022). Para el estudio de este control se toma en consideración la siguiente ecuación:

Ecuación 1.

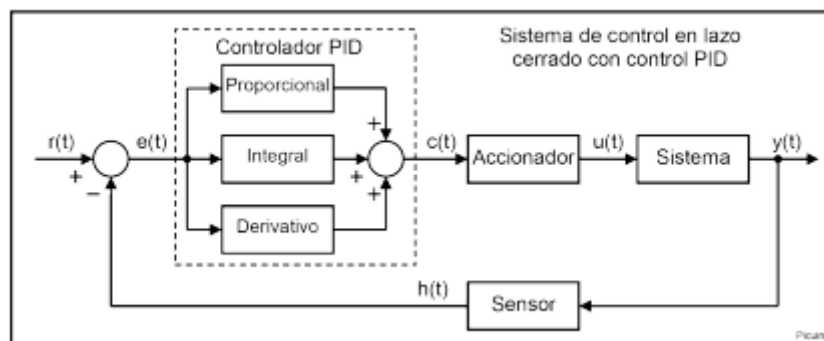
Calculo para determinar la señal de control PID.

$$u(t) = K \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right)$$

Dicha formula puede implementarse para que el sistema se mantenga funcionando correctamente, este se puede acoplar a varios sistemas mediante diversos lenguajes de programación. Se toma en consideración diversos parámetros en dominio del tiempo.

Figura 13.

Diagrama de un control PID.



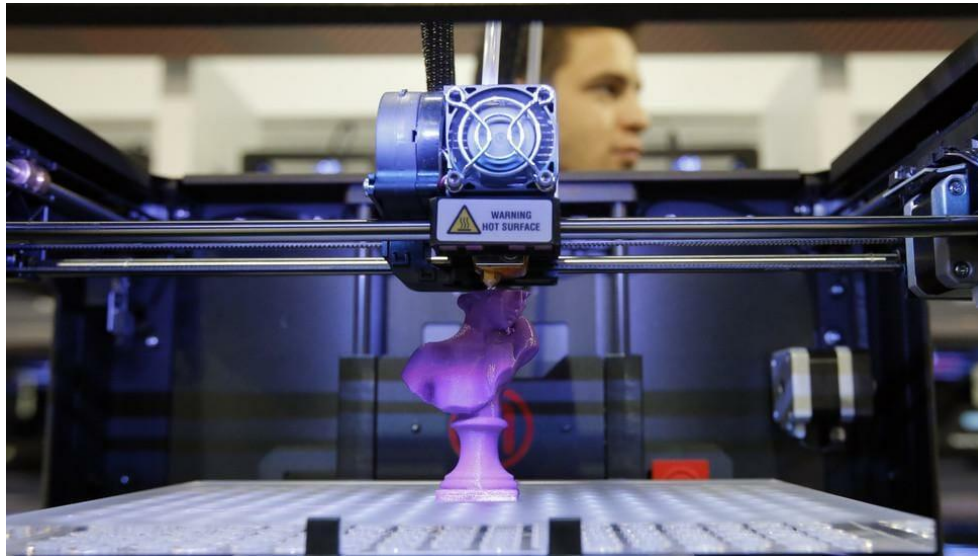
Nota. Adaptado de *Sistema de control de lazo cerrado*, Chamocho, 2022, Diseño e Implementación de un prototipo de horno automatizado para el secado de granos de maíz con Arduino y control PID. CC BY 2.0

Impresión 3D

La impresión 3D permite la creación de objetos tridimensionales mediante la adición de material capa por capa basado en un modelo digital (Ávila, F. & Moreno, L., 2024). El proceso empieza por el diseño o la creación de elementos mediante software CAD o de modelado 3D, por ejemplo, Inventor, Fusion 360, Blender, etc., también se hace uso de tecnologías como el escaneo 3D de piezas ya existentes. Por consiguiente, se exporta al software de laminado de impresión 3D, el cual divide el modelo en capas virtuales que serán guía para la impresora, otro factor importante es la calibración de parámetros como velocidad de ejes, temperatura, refrigeración, etc., además del tipo de material y la complejidad del modelo a imprimir definirán la calidad y el resultado de la pieza impresa en 3D. (Mero *et al.*, 2025).

Figura 14.

Proceso de impresión 3D.



Nota. Adaptado de IMPRESORAS3D.COM [Fotografía], por IMPRESORAS3D.COM, 2022, (<https://www.impresoras3d.com/consejos-de-impresion-3d-para-principiantes/>).

CC BY 2.0

Aplicaciones de la impresión 3D

Actualmente la impresión 3D ha evolucionado de manera exponencial siendo accesible para la mayoría de las industrias que existen en la actualidad, en donde más impacto tiene es en el área de ingeniería, en donde el tiempo y el costo son factores importantes al momento de creación de prototipos (Mero, E. *et al.*, 2025). La revolución de la impresión 3D permite un enfoque más eficiente y flexible, destacando en los siguientes ámbitos:

- Prototipado rápido.
- Personalización de piezas.

- Ligereza y optimización.

En el ámbito de la agricultura la impresión 3D ha sido utilizado en varios proyectos siendo uno de los más destacables el diseño de “Pétalos” para el cultivo domestico” por parte de Santos, I. (2021), la cual mediante la utilización de herramientas de modelado 3D y procesos de manufactura aditiva le permitieron crear modelos que pueden ser adaptados a cada uno de los elementos que utiliza, los cuales son leds de crecimiento, baterías y reguladores para controlar la temperatura de la planta dentro del hogar, lo cual le permite que sus piezas sean funcionales y estéticos para el usuario.

Figura 15.

Prototipos de pétalos para crecimiento de plantas en el hogar mediante impresión 3D.



Fuente: (Santos I., 2021)

Grados de protección IP

Los grados de protección IP son un estándar definido por la norma internacional IEC 60529, que forma parte de la Comisión Electrotécnica Internacional. Esta normativa se estableció para la clasificación y evaluación de resistencia de las carcasas de protección de dispositivos eléctricos y electrónicos, de los que se espera que puedan hacer frente a todo tipo de derrames y entornos con polvo (IEC, 2025).

El grado de protección es importante a lo largo del proceso de fabricación el cual garantiza la protección y la resistencia de un producto, con esto se certifica que puede ser utilizado en el exterior sin riesgos de daños ni riesgos que involucren la seguridad personal (Vassaux, 2024).

Figura 16.

Grados de protección IP

IEC Making electrotechnology work for you.

Ingress protection (IP) ratings guide

IP ratings are represented by combining the first and second digits of the below columns

1 st numeral - solid foreign objects	2 nd numeral - water
0 No protection 	0 No protection  -
1 Protected against solid foreign objects of 50 mm Ø and greater 	1 Protected against vertically falling water drops  Vertically falling drops shall have no harmful effects
2 Protected against solid foreign objects of 12,5 mm Ø and greater 	2 Protected against vertically falling water drops when enclosure tilted up to 15°  Vertically falling drops shall have no harmful effects when the enclosure is tilted at any angle up to 15° on either side of the vertical
3 Protected against solid foreign objects of 2,5 mm Ø and greater 	3 Protected against spraying water  Water sprayed at an angle up to 60° on either side of the vertical shall have no harmful effects
4 Protected against solid foreign objects of 1,0 mm Ø and greater 	4 Protected against splashing water  Water splashed against the enclosure from any direction shall have no harmful effects
5 Dust-protected 	5 Protected against water jets  Water projected in jets against the enclosure from any directions shall have no harmful effects
6 Dust-tight 	6 Protected against powerful water jets  Water projected in powerful jets against the enclosure from any direction shall have no harmful effects
Example:  +  = IP 65 → Protected against water jets  → Dust-tight	
	7 Protected against the effects of temporary immersion in water  Ingress of water in quantities causing harmful effects shall not be possible when the enclosure is temporarily immersed in water under standardized conditions of pressure and time
	8 Protected against the effects of continuous immersion in water  Ingress of water in quantities causing harmful effects shall not be possible when the enclosure is continuously immersed in water under conditions which shall be agreed between manufacturer and user but which are more severe than for numeral 7
	9 Protected against high pressure and temperature water jets  Water projected at high pressure and high temperature against the enclosure from any direction shall not have harmful effects

Como se puede observar en la Figura 16, el grado de protección se establece según el rango de protección y por lo tanto es la nomenclatura o código numérico con la que se certificara el producto, del lado izquierdo se define la protección contra solidos como el polvo, y del lado derecho se define el grado de protección contra el agua o cualquier tipo de líquido.

Implementación del IoT en la agricultura.

Según Hassan *et al.* (2024), los campos como la agroindustria y la gestión ambiental han aprovechado notablemente el potencial del IoT para fines que abarcan el diagnóstico y la regulación. Además, la implementación del IoT puede proporcionar a los usuarios finales y consumidores información completa sobre la procedencia y los atributos de los productos. Todo esto se puede obtener a través de una red de sensores inalámbricos, ubicados en espacios determinados para la recolección de datos en tiempo real, estos tienen la característica de ser de bajo costo y bajo consumo de energía (Estrada, 2020).

El objetivo de la integración de IoT es mejorar el rendimiento y la calidad de la producción agrícola, la transmisión y recepción de datos se realiza de forma autónoma, utilizando tecnologías de comunicación de campo cercano (NFC) o redes de sensores inalámbricos (WSN) sin la necesidad de la intervención humana (Hassan *et al.*, 2024).

En el ámbito de la agricultura se han realizado varios estudios previos

Sistemas IoT para monitoreo de cultivos

Los sistemas IoT han demostrado ser muy efectivos para optimizar recursos y aumentar la producción en cultivos de fresa a nivel mundial. En invernaderos

automatizados en Corea del Sur, Lee et al. (2023) lograron un aumento del 18% en la producción de *Fragaria* × *ananassa* utilizando sensores de humedad del suelo y cámaras multiespectrales, junto con algoritmos de aprendizaje automático. Por otro lado, Zhang et al. (2024) en China crearon un sistema IoT con ESP32 y comunicación 5G para monitorear variables micro climáticas, lo que permitió reducir el uso de agua en fresas hidropónicas en un 30%. Sin embargo, es importante señalar que estos estudios se enfocan en entornos controlados y no abordan los problemas de conectividad en áreas rurales como Limoncocha.

Protocolos de comunicación en áreas remotas

La elección del protocolo es fundamental para asegurar una transmisión estable en áreas donde no hay infraestructura celular. Orozco Monje y su equipo (2023) confirmaron en Colombia que LoRaWAN logra un 92% de eficiencia en la transmisión, alcanzando distancias de hasta 15 km, lo que lo coloca por encima de NB-IoT (75%) y Sigfox (68%) en entornos selváticos. Por otro lado, Quiroz-Valdez y colaboradores (2024) en México optaron por WiFi 6 para enviar datos de drones agrícolas, pero encontraron que el consumo energético era de 120 mA por nodo, lo que resulta poco viable para sistemas autónomos.

Frutilla (*Fragaria* x *annanasa*)

La frutilla es un alimento que se consume por millones de personas alrededor del mundo, es muy apetecida por su delicioso sabor, color brillante y valor nutricional (Rojas, 2022). Es una fuente sustancial de vitaminas A, B1, B2, B6, C y E, además de tener propiedades antioxidantes (Cerero, 2023), en este último es considerado como uno

de los antioxidantes más potentes, ayudando a la formación de colágeno y evitar altos niveles de colesterol en la sangre.

Según Manotoa (2021), en el Ecuador la producción de la frutilla se da en su mayoría en la región Sierra, algunas de las variedades que se cultivan son, el Oso Grande, Diamante, Monterrey y Albion, la mayor concentración de cultivo se encuentra en Pichincha con 400 hectáreas de cultivo, le sigue Tungurahua con 240 hectáreas, mientras en otras ciudades como Cotopaxi, Imbabura y Azuay no superan las 40 hectáreas de producción. En el Ecuador se produce alrededor de 16.27 T/Ha de fresa, en consideración a otros países como Estados Unidos que produce 66.9 T/Ha, España con 47,6 T/Ha, Israel con 43.5 T/Ha (Jacome, 2022) o países de la misma región como Colombia que tiene una producción de 30 a 40 T/Ha en sistemas tecnificados (Rojas, 2022).

Entre las variedades de frutilla que más destaca en la producción es la Albión, la cual cumple con las características deseadas, además de que se adapta correctamente a las condiciones del entorno produciendo un cultivo atractivo para los consumidores (Rojas, 2022). Entre sus principales características se encuentran:

- Potencial cultivo en suelos, sustratos e hidroponía.
- Producción estable.
- Planta de tamaño intermedio, lento crecimiento en zonas con temperaturas bajas.
- Fruto con color rojo externo, varía su coloración en los hombros a temperaturas más bajas.
- Fruto firme, uniforme y excelente vida postcosecha.

- Mayor tolerancia a lluvias, pero presenta alta sensibilidad a los ácaros. (Garces, 2021)

Cultivo de frutillas

El cultivo de la frutilla es algo particular el cual depende mucho del ambiente, material de siembra y cuidado, ya que se reflejará en la calidad del fruto y a sus características, como lo son el color, tamaño, firmeza, sabor, tolerancia a las plagas y enfermedades. Usualmente este tipo de cultivo se lo suele realizar en el suelo o sustrato, en el caso del suelo este debe tener una retención del agua favorable, gran cantidad de materia orgánica y buen drenaje, para mantener la humedad y evitar el crecimiento de malezas se lo suele cubrir con plástico alrededor de cada planta (Jacome, 2022). Por otro lado, el sustrato es una de las nuevas alternativas de cultivo, en donde este debe cumplir con ciertas características, como ser liviano, poroso y con gran capacidad para almacenar agua, ya que este tiene la función de sostener la raíz de la planta y retener la humedad al mismo tiempo (Cerero, 2023).

Figura 17.

Etapas de crecimiento de la frutilla.



Variables ambientales por controlar

El cultivo de fresas ha pasado de los métodos tradicionales en el campo a sistemas de producción avanzados en entornos de cultivos controlados con precisión mediante IoT, esto ofrece una solución a los problemas de estacionalidad y limitaciones de disponibilidad de la tierra (Hyein *et al.*, 2023). Por ello el control de parámetros ambientales se lo puede realizar de manera automatizada, con la finalidad de obtener el fruto de la más alta calidad, las variables a controlar dependen del proceso de crecimiento en la que se encuentre la planta, ya que este variara con el tiempo

Variables físicas

Temperatura

Para el crecimiento es una variable que influye de manera significativa en el crecimiento de la planta ya que ese determina la germinación de la semilla y el crecimiento de este. Como es una planta de clima frio, para su crecimiento la temperatura debe oscilar entre los 15 a 20 °C, pero durante el crecimiento de la raíz es recomendable mantener a 10 °C, temperaturas menores a estas puede deformar a la planta y el fruto (Jacome, 2022). Para el proceso de fructificación la temperatura adecuada es de 12 a 22 °C, esto evita que existan daños a malformaciones en los órganos florales. Durante el proceso de floración es adecuado mantener 23 °C durante el día y 18 °C durante la noche, en el proceso de fotosíntesis es óptimo mantener de 15 a 27 °C y en el proceso de crecimiento de la corona (fruto) a 18 °C (Manotoa, 2021).

Humedad

La humedad relativa adecuada es entre el 80 a 85%, se recomienda mantener entre este rango ya que en exceso genera la proliferación de enfermedades causadas por hongos, pero por otro lado la ausencia de humedad en la ambiente causa la muerte de la planta. (Manotoa, 2021).

Conductividad Eléctrica

Se refiere a la capacidad del suelo para conducir electricidad, esto gracias a las propiedades de las sales, se mide en decisiemens por metro (dS/m). Por lo que para optimo crecimiento de las plantas de fresas es necesario mantener en un rango de 1.2 a 1.8 dS/m, si el valor fuera menos quiere decir que existen problemas en el suelo o el sustrato, pero si tiene valores de 2 o 3 dS/m es un suelo saturado (Rojas, 2022)

pH del suelo

Es una variable esencial para el cultivo de las frutillas, en donde se debe mantener un rango adecuado de acidez o alcalinidad. Para el caso de este tipo de cultivos se recomienda mantener un rango de 6.5 a 7 (Rojas, 2022).

Luminosidad

Para el cultivo es importante recibir luz solar ya que esto permite el crecimiento de yemas sexuales, que conllevan a la floración y fructificación, por lo que es recomendable que reciban entre 8 a 11 horas de luz (Jacome, 2022). En este caso al ser un ambiente controlado, se utilizará leds de luz de espectro completo, ya que este tipo de leds están diseñados para simular la luz solar. Para el cultivo es necesario mantener 400 a 500 lm para el florecimiento y 600 a 700 lm para la floración y fructificación (Nexsel, 2024).

Metodología

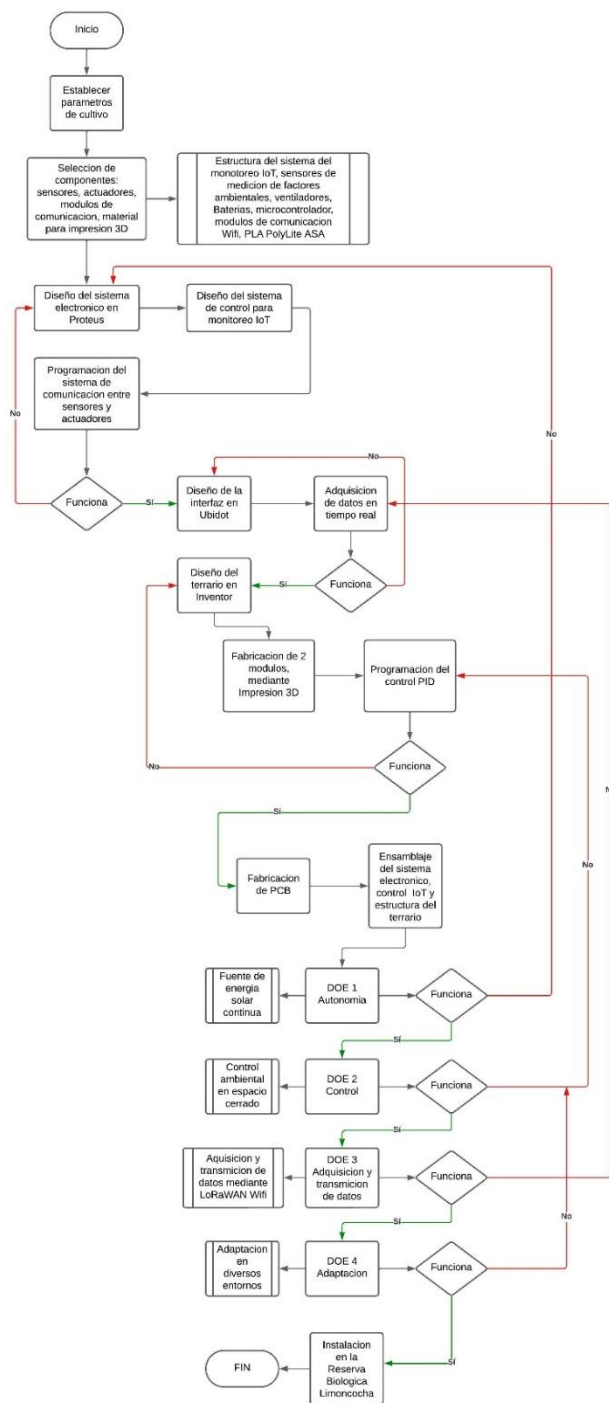
Esta investigación se lleva a cabo con un enfoque cuantitativo, ya que se basa en la recolección y análisis de datos numéricos para medir de manera objetiva el rendimiento y la adaptabilidad del sistema IoT propuesto en el entorno amazónico de la localidad de Sucumbíos. Este enfoque permite establecer conexiones claras entre las variables ambientales que se monitorean y la respuesta del sistema, lo que facilita la validación de hipótesis a través de herramientas estadísticas y comparativas.

El tipo de investigación es aplicada y experimental. Es aplicada porque busca resolver un problema específico en la producción agrícola de la región amazónica, mediante el desarrollo e implementación de un sistema tecnológico innovador. Es experimental porque implica la manipulación controlada de variables ambientales dentro de terrarios y el espacio cerrado creado dentro del módulo, con el objetivo de observar y cuantificar el impacto de la automatización y el monitoreo en tiempo real sobre el rendimiento y la eficiencia del cultivo de frutilla (*Fragaria* × *ananassa*). Así, la investigación no solo genera nuevos conocimientos, sino que también ofrece soluciones prácticas y replicables para la agricultura de precisión en contextos rurales.

La modalidad de investigación es de campo laboratorio, ya que la implementación, recolección, validación y pruebas de funcionamiento se realizó en un entorno real dentro de la Reserva Biológica de Limoncocha, el cual nos permite visualizar datos experimentales reales directamente de la zona de estudio.

Figura 18.

Diagrama de procesos.



Establecimiento de parámetros de Cultivo

La frutilla es un fruto que no es originario de la región Amazónica, por lo que se deben investigar en las condiciones ambientales en las que se cultiva, esto para garantizar su crecimiento en los módulos tipo terrarios. Este proceso tiene como propósito trasladar cultivos de frutilla que son no originarios de esta región mediante este tipo de módulos, siendo estos adaptables en cualquier entorno, control y monitoreo en tiempo real mediante IoT, el cual si se implementa a gran escala formaría como un nuevo ingreso económico a la localidad.

En base a la investigación en diversos artículos científicos, se pudo determinar los valores necesarios para mantener y asegurar el crecimiento adecuado para la frutilla en un ambiente controlado, por lo cual se desarrolló la siguiente tabla:

Tabla 3.

Parámetros de cultivos.

Etapas de crecimiento	Variable	Valor
Crecimiento de la planta de la frutilla	Temperatura ambiente	15 – 20 °C
	Humedad relativa	80 – 85%
	Intensidad lumínica	400 – 500 lm
	pH	6.5 – 7
	Conductividad eléctrica	1.2 – 1.8 dS/m
Floración	Temperatura ambiente	23 °C (Día) 18 °C (Noche)

	Humedad relativa	80 – 85%
	Intensidad lumínica	600 – 700 lm
	pH	6.5 – 7
	Conductividad eléctrica	1.2 – 1.8 dS/m
Fructificación	Temperatura ambiente	12 – 22 °C
	Humedad relativa	80 – 85%
	Intensidad lumínica	600 – 700 lm
	pH	6.5 – 7
	Conductividad eléctrica	1.2 – 1.8 dS/m

Fuente: Elaboración propia.

Selección de componentes electrónicos para el sistema de control y adquisición de datos.

Una vez establecido los parámetros de control para los cultivos, se empezó con la selección de materiales, dispositivos y componentes para el sistema de electrónico, control y fabricación de las carcasas y módulos tipo terrarios, para el proyecto se dividirá en 2 secciones:

Componentes electrónicos sistema de control para adquisición de datos:

Tabla 4.

Componentes electrónicos para adquisición y transmisión de datos.

Componente	Descripción
ESP32	• Microcontrolador dual core a 240MHz

	• 520 KB SRAM • WIFI 802.11 b/g/n • Bluetooth (clásico y BLE) • 16 MB Flash • Alimentación de 2.3 a 3.6V • Antena en placa • Sensor Hall • 30 PINES
DTH11 (Sensor de humedad y temperatura)	• Voltaje de operación: 3V-5.5V • Rango Humedad: 20-90% de Humedad Relativa. • Rango temperatura: 0-50°C. • Resolución Humedad: 1RH / 8 bits • Resolución Temperatura: 1°C / 8 bits.
MQ-135 (Sensor de CO ₂)	• Modelo: Módulo MQ-135 • Voltaje de operación: 5 V • Corriente de operación: 150mA • Detección de: Amoníaco (NH₃), Óxidos de nitrógeno (NO_x), Alcohol, Sulfuros, Benceno (C₆H₆), Monóxido de carbono (CO) y humo. • Sensibilidad: • 10 – 300 ppm Amoníaco (NH₃) y Alcohol.

	• 10 – 1000 ppm Benceno. • Consumo de potencia calorífica $\leq 800\text{mW}$ • Temperatura de operación: $-20^{\circ}\text{C}\sim 70^{\circ}\text{C}$ • Humedad de operación: $<95\%\text{RH}$ • Tamaño: 32mm x 22mm x 24mm. • Peso: 8 g
ESP32 - CAM	• Voltaje de alimentación: 5 / 3.3VDC • Cámara OV2640 • WiFi • Bluetooth • Puerto para memoria microSD • Frecuencia de reloj: 240MHz • Microcontrolador: ESP32 • Memoria de programa
ESP32 – CAM Base Programador	• Programador compatible con ESP32-CAM • ESP32-CAM-MB Micro USB a Serial DH-340G
ESP32 LORA32	• Microprocesador: ESP32-S3FN8 (procesador de doble núcleo Xtensa® LX7 de 32 bits, estructura de rack pipeline de cinco etapas, frecuencia de hasta 240 MHz). • Chip de nodo LoRa SX1262.

	• Paxcounter – Paxcounter es un dispositivo basado en MCU ESP32 para medir los flujos de pasajeros en tiempo real. • Transmisión de datos: los datos se pueden almacenar en una tarjeta SD local, transferirse a la nube utilizando la red WAN LoRa o MQTT a través de TCP/IP, o transmitirse a un host local mediante interfaz serial.
Antena Tranceptor Mt7681 Para Esp8266 LORA	• Frecuencia de trabajo: 2400-2500 MHZ; • Impedancia: 50 Ohm
BH1750 (Sensor de luminosidad)	• Voltaje de Operación: 3V – 5V • Interfaz digital a través de bus I2C con capacidad de seleccionar entre 2 direcciones • Respuesta espectral similar a la del ojo humano • Rango de medición: 1-65535 lux • Modo de bajo consumo de energía • Rechazo de ruido a 50/60 Hz • Baja dependencia de la medición contra la fuente de luz: halógeno, led, incandescente, luz de día, etc. • La influencia del espectro infrarrojo es poca

	• Tamaño: 13.9 X 18.5 mm
FC-128 (Sensor de humedad del suelo)	• Tensión de funcionamiento: 3.3V -5 V • Sensibilidad ajustable por potenciómetro • Modo de salida dual: analógica y digital • LED rojo – indicador de encendido • LED verde – indicador de salida de conmutación digital • Medidas PCB: 3 x 1.5 cm • Medidas Sonda: 6 x 3 cm

Fuente: Elaboración propia.

Componentes electrónicos sistema de control de ambiente:

Tabla 5.

Componentes electrónicos para el sistema de enfriamiento y control de crecimiento.

Componentes	Descripción
Modulo Rele 5V 8 Canales Con Led Indicadores low	• Versión de relé: 5v • Corriente silenciosa: 5mA • Corriente máxima: 190 mA • Corriente de disparo: 2-4mA • Voltaje de disparo bajo: 0-1.5V • Alto voltaje de disparo: 2.5-5V

Regulador de voltaje Pasa Bajo	• Voltaje de entrada: 5 V-32 V • Voltaje de salida: 0,8 V-24 V • Corriente de salida: Pico 5A • Tamaño: 43x21x14mm (largo x ancho x Alto)
Celda Peltier	• Modelo: TEC1-12706. • Voltaje de Operación: 0-15V DC (12V nominal) • Corriente de trabajo: 0-6A. • Potencia nominal: 50 ~ 72W. • Temperatura de trabajo: -30°C hasta 70°C. • Color: Blanco. • Material: plástico + cerámica.
Mosfet IRF3205	• Disipación total del dispositivo (Pd): 150 W • Tensión drenaje-fuente (Vds): 55 V • Tensión compuerta-fuente (Vgs): 10 V • Corriente continua de drenaje (Id): 98 A • Temperatura operativa máxima (Tj): 150 °C • Tensión umbral compuerta-fuente Vgs(th): 4 V • Carga de compuerta (Qg): 146 nC • Resistencia drenaje-fuente RDS(on): 0.008 Ohm • Encapsulado: TO-220 • 3 pines

Mosfet IRFZ44N	• Tipo de Encapsulado: TO-220 • Transistor equivalente a NTE2395, IRFZ44 • Transistor Mosfet Canal N • Voltaje Drain - Source (VDSS): 55V • Voltaje Drain - Gate (VDGR): 55V • Voltaje Gate - Source (VGS): $\pm 20V$ • Corriente Drain (ID): 49A • Corriente Pulsada en Drain (IDM): 160A • Resistencia de Conducción (RDS): 0.022Ω • Potencia Máxima Disipada (PD): 110W
Ventilador	• Marca: ZSOXPF • Tipo de conector de alimentación: 4 pines • Voltaje: 12 Voltios • Potencia: 2.5 vatios • Método de refrigeración: Aire forzado • Nivel de ruido: 23,5 dB • Velocidad máxima de rotación: 2400 RPM
Disipador	• Largo: 20cm • Ancho: 13 cm • Alto: 4.2 cm • Espesor núcleo: 4.5 / 5 mm

	• Capacidad de disipación ACTIVA: 200W • Capacidad de disipación PASIVA: 50W
Bombas de agua	• Modelo del motor: 365. • Voltaje de funcionamiento: 12V. • Corriente sin carga: 0.23A • Tipo de bombeo: Por diafragma. • Diámetro de entrada y salida: 8mm. • Flujo de del agua: 2 a 3 litros por minuto. • Elevación del chorro: 1 a 2.5 metros. • Presión de salida: 1 a 2.5Kg. • Material: Metal y plástico. • Longitud del motor: 45mm • Diámetro del motor: 28mm. • Longitud de la bomba: 55mm. • Diámetro de la bomba: 40mm x 35mm • Tamaño total aproximado: 93mm (largo) x 47mm (ancho) x 42mm (alto)

Fuente: Elaboración propia.

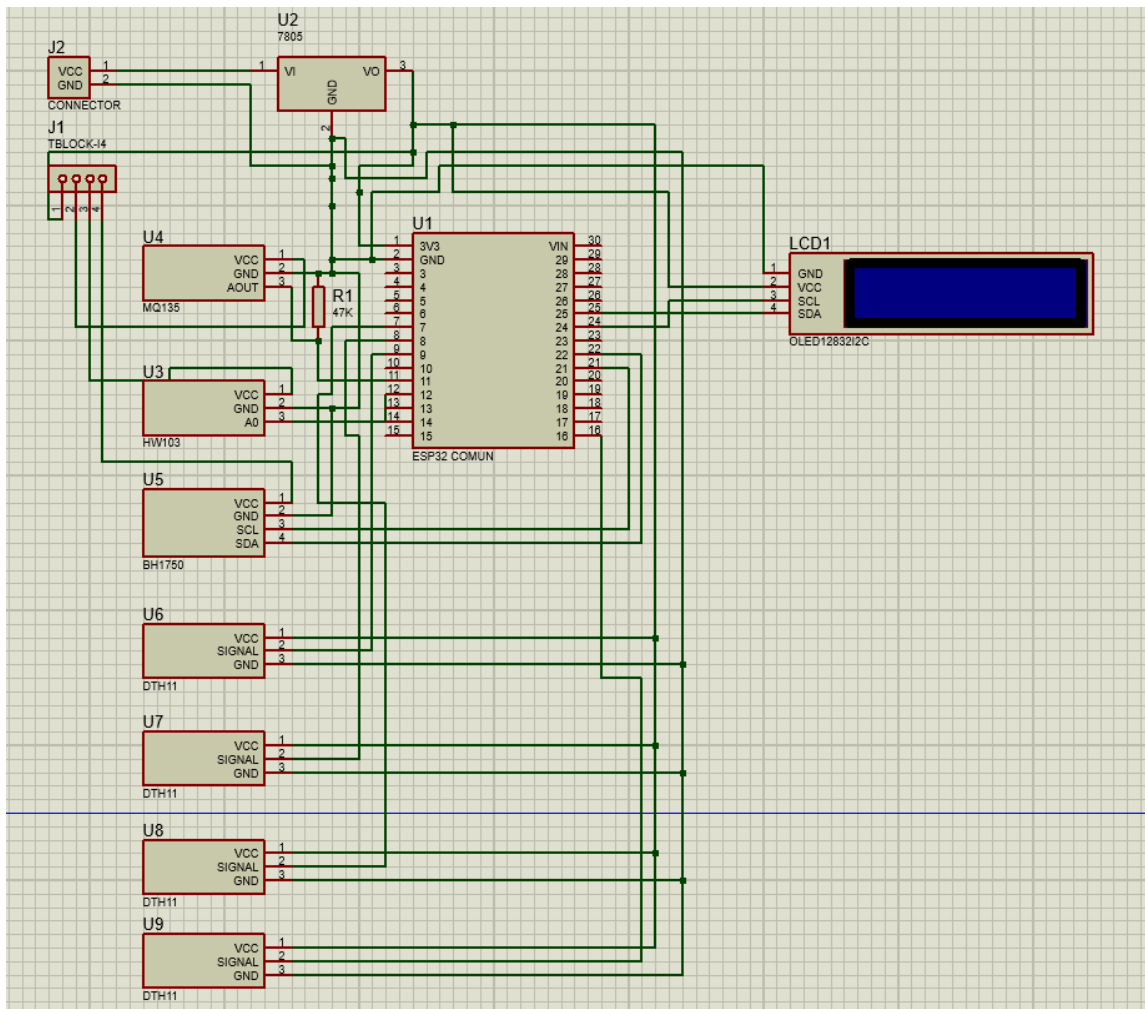
Realización y simulación del diagrama de conexiones en Proteus V8

Para la realización del diseño del sistema electrónico se realizó en el software Proteus V8 con licencia educativa, mediante este programa se realizó la distribución de sensores, actuadores y dispositivos para distribuir correctamente cada una de las salidas

digitales y entradas analógicas del sistema de control. Esto se realiza mediante el software Proteus con la licencia de aprendizaje, el cual nos permite realizar este tipo de acciones y crear simulaciones de diversos tipos. Entonces, de esta forma se añade cada uno de los sensores, actuadores y dispositivos para crear un esquemático del sistema de control. De la misma forma se diseñaron dos esquemáticos, el primero se encuentran la distribución de cada uno de los sensores que se utilizara para la adquisición de datos mediante el ESP32 de 38 pins, por otro lado, el segundo se utilizara para el diseño del sistema de refrigeración de los módulos.

Figura 19.

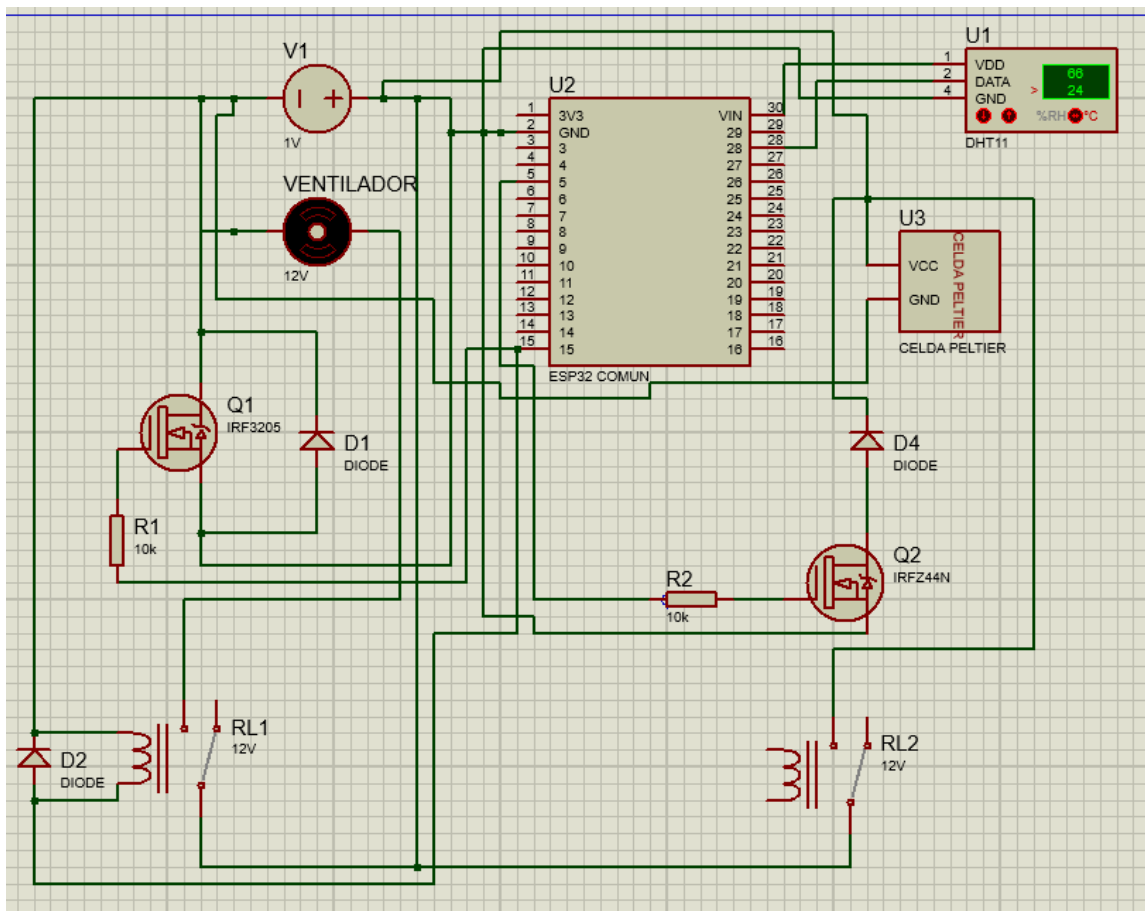
Esquemático del sistema de control para adquisición de datos.



Nota. En el siguiente diagrama se añade los sensores a utilizar, entradas de alimentación de cada uno de estos y la distribución de estos en cada uno de los pins del ESP32. Fuente: Elaboración propia, 2025.

Figura 20.

Diseño del sistema de control de temperatura.



Nota. En el siguiente diagrama se añade cada uno de los componentes a utilizar dentro del sistema de control de temperatura para el módulo tipo terrario. Fuente: Elaboración propia, 2025.

Programación en ESP32 para adquisición de datos

La programación para la adquisición de datos y control de los actuadores para el control de las variables ambientales se diseñó en Arduino IDE, en el código adjunto en el Anexo 1 se observa la estructura que se llevó a cabo para el control. En este código se observa la estructura de este, se empezó con la comunicación entre ESP32 y la

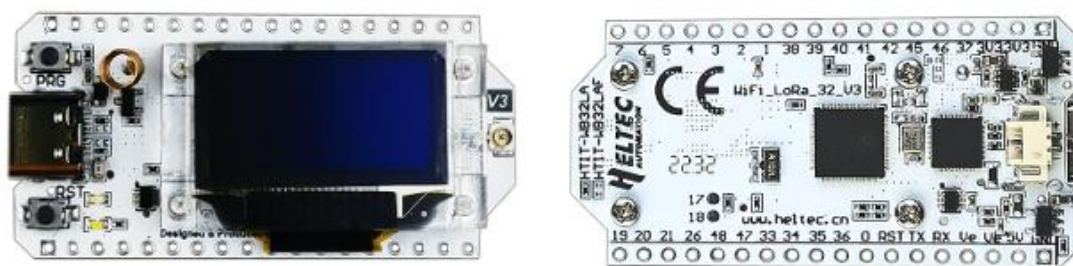
plataforma Ubidots, control PID de temperatura lectura de variables de los sensores, conversión de datos y encendido y apagado de actuadores.

Configuración del módulo Heltec LoRa32.

En el apartado de comunicación inalámbrica de utilizo la tecnología LoRa, utilizando el módulo LoRa32 de la marca Heltec el cual cuenta con las siguientes características técnicas:

Figura 21.

Modulo Heltec LoRa32 V3.

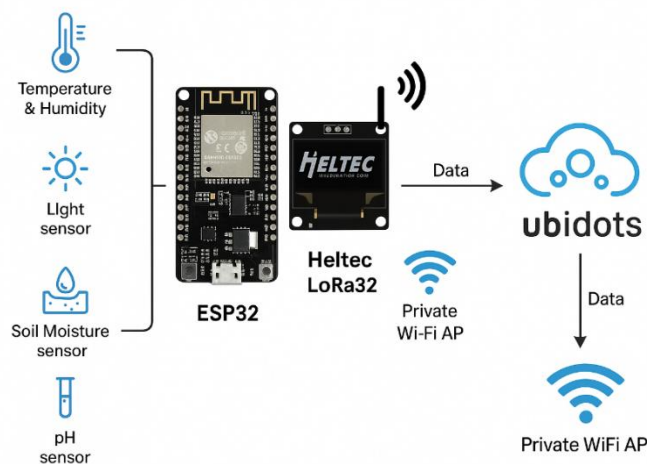


- LoRa chip: SX1262
- Banda de frecuencia de soporte: 863 – 928 MHz
- Distancia de comunicación abierta: 2.8 Km
- WiFi: 802.11 b/g/n
- Sensibilidad del receptor: -139 dBm
- Modo de soporte: Sniffer, Station, SoftAP y Wi-Fi Direct
- Bluetooth de modo Dual: Bluetooth tradicional y Bluetooth de bajo consumo BLE
- Voltaje de funcionamiento: 3.3 a 7 V

Tomando en cuenta sus características técnicas tenemos un radio de adquisición de datos de 2.8Km sin la necesidad de algún modulo receptor o transceptor integrado o conectado al ESP32, adicional el valor de la banda de frecuencia en la que se encuentra trabajando es más robusta y logrando atravesar la mayoría de los obstáculos en el entorno que se encuentre trabajando, otra de las ventajas por las que se utilizó este módulo es por su bajo consumo energético funcionando con 3,3v. A partir de estos datos se realizó la programación del módulo LoRa32 en Arduino IDE, en donde a partir de la instalación de las librerías correspondientes el IDE y el módulo son compatibles. Como primer punto se realizó un enfoque en la creación de un punto de acceso privado, para que el ESP32 se pueda conectar a este punto y no depender de las redes locales u otro tipo de comunicación inalámbrica, el segundo enfoque es el envío de los datos de las variables agroclimáticas a la plataforma Ubidots en tiempo real, el cual lo realiza el mismo modulo LoRa, funcionando de la siguiente forma:

Figura 22.

Esquema de comunicación.



Fuente: Elaboración propia.

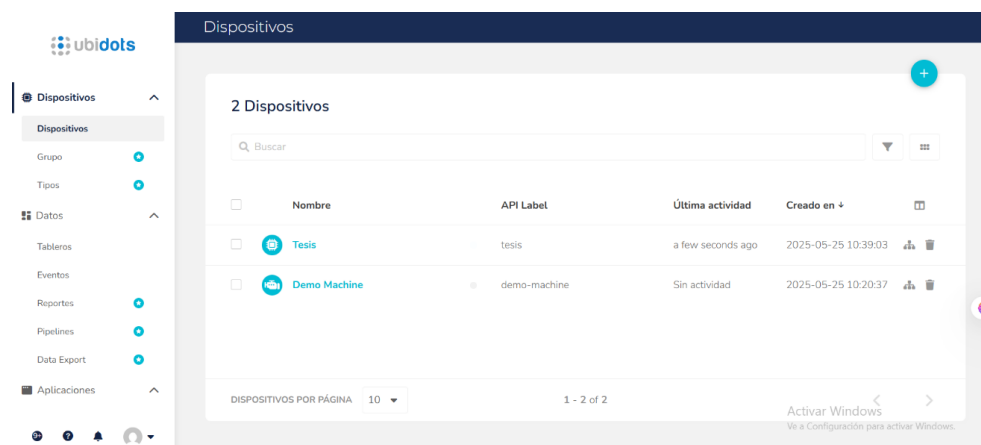
El apartado de la conexión del punto de acceso privado se encuentra en el Anexo 2, también en el Anexo 3 se muestra la visibilidad del punto de acceso privado en donde se conecta el ESP32.

Establecimiento de conexión con Ubidots y LoRa32

Se utilizó la plataforma Ubidots para manejar los datos que se reciben del módulo LoRa32, esto porque al ser una plataforma amigable y robusta en cuanto a aplicaciones con IoT, es compatible con la tecnología de comunicación inalámbrica LoRa. En donde el módulo se conecta a una red local WiFi para transferir los datos a la nube y estos puedan ser visualizados de manera remota y en tiempo real. Para lograr esto se generó la interfaz gráfica en la plataforma, el primer paso es generar un dispositivo, en donde se almacenarán todas las variables a ser controladas, para este proyecto el dispositivo creado se llamará “Limoncocha”.

Figura 23.

Creación de dispositivo en Ubidots.



Nota. La plataforma Ubidots se utilizó con la licencia STEM, el cual nos permite crear dos dispositivos para la visualización de los datos en la nube.

Una vez creado el dispositivo, este genera un Token único que permite la conexión entre los microcontroladores y la plataforma, así mismo otros parámetros que podemos cambiar dependiendo la aplicación que se requiera.

Figura 24.

Configuración de dispositivo.

Tesis	
Descripción	Cambiar descripción
Ícono ⓘ	microchip
API Label	tesis
ID	68333997f436af692e026208
Token	
Etiquetas	Agregar etiqueta
Última actividad	2025-05-25 22:58:16
Tipo de dispositivo	Aplicar Tipo de Dispositivo
Capas	

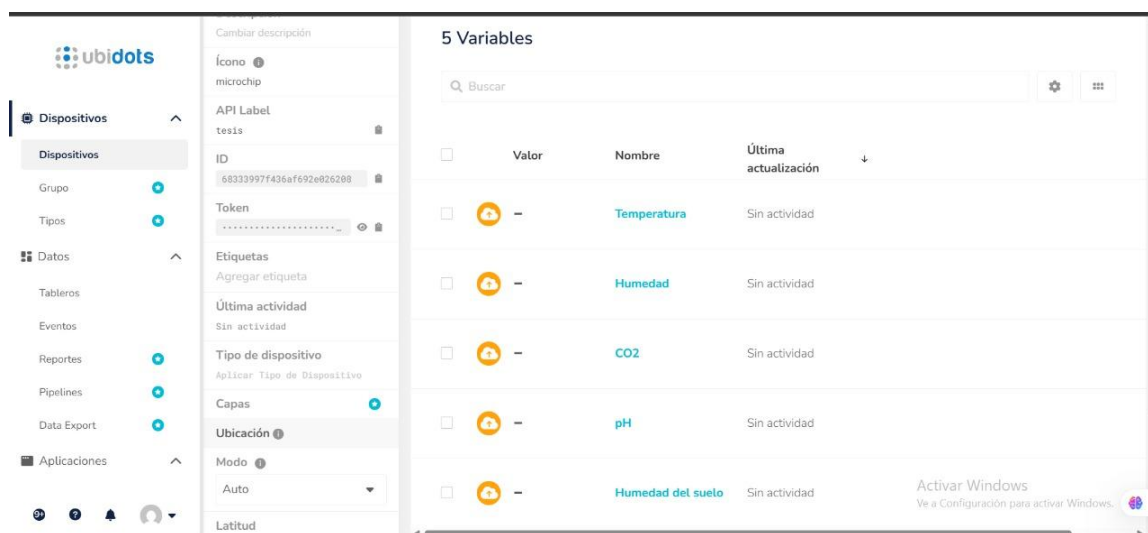
Fuente: Elaboración propia.

El siguiente paso es generar o crear las variables que deseamos controlar o visualizar en tiempo real, dentro de la plataforma existen dos tipos de variables “*Variables Sintéticas*” y “*Variables crudas*”, para el tipo de aplicación que estamos utilizando se crearan variables crudas ya que son datos que se reciben directamente del

microcontrolador sin ningún tipo de lógica de procesamiento adicional, en cambio el otro tipo de variable permite añadir ecuaciones de todo tipo para procesar los datos recibidos antes de que se muestren en la interfaz. Se crearon 6 variables que se manejarán dentro del módulo cerrado.

Figura 25.

Creación de variables crudas en Ubidots.



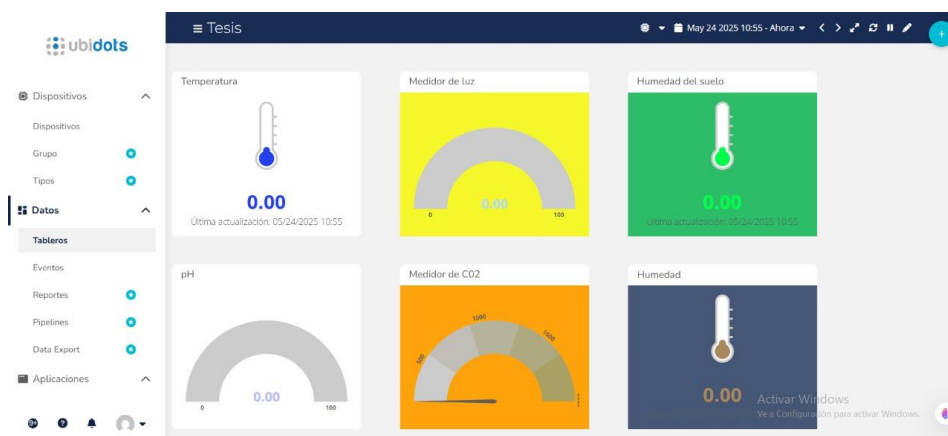
Nota. Se utilizó la plataforma Ubidots con la licencia STEM, en donde se creó las variables agroclimáticas que albergaran los datos a recolectar mediante los sensores.

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Como se puede observar en la Figura 25 en cada una de las variables tiene un mensaje de sin actividad, esto es porque aún no se ha asignado a ninguna acción, para esto se crean los Widgets que básicamente son las acciones que se requiere realizar, desde la medición de temperatura hasta la activación de actuadores. En nuestro proyecto solo se necesita la visualización de los datos en tiempo real del ambiente cerrado.

Figura 26.

Creación de Widgets.

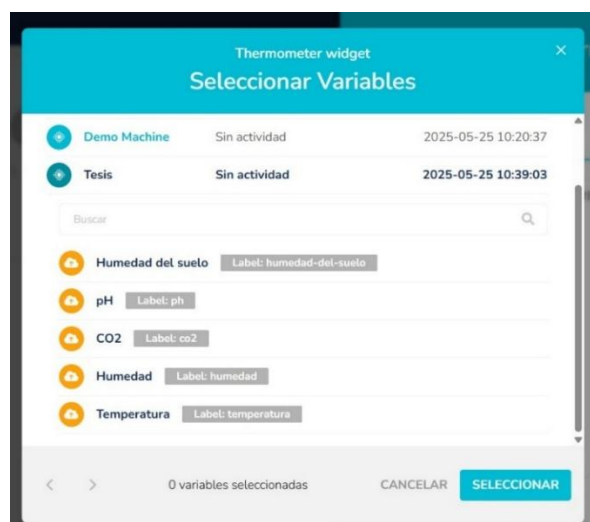


Fuente: Elaboración propia.

A cada uno de estos Widgets se le asigna una variable, estas son las que se crearon previamente en el apartado de dispositivo.

Figura 27.

Asignación de variables.



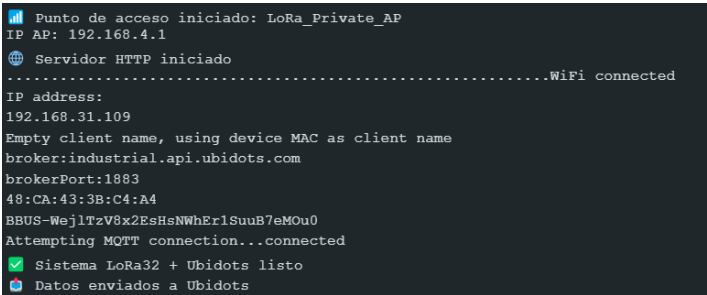
Fuente: Elaboración propia, 2025.

Una vez creado el dispositivo, las variables y los widgets en Ubidots, se realiza la programación en Arduino IDE, para realizar la conexión entre el módulo LoRa32 y Ubidots. Como se había mencionado anteriormente, la plataforma genera un Token único con el cual podemos establecer esta conexión. En Arduino IDE, es necesario tener instalado las librerías “*UbidotsEsp32Mqtt.h*”, el cual permite la comunicación y transmisión de datos entre cada uno de los dispositivos, esta configuración puede ser observada en el Anexo 1.

Es necesario conectarse a una red local WiFi estable para la transmisión de datos, así mismo se incluye su contraseña, el Token y el nombre de la variable que recibirá los datos en la plataforma. En la siguiente parte del código se inicializa la conexión entre los dispositivos y así mismo la suscripción a las variables designadas anteriormente. Para verificar que se realizó la conexión exitosamente, en el monitor serial del Arduino IDE, nos mostrara un mensaje en donde se verifique la creación del punto de acceso privado y la verificación de que los datos han sido enviados correctamente.

Figura 28.

Verificación de conexión y punto de acceso privado.



```

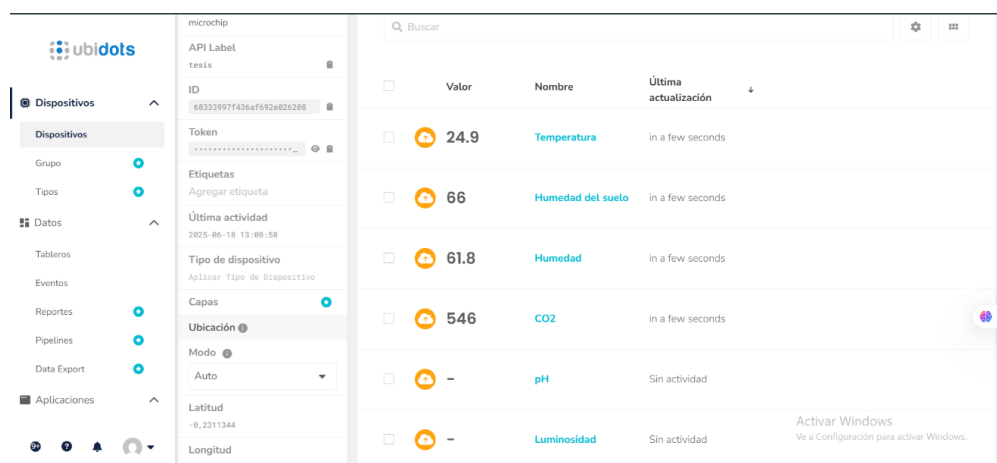
Punto de acceso iniciado: LoRa_Private_AP
IP AP: 192.168.4.1
Servidor HTTP iniciado
.....WiFi connected
IP address:
192.168.31.109
Empty client name, using device MAC as client name
broker:industrial.api.ubidots.com
brokerPort:1883
48:CA:43:3B:C4:A4
BBUS-Wej1TzV8x2EsHsNWhErlSuuB7eMOu0
Attempting MQTT connection...connected
✅ Sistema LoRa32 + Ubidots listo
📡 Datos enviados a Ubidots
  
```

Nota. En el software Arduino IDE, se realizó la verificación de la conexión y transmisión de datos en el apartado de Monitor Serial. Fuente: Elaboración propia, 2025.

En la plataforma podemos observar que las variables empezaron a recibir datos y estos se pueden visualizar en tiempo real.

Figura 29.

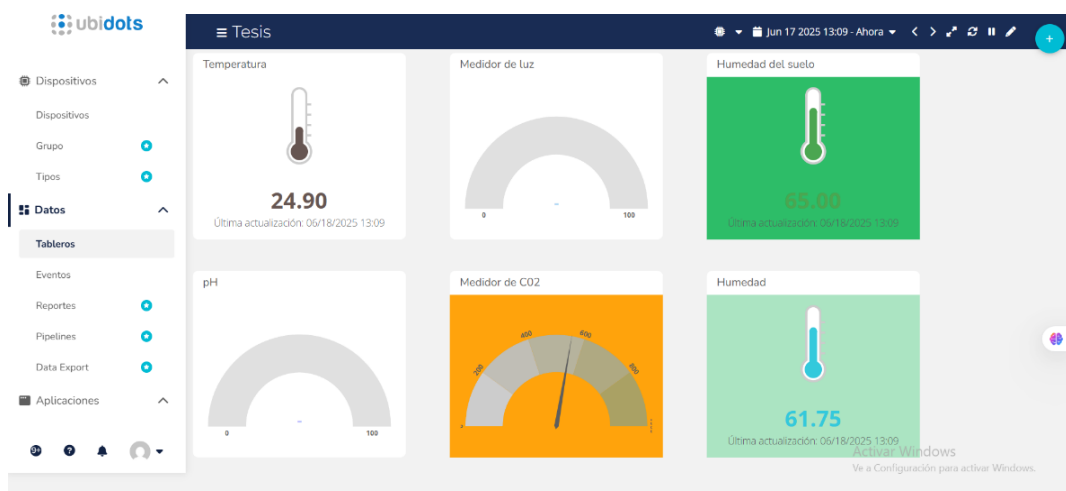
Visualización de datos en Ubidots.



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Figura 30.

Visualización de datos en los Widgets.



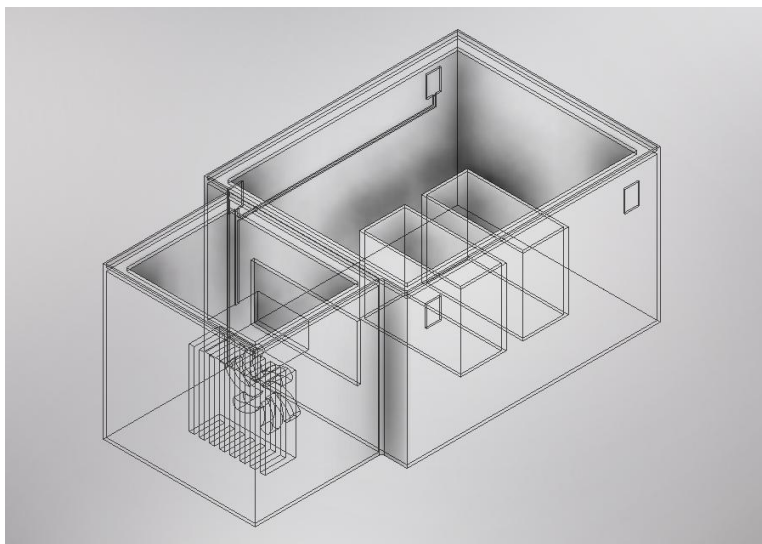
Fuente: Elaboración propia, 2025.

Diseño y fabricación mediante manufactura aditiva de los módulos.

Se realizó el modelado 3D de los módulos en el software Inventor con licencia educativa, este paso es importante ya que nos permite dimensionar correctamente cada uno de los elementos y distribuirlos de manera correcta. Primero se realizó un modelado general de todo el sistema para realizar el primer prototipo en donde se albergarán cada una de las plantas, en conjunto con el sistema de control.

Figura 31.

Modelado 3D del módulo terrario.



Nota. En este modelado se implementó los sensores y en donde estarían asentados el sistema de control, de la misma forma el sistema de refrigeración. Fuente: Elaboración propia, 2025.

Cabe recalcar que el módulo puede sufrir varias iteraciones durante su construcción ya que, al no ser un modelo fijo para un entorno en específico, este debe ser

adaptado para el lugar en donde será instalado, además de que se realizaran pruebas de ensamblaje y protección para saber que los modelos cumplen con su función.

Parámetros de configuración para impresión 3D.

Terminado el modelado 3D de las carcasas para el sistema de control y partes de soportes para el módulo tipo terrario en el software Inventor se importa el archivo “*.ipt*” al formato “*.stl*” para procesarlo en el software de laminado de impresión 3D “Creality Print”, se seleccionó este programa de laminado ya que se está utilizando la impresora “Creality K1C”, porque al ser de la misma marca tiende a manejarse de mejor manera en el ámbito de configuración y parametrización de los materiales a utilizar. Los materiales seleccionados para la fabricación de las carcasas para la protección del sistema de control y las partes del módulo tipo de terrario son:

Tabla 6.

Características y parámetros de los materiales de impresión.

Material	Descripción	Parámetros de impresión	Pieza por imprimir
PETG	- Resistencia química frente a ácidos minerales, bases o sales. - Resistencia al agua y luz UV.	Temperatura de cama: 70° - 90° C Temperatura de Impresión: 230° - 245° C	Carcasas y soportes para la protección del sistema de control.

	Material con certificación ISO 10993.	Encapsulamiento: No necesario Ventilador de capa: 70 - 90%	
ASA	- Resistencia a los rayos UV. - Resistente al contacto prolongado con el agua - Capacidad de ser mecanizado, lijado o alisado.	Temperatura de cama: 95° - 110° C Temperatura de Impresión: 240° - 260° C Encapsulamiento: Recomendable Ventilador de capa: 0 - 20%	Soportes y elementos externos del módulo tipo terrario y macetas.
PP	- Filamento de polipropileno ligero y cierta flexibilidad - Capacidad de flotar por su densidad menor a la del agua	Temperatura de cama: 50° - 60° C Temperatura de Impresión: 205° - 220° C Encapsulamiento: Recomendable	Soportes y elementos externos del módulo tipo terrario.

	Resistencia a ambientes húmedos o condiciones climáticas extremas	Ventilador de capa: 40 - 60%	
--	---	--	--

Fuente: Taiced, 2025.

Una vez exportado el archivo, en el software de laminado de impresión 3D se realiza la configuración para cada una de las piezas, ya que cada una de estas tendrá un material de impresión diferente por lo que se dividen en 3 parámetros de impresión, para interiores y exteriores, las cuales se observan en la Tabla 7.

Tabla 7.

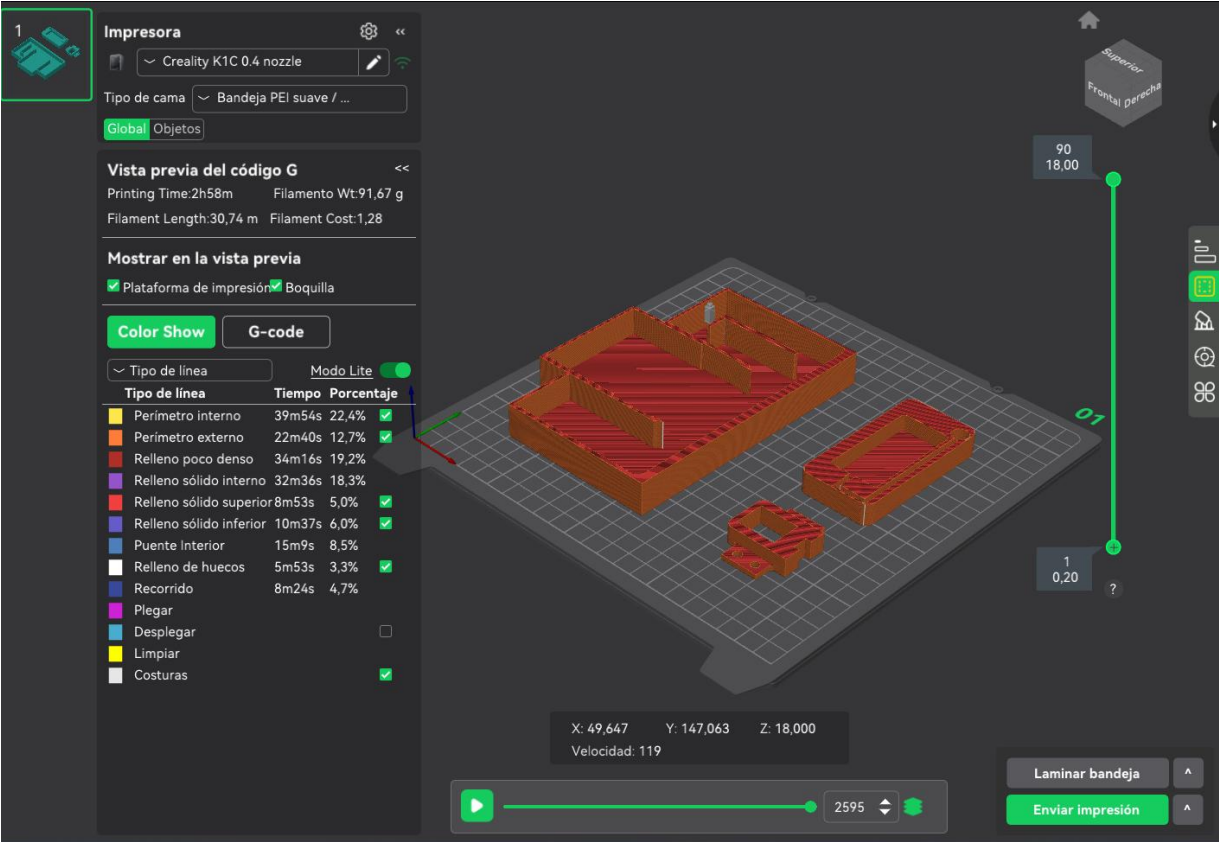
Parámetros de impresión.

Material	Temperatura (Boquilla)	Temperatura (Cama)	Perímetros	Densidad	Tipo de relleno
PETG	Capa Inicial: 260	Capa Inicial: 70	4	85%	Rejilla
	Capas Superiores: 250	Capas Superiores: 60			
ASA	Capa Inicial: 270	Capa Inicial: 90	2	40%	Rejilla
	Capas Superiores: 260	Capas Superiores: 80			
PP	Capa Inicial: 230	Capa Inicial: 60	2	40%	Rejilla
	Capas Superiores: 220	Capas Superiores: 50			

Fuente: Elaboración propia.

Figura 32.

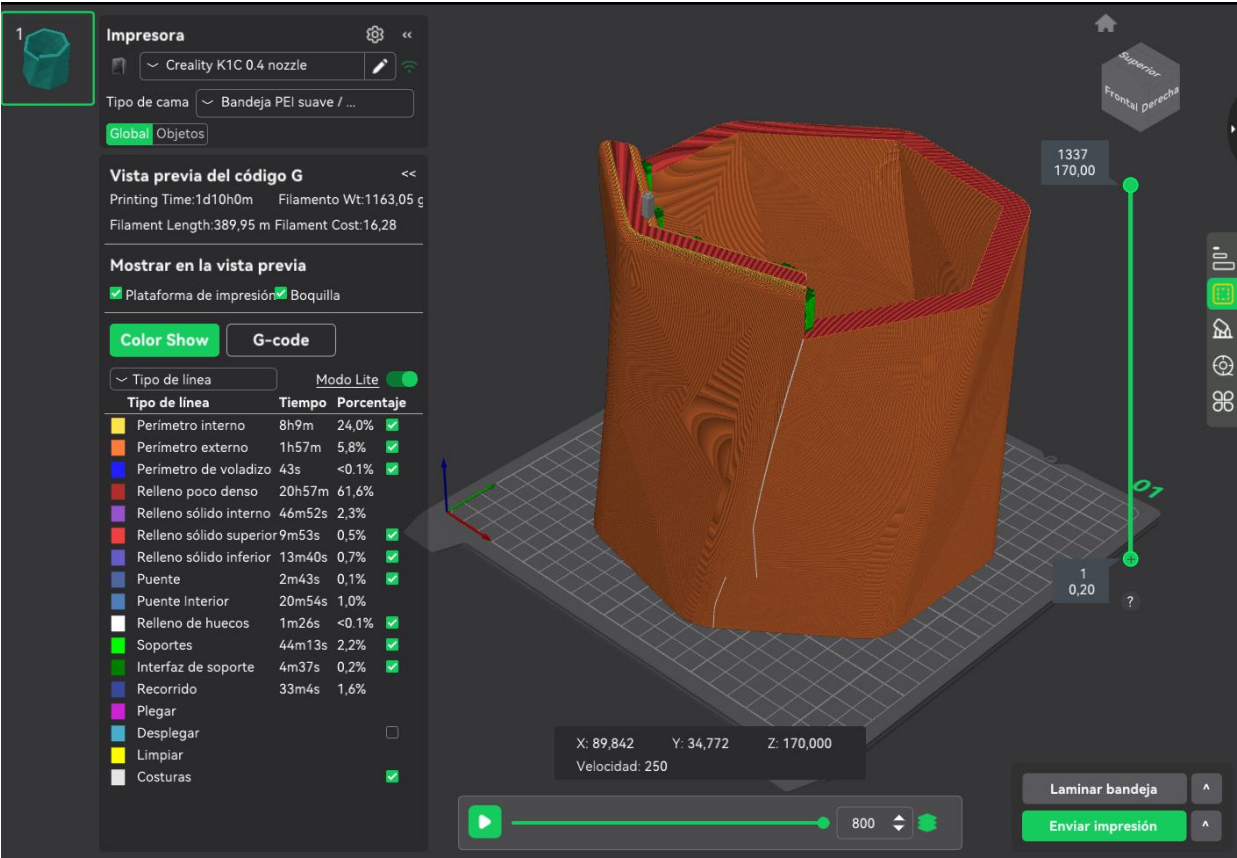
Previsualización para la impresión 3D de carcasas.



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Figura 33.

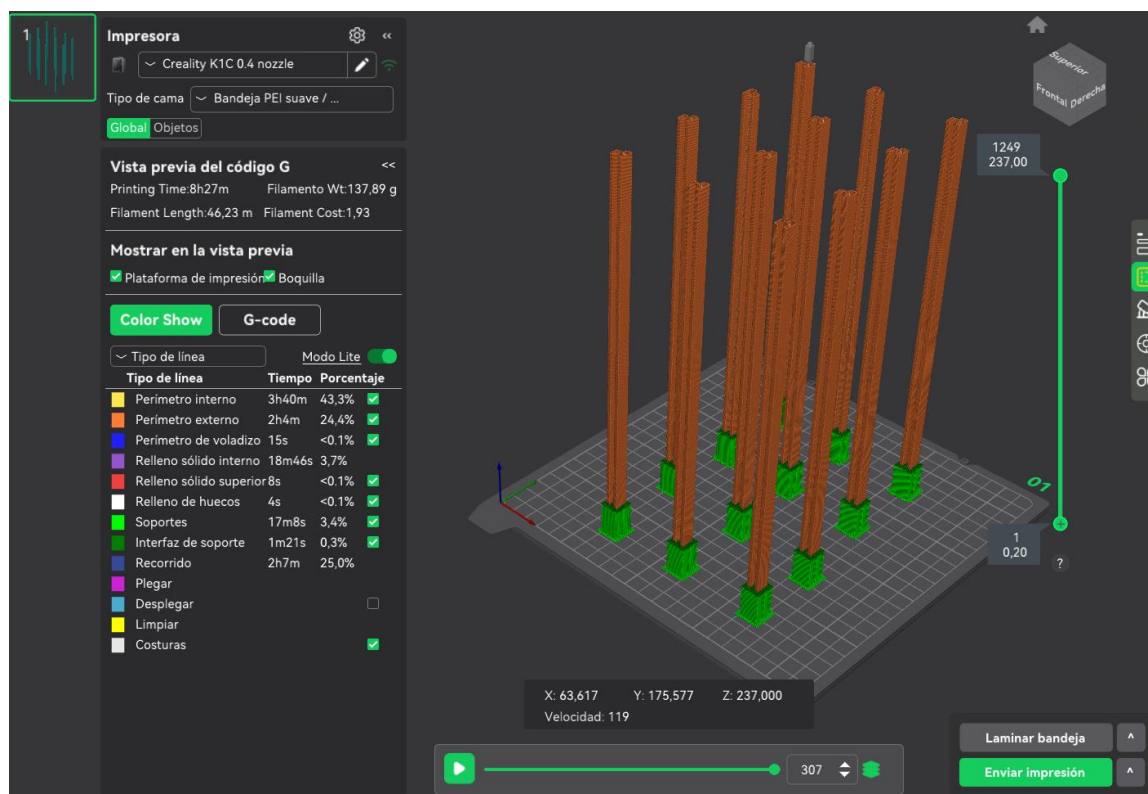
Previsualización de impresión 3D de macetas.



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Figura 34.

Previsualización de impresión 3D de soportes externos.



Fuente: Elaboración propia, 2025.

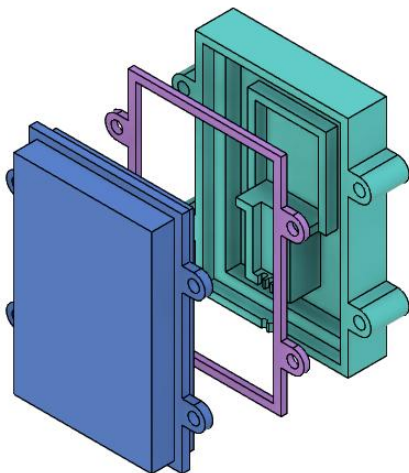
Nota. Se observa que el nombre del material es “Generic PLA-Silk” pero tiene los parámetros de impresión del material PP para imprimir correctamente las piezas.

Verificación de protección ante el agua y polvo.

En el apartado anterior se explicó las propiedades de los materiales a utilizar para la fabricación de las carcasas que contendrán el sistema electrónico, antes de realizar la impresión de todos los componentes se realizó un diseño para la contención de un sensor DTH-11, esto con la finalidad de respaldar que los parámetros de impresión 3D son los adecuados para la protección de los equipos y sensores.

Figura 35.

Diseño de la carcasa de prueba para comprobación de filtración de agua.



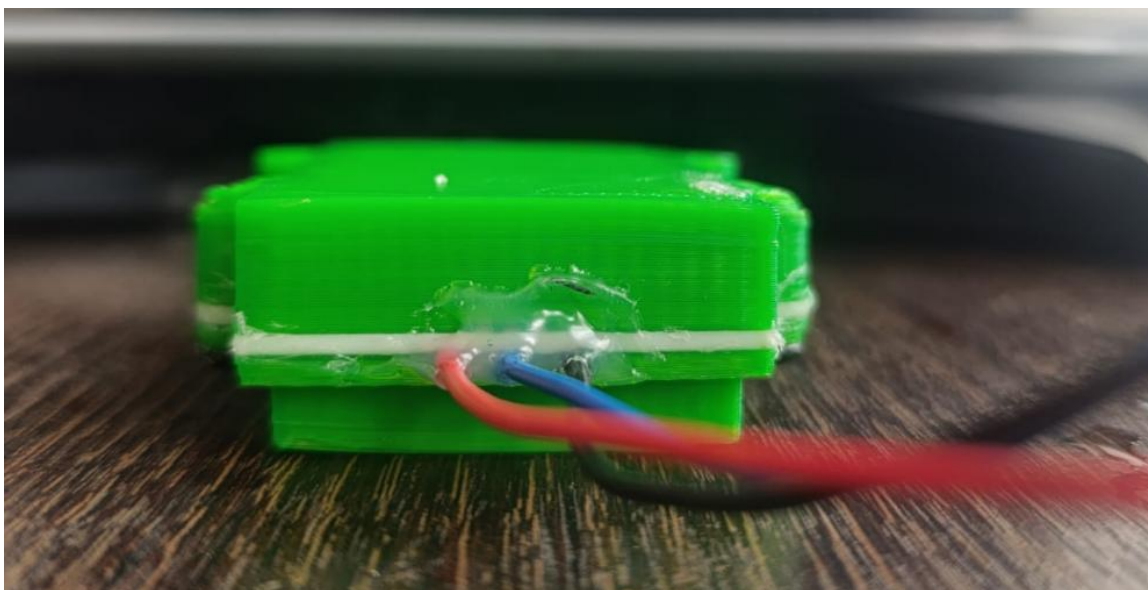
Fuente: Elaboración propia.

El principio de funcionamiento se basa en comprobar de que no existan fugas que permitan el ingreso de agua o humedad al interior de las carcasas que pueden afectar al rendimiento del módulo. Esta carcasa con el sensor incluido en su interior será sumergida en su totalidad dentro de un recipiente de agua y enviará la lectura de temperatura y humedad en periodos de 3s establecidos en la programación durante 30 segundos, si la humedad no presenta cambios significativos y se mantiene constante se comprueba que los parámetros son los correctos para contener a todo el sistema eléctrico y electrónico, caso contrario se analizara parámetros de impresión, diseño, materiales y proceso de sellado para cumplir con este aspecto tan importante. En el caso de la temperatura si presenta variación ya que el agua no tiende a estar en temperatura ambiente, por lo que este puede ser menor o mayor, pero se mantendrá estable durante el periodo establecido.

El proceso de impresión 3D y de las piezas resultantes se encuentran desde el Anexo hasta el Anexo en donde se observa como es el armado final de esta carcasa con la cual se realiza la prueba de recubrimiento. En este proceso solo se utilizó silicona líquida fría para sellar el lugar por donde salen los cables de alimentación y señal.

Figura 36.

Proceso de sellado con silicona fría en la sección de cableado.



Fuente: Elaboración propia.

Se realiza las pruebas de sellado y protección ante líquidos y polvo mediante el uso de la ESP32 para adquirir los datos en tiempo real y visualizarlos mediante la herramienta “Monitor Serial” de Arduino IDE, se sumergió al dispositivo durante 3 periodos de 30 segundos tal como se observa en la Figura 37. En donde se obtiene un total de 45 mediciones que nos permiten conocer si existen variaciones significativas de la temperatura y humedad. La temperatura ambiente inicial antes de iniciar el muestreo es de 21 °C y el porcentaje de humedad es de 51%

Figura 37.

Proceso de adquisición de temperatura y humedad con la carcasa sumergida en el agua.



Fuente: Elaboración propia.

En donde se obtuvieron los siguientes resultados, recopilados del sensor DHT-11 y la herramienta “*Monitor Serial*” de Arduino IDE, estos datos se muestran en la Tabla 8. Esta primera muestra mantiene el rango promedio de temperatura de 21.35 °C y rango promedio de humedad del 51.5%.

Tabla 8.

Primer muestreo de temperatura y humedad de la carcasa sumergida en agua.

Hora	Temperatura (°C)	Humedad (%)
11:32:33.888	20.60	52.70
11:32:36.914	20.90	52.70

11:32:39.928	21.00	52.20
11:32:42.901	21.10	52.00
11:32:45.939	21.20	51.40
11:32:48.947	21.30	51.20
11:32:51.916	21.30	51.10
11:32:54.961	21.40	50.80
11:32:57.970	21.50	50.70
11:33:00.939	21.60	50.90
11:33:03.978	21.60	50.80

Fuente: Elaboración Propia.

Se realiza por segunda vez el mismo proceso de adquisición de datos de la carcasa sumergida dentro del agua, esto para verificar si existe algún cambio notorio o filtración del líquido que pueda afectar a la lectura del sensor DHT-11, en este caso la temperatura promedio se mantiene en 23.55 °C y 55.3% de humedad. Los datos obtenidos se observan en la Tabla 9.

Tabla 9.

Segundo muestreo de temperatura y humedad de la carcasa sumergida en agua.

Hora	Temperatura (°C)	Humedad (%)
11:34:28.094	23.30	56.20
11:34:31.146	23.30	56.10
11:34:34.105	23.40	56.20

11:34:37.147	23.50	56.10
11:34:40.117	23.50	55.70
11:34:43.153	23.50	56.20
11:34:46.132	23.60	56.00
11:34:49.134	23.60	55.70
11:34:52.171	23.70	55.30
11:34:55.188	23.70	55.10
11:34:58.177	23.70	54.60
11:35:01.186	23.80	54.30

Fuente: Elaboración Propia.

Por último, se realiza por tercera vez este proceso para asegurar que no existe ningún tipo de filtración y las lecturas no presenten variaciones significativas, con la finalidad de asegurar la protección de los módulos y elementos eléctricos y electrónicos, en donde este se mantiene en el rango promedio de temperatura de 24.55 °C y 53.15% de humedad, los valores se registran estos datos en la Tabla 10.

Tabla 10.

Tercer muestreo de temperatura y humedad de la carcasa sumergida en agua.

Hora	Temperatura (°C)	Humedad (%)
11:36:00.130	24.40	53.10
11:36:03.135	24.40	53.40
11:36:06.147	24.40	53.30
11:36:09.189	24.50	53.20

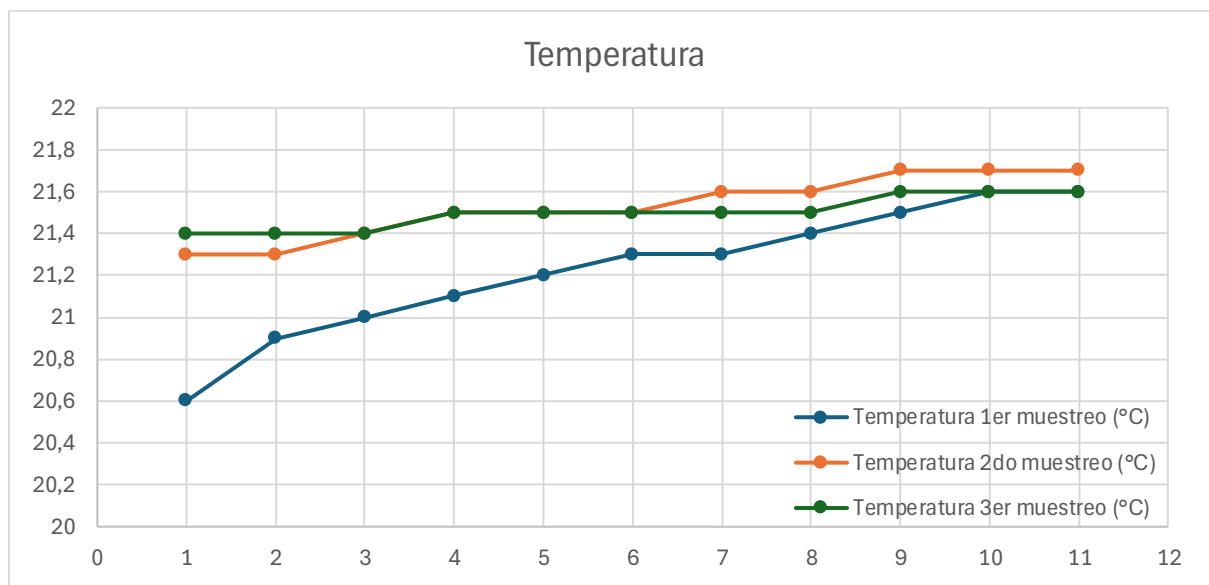
11:36:12.152	24.50	53.30
11:36:15.186	24.50	53.00
11:36:18.196	24.50	52.80
11:36:21.165	24.50	52.50
11:36:24.175	24.60	52.30
11:36:27.190	24.60	52.40
11:36:30.185	24.60	52.50
11:36:33.213	24.60	52.50

Fuente: Elaboración Propia.

Se puede observar en la Figura 38 como la variación de la temperatura es mínima, la cual se mantiene en un rango de 20 a 22 grados Celsius en los 3 casos, esto se debe a que este factor es dependiente del ambiente y del tiempo, por eso en el primer caso este tiende a subir 0.6 grados a comparación de los 2 casos que se mantienen estables. Con estos datos podemos afirmar que dentro de la carcasa la temperatura no tiende a variar y se mantiene estable a pesar de encontrarse en condiciones que afectan a su medición.

Figura 38.

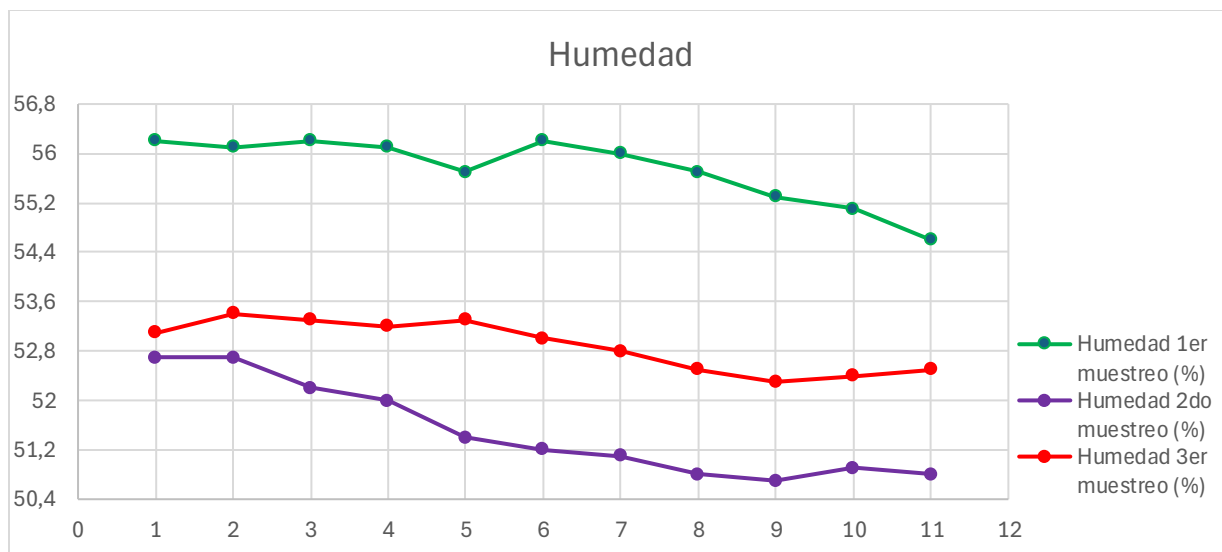
Grafica de temperatura de los 3 muestreos realizados de la carcasa sumergida en agua.



En la Figura 39 se obtiene en forma de grafica lineal las 3 mediciones de humedad realizadas con la carcasa sumergida en el agua, en donde se observa que cada muestra tiene diferente rango de porcentaje de humedad, pero esta tiende a ser estable en sus 3 casos o no presentan variaciones significativas que afecten a los dispositivos electrónicos. Esto sucede por el cambio de temperatura, ya que al existir elevación o disminución de esta la humedad también se ve afectada.

Figura 39.

Grafica de humedad de los 3 muestreos realizados de la carcasa sumergida en agua.



Nuevamente se realizó pruebas de medición de humedad y temperatura de la carcasa en la superficie, esto con la finalidad de analizar si existe alguna variación importante o cambio cuando este se encuentra dentro o fuera del agua, en donde la primera muestra se registra en la Tabla 11. Este mantiene el rango de temperatura promedio de 22,25 °C y rango promedio de humedad de 51,1%.

Tabla 11.

Primer muestreo en el exterior.

Hora	Temperatura (°C)	Humedad (%)
11:52:32.888	22,1	51,2
11:52:36.914	22,1	51

11:52:39.928	22,1	51,15
11:52:42.901	22,1	51,123
11:52:45.939	22,1	51,4
11:52:48.947	22	51,2
11:52:51.916	22,3	51,2
11:52:54.961	22,3	51,25
11:52:57.970	22,3	51,23
11:53:00.939	22,4	51,3
11:53:03.978	22,4	51,3

Fuente: Elaboración Propia.

De igual forma se realizan el mismo número de muestras y datos para realizar la comparativa correcta y conocer si existen cambios de temperatura y humedad al estar sumergida en el agua o en el exterior, en este caso el rango de temperatura se mantiene en el promedio 23.2 °C y el promedio de la humedad en 51.3%, los datos se registran en Tabla 12.

Tabla 12.

Segundo muestreo en el exterior.

Hora	Temperatura (°C)	Humedad (%)
11:54:28.094	23	51,3
11:54:31.146	23	51,3

11:54:34.105	23	51,3
11:54:37.147	23	51,3
11:54:40.117	23,1	51
11:54:43.153	23,1	51
11:54:46.132	23,1	51
11:54:49.134	23,25	51
11:54:52.171	23,25	51,1
11:54:55.188	23,25	51,1
11:54:58.177	23,25	51,1

Fuente: Elaboración Propia.

La última muestra realizada en el exterior mantiene la temperatura en el promedio de 22.15 °C y un leve aumento del porcentaje de humedad en el ambiente manteniendo el promedio de 53.2% de humedad en el exterior, en la Tabla 13 se visualiza los datos recolectados.

Tabla 13.

Tercer muestreo en el exterior.

Hora	Temperatura (°C)	Humedad (%)
11:56:00.130	22	53,21
11:56:03.135	22	53,2

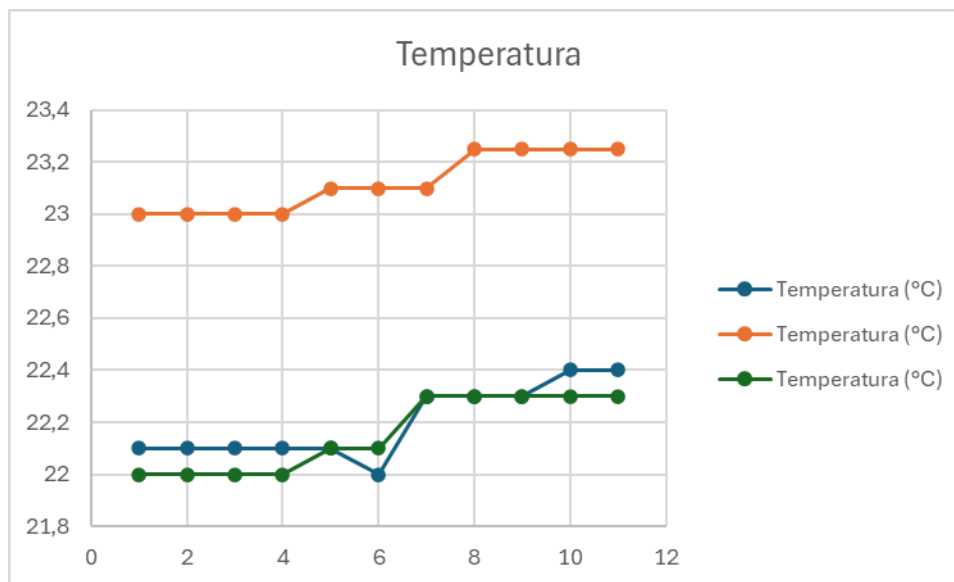
11:56:06.147	22	53,2
11:56:09.189	22	53,2
11:56:12.152	22,1	53,2
11:56:15.186	22,1	53,2
11:56:18.196	22,3	53,25
11:56:21.165	22,3	53,25
11:56:24.175	22,3	53,25
11:56:27.190	22,3	53,25
11:56:30.185	22,3	53,25

Fuente: Elaboración Propia.

Los cambios de temperatura en el exterior que se observan en la grafica lineal mostrada en la Figura 40, muestra que este parámetro se encuentra en un promedio de 22.66 °C.

Figura 40.

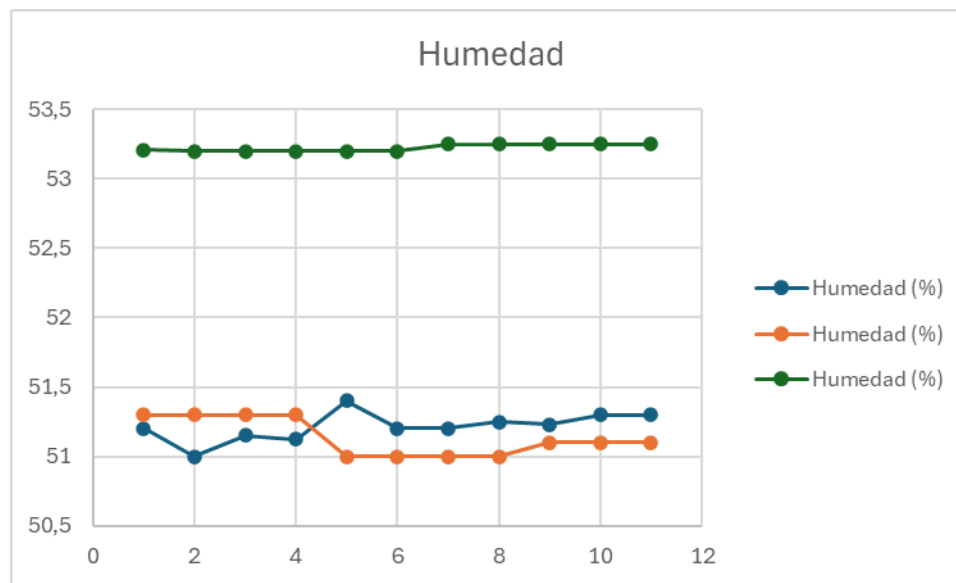
Variación de temperatura en el exterior.



En la Figura 41 podemos observar que el porcentaje de humedad en los 3 casos se encuentran dispersos, pero tienden a tener la estabilidad deseada dentro de la carcasa cuando se sumerge dentro del agua. En donde en el primer muestreo se tiene una elevación del 5% de humedad tomando en cuenta que se inició con 51% de humedad ambiente, el segundo muestreo tiende a tener un pico de bajada que puede significar que se encontraba en un punto de aclimatación y por último el tercer muestreo es que el que tiende a tener mayor estabilidad, gracias a estos datos definimos que la humedad ingresada tiende a ser mínima.

Figura 41.

Variación de humedad en el exterior.



En el caso de las muestras tomadas en el exterior la variación de los datos tiende a presentar similitudes con las muestras tomadas dentro del agua, por lo cual indica que la carcasa no tiende a tener variaciones en cualquiera de los dos casos, además no afecta al rendimiento ni lectura de los datos al momento que este ingresa a entornos completamente acuáticos o externos, pero como este terrario se mantiene en la superficie y con un ambiente controlado el ingreso de líquidos o partículas es nulo, siendo así que el diseño y los parámetros de impresión 3D son los adecuados para la construcción de las protecciones para el sistema eléctrico y electrónico.

Programación del control PID

Para el apartado del control, PID se utilizó los parámetros de cultivo previamente investigados con los cuales se establecerán rangos y valores de referencia para el control PID, en donde se implementó este uso en el apartado de la temperatura, donde se usaron

2 sensores de temperatura y humedad (DTH11), para realizar un promedio del valor de temperatura en el área, esto se puede observar en el Anexo 1 como se programó y estableció los valores de PID.

Para el caso de las variables restantes no fue necesario implementar un control PID, sino un control P, ya que estos no necesitaban una retroalimentación continua o ser un sistema de ciclo cerrado como el apartado de la temperatura, los parámetros a tomar en cuenta son la humedad del suelo y la luminosidad que son factores claves para el crecimiento. A continuación, se muestra los valores establecidos para cada proceso del cultivo de la planta:

Tabla 14.

Parametrización del SetPoint para las variables ambientales necesarias.

Etapas	Variable	SetPoint	Acción
Crecimiento	Temperatura	17°C (Todo el día)	- Encender sistema de refrigeración - Mantener activo el sistema de refrigeración hasta obtener exactitud en la temperatura deseada

	Humedad del suelo	85%	- Encender bombas de agua
	Luminosidad	600 – 700 lm	- Encender leds de espectro completo - Mantener dentro del rango adecuado
Floración	Temperatura	23 °C (Día) 18 °C (Noche)	- Encender sistema de refrigeración - Mantener activo el sistema de refrigeración hasta obtener exactitud en la temperatura deseada
	Humedad del suelo	85%	- Encender bombas de agua
	Luminosidad	600 – 700 lm	- Encender leds de espectro completo - Mantener dentro del rango adecuado
Fructificación	Temperatura	17°C (Todo el día)	- Encender sistema de refrigeración

			- Mantener activo el sistema de refrigeración hasta obtener exactitud en la temperatura deseada
	Humedad del suelo	85%	- Encender bombas de agua
	Luminosidad		- Encender leds de espectro completo - Mantener dentro del rango adecuado

Fuente: Elaboración Propia.

Implementación y montaje de los módulos.

Para el primer prototipo se realizó un módulo con acrílico, esto porque este permite visualizar el crecimiento de las plantas y corregir los posibles errores en el control de las variables agroclimáticas dentro del módulo, el proceso de construcción se puede observar en el Anexo 4, Anexo 5, Anexo 6, Anexo 7. En este apartado se puede observar en la Figura 42, el cómo se realizó la distribución de sensores y de las plantas dentro del mismo, a su vez la instalación del sistema de refrigeración que se necesita para el ambiente de crecimiento de los cultivos en el módulo. Una vez realizado la instalación y distribución del sistema de control se selló el módulo tipo terrario, ya que se creará un

tipo de microclima dentro del módulo, el cual es ideal para la evaluación de crecimiento de la planta.

Figura 42.

Sellado del módulo tipo terrario.



Consumo energético

Uno de los aspectos más importantes dentro de la fabricación del módulo es el consumo energético y el costo de este de los dispositivos que se utilizan para el funcionamiento eléctrico y electrónico del módulo terrarios, de esta forma se muestran

los valores de voltaje y amperaje para determinar el costo durante el tiempo de operación, en la Tabla 15.

Tabla 15.

Valores técnicos de los dispositivos electrónicos.

Dispositivo	Voltaje (V)	Amperaje (A)	Potencia (Watts)
Fuente de voltaje	12	10	120
Cargador de baterías LIPO	18	5	90
Fuente de voltaje	12	5	60

Para determinar el costo del consumo energético, primero se utiliza la Ecuación 3, este es para determinar la energía consumida en base al tiempo de funcionamiento, como el módulo se encuentra en uso durante las 24 horas del día sin interrupciones, es decir las dos fuentes de voltajes ya que alimentan a todo el sistema.

Ecuación 2.

Consumo energético.

$$E = \frac{P \times t}{100} (kWh)$$

Para el cálculo se toma el tiempo en meses, ya que en el Ecuador cada mes se realiza el cobro por este servicio, siendo el costo por kWh de 0.09 dólares. Así se obtiene

un total 720 horas de uso continuo, en el caso del cargador de batería LIPO se utiliza cada cierto tiempo ya que esta funciona durante 3 semanas de uso continuo y para la carga se utiliza el cargador durante 5 horas, en este caso serian alrededor de 5 horas mensuales.

Aplicando la Ecuación 2 para cada uno de estos se obtiene los siguientes resultados:

Fuente de voltaje 12V – 10 A:

$$E = \frac{120 \times 720}{1000} (kWh)$$

$$E = 86,4 (kWh)$$

Fuente de voltaje 12V – 5 A:

$$E = \frac{90 \times 720}{1000} (kWh)$$

$$E = 64,8 (kWh)$$

Cargador de baterías LIPO:

$$E = \frac{60 \times 5}{1000} (kWh)$$

$$E = 0.3 (kWh)$$

A partir de estos resultados se aplica la Ecuación 4 para determinar el costo total cuando está en funcionamiento el módulo.

Ecuación 3.

Costo por kWh.

$$\text{Costo} = E (\text{Total}) \times \text{Tarifa de costo}$$

Aplicando la Ecuación 4 del consumo total de los dispositivos.

$$\text{Costo} = (86.4 + 64.8 + 0.3) \times 0.09$$

$$\text{Costo} = 13.635$$

Se determina que aproximadamente el precio por mantener este tipo de modulo es de alrededor de 14 dólares, ya que este al ser presentando como un prototipo tiene la capacidad de albergar mayor número de plantas, sensores, actuadores y módulos de comunicación inalámbrica, esto debido que no se usó la capacidad máxima de estos últimos, lo cual permite la expansión y mejora continua a partir de la investigación realizada.

Resultados

Evaluación Final del modulo

Para la evaluación de resultados del módulo tipo terrario se toma a consideración el crecimiento de la planta dentro del mismo en el entorno controlado, con la finalidad de analizar el rendimiento en el entorno de la localidad de Limoncocha y si este se adaptó correctamente a este ambiente. En la Figura 44 se muestra el estado inicial de las plantas al llegar a la localidad y sin ser integrado dentro del módulo.

Figura 43.

Estado inicial de las plantas tomada el 16/06/2025.



Nota. En la sección de la Figura 43.a) se observa que se encuentra en proceso de floración con 2 flores en crecimiento y presentando 3 tallos, en la sección de la Figura 43.b) se observa que se encuentra en proceso de floración con 1 flor en crecimiento y 3 tallos y un tallo débil, en la sección de la Figura 43.c) se observa que la planta no presenta ninguna flor y con 2 tallos iniciales, por lo que se determina que se encuentre en proceso de crecimiento. Fuente: Elaboración propia, 2025.

A partir de la muestra observada en la Figura 43 se puede establecer la Tabla 16 de características de cada una de las plantas de frutilla.

Tabla 16.

Características iniciales de las plantas de frutilla.

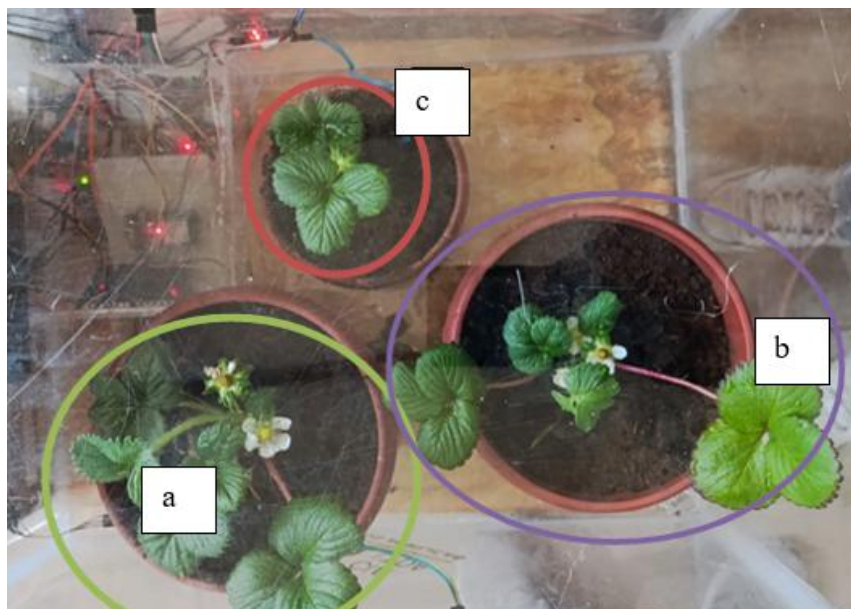
Planta	N. de tallos	N. de Flores	Pigmentación
a	3	2	Verde oscuro
b	3	1	Verde oscuro con presencia de pigmentación morada en sus bordes
c	2	0	Verde oscuro

Fuente: Elaboración propia, 2025.

A partir de esta caracterización, las plantas se colocaron dentro del módulo cerrado, implementando el ambiente controlado dentro del mismo para que la planta pueda crecer en las mejores condiciones. La última toma realizada el 02 de julio del 2025 para conocer el estado en la que se encontraban las plantas, mostraron los resultados observados en la Figura 44.

Figura 44.

Registro de las plantas tomada el 02-07-2025 implementadas dentro del módulo.



Nota. En la sección de la Figura 44.a) se observa que el numero de tallos se incrementó a 5 al igual que la maduración del fruto, en la sección de la Figura 44.b) se observa que el numero de tallos se incremento a 5 y la floración de 2 frutos más y la maduración del fruto anterior, en la sección de la Figura 44.c) se observa que se incremento el numero de tallos a 3 y entro a la etapa de floración con una flor en crecimiento. Fuente: Elaboración propia, 2025.

Figura 45.

Registro tomado el 02-07-2025 del estado de las plantas implementadas dentro del módulo.



Nota. Se muestra otro ángulo de la toma realizada de la sección c) de la Figura 44, en donde se observa a más detalle el crecimiento de la planta dentro del módulo. Fuente: Elaboración propia, 2025.

Con la observación de la Figura 44 y la Figura 45 se puede establecer la siguiente tabla de caracterización actual de las plantas con el módulo implementado y en funcionamiento.

Tabla 17.

Caracterización del crecimiento de las plantas con el módulo implementado.

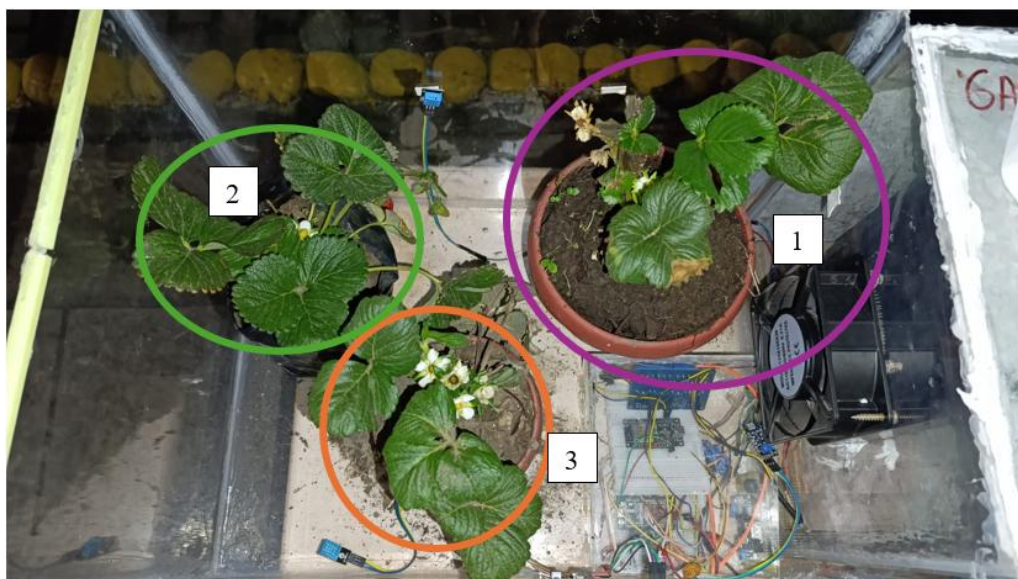
N. de planta	N. de tallos	N. de flores	Pigmentación
1	5	2	Verde oscuro con brotes de un color verdoso claro

2	5	3	Verde oscuro con brotes de un color verdoso claro Muestra pigmentación morada en las hojas
3	3	1	Verde oscuro con brotes de color verde claro

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Figura 46.

Registro tomado el 09-08-2025 del estado de las plantas implementadas dentro del módulo.



Fuente: Elaboración propia, 2025.

La Figura 46 fue la última toma del módulo y del estado de las plantas que se encontraban en el Reserva Biológica de Limoncocha, en donde se realiza la caracterización de cada planta en la Tabla 18.

Tabla 18.

Caracterización del crecimiento de las plantas con el módulo implementado.

N. de planta	N. de tallos	N. de flores	pigmentación
1	6	3	Verde oscuro con brotes de un color verdoso claro, tintes cafés en puntas de las hojas y parte del fruto
2	7	2	Verde oscuro con brotes de un color verdoso claro Muestra pigmentación morada en las hojas
3	5	6	Verde oscuro con brotes de color verde claro

Fuente: Elaboración Propia.

Realizada la caracterización de cada una de las plantas dentro del módulo en esta última visita se verifica el correcto funcionamiento de la adquisición de datos desde la localidad de Limoncocha y la posibilidad de control y visualización de datos desde un punto remoto mediante plataformas de almacenamiento de datos en la nube, en este caso la ciudad de Quito. Como se mencionó antes cada dato recopilado por los sensores de

humedad, temperatura, luminosidad, humedad del suelo y luminosidad, serán adquiridos a través del ESP32 y enviados a la plataforma Ubidots mediante el uso del módulo LoRa32 y guardado en la nube. Se estableció la lectura de los sensores cada 5 segundos, por lo que se adquirió una gran cantidad de datos que pueden ser analizados en graficas lineales para observar su comportamiento durante el tiempo que se encuentra el módulo activo. Para el apartado de la recolección de datos se recoge la muestra de 3 minutos de adquisición de datos por parte de la plataforma, este al momento de exportar los datos se obtienen en el formato .csv tal cual se observa en la Tabla 19.

Tabla 19.

Recopilación de datos de CO2.

timestamp,created_at_co2,context_co2,co2,date (America/Bogota)
1751388910735,1751388910735,{},460.0,2025-07-06 11:55:10.735000-05:00
1751388903047,1751388903047,{},462.0,2025-07-06 11:55:03.047000-05:00
1751388835952,1751388835952,{},462.0,2025-07-06 11:53:55.952000-05:00
1751388832220,1751388832220,{},463.0,2025-07-06 11:53:52.220000-05:00
1751388825797,1751388825797,{},463.0,2025-07-06 11:53:45.797000-05:00

Fuente: Elaboración Propia.

Se cambio el formato de presentación para las tablas de las variables agroclimáticas, con la finalidad de mantener ordenado y analizar los datos en el siguiente formato que se observa en la Tabla 20, el cual es el registro de medición de CO₂ presente dentro del módulo, esto mediante la utilización del sensor MQ135 para verificar que la calidad del aire sea la correcta para el crecimiento de las plantas.

Tabla 20.

Recopilación de valores de CO₂ en tiempo de 3 minutos.

Valor recolectado (ppm)	Hora (h/min/s/ms)	Fecha
460	11:55:15.22000	2025-07-06
462.0	11:55:10.735000	2025-07-06
462.0	11:55:03.047000	2025-07-06
463.0	11:53:55.952000	2025-07-06
463.0	11:53:52.220000	2025-07-06
463.0	11:53:45.797000	2025-07-06
463.0	11:53:40.793000	2025-07-06
463.0	11:53:35.742000	2025-07-06
463.0	11:53:30.639000	2025-07-06
463.0	11:53:25.586000	2025-07-06
463.0	11:53:20.487000	2025-07-06
463.0	11:53:15.438000	2025-07-06

463.0	11:53:10.428000	2025-07-06
463.0	11:53:05.378000	2025-07-06
463.0	11:53:00.277000	2025-07-06
463.0	11:52:55.273000	2025-07-06
463.0	11:52:45.122000	2025-07-06
463.0	11:52:40.773000	2025-07-06
463.0	11:52:36.718000	2025-07-06
459.0	11:52:29.912000	2025-07-06
463.0	11:52:24.907000	2025-07-06

Fuente: Elaboración Propia.

Los datos recopilados a partir del sensor de humedad del suelo FC-28 del cultivo de frutilla en la localidad de Limoncocha se observan en la Tabla 21, en donde este sensor se colocó dentro de la maceta de la primera planta para obtener un estimado de la humedad de las plantas restantes.

Tabla 21.

Recopilación de valores de humedad del suelo en tiempo de 3 minutos.

Valor recolectado (% de humedad)	Hora (h/min/s/ms)	Fecha
85	11:55:15.22000	2025-07-06
85	11:55:10.735000	2025-07-06
85	11:55:03.047000	2025-07-06

85	11:53:55.952000	2025-07-06
85	11:53:52.220000	2025-07-06
85	11:53:45.797000	2025-07-06
85	11:53:40.793000	2025-07-06
85	11:53:35.742000	2025-07-06
85	11:53:30.639000	2025-07-06
85	11:53:25.586000	2025-07-06
85	11:53:20.487000	2025-07-06
85	11:53:15.438000	2025-07-06
85	11:53:10.428000	2025-07-06
85	11:53:05.378000	2025-07-06
85	11:53:00.277000	2025-07-06
85	11:52:55.273000	2025-07-06
85	11:52:45.122000	2025-07-06
85	11:52:40.773000	2025-07-06
85	11:52:36.718000	2025-07-06
85	11:52:29.912000	2025-07-06
85	11:52:24.907000	2025-07-06

Fuente: Elaboración Propia.

Los datos de temperatura recolectados en el entorno cerrado del módulo de cultivo en la localidad de Limoncocha se obtuvieron con las mediciones del sensor DHT-

11, se registro 21 datos en el periodo de tiempo de 3 minutos, se registran los valores en la Tabla 22.

Tabla 22.

Recopilación de valores de temperatura ambiente en tiempo de 3 minutos.

Valor recolectado (°C)	Hora (h/min/s/ms)	Fecha
16.5	11:55:15.22000	2025-07-06
16.0	11:55:10.735000	2025-07-06
16.05	11:55:03.047000	2025-07-06
16.1	11:53:55.952000	2025-07-06
16.1	11:53:52.220000	2025-07-06
16.6	11:53:45.797000	2025-07-06
16.15	11:53:40.793000	2025-07-06
16.15	11:53:35.742000	2025-07-06
16.2	11:53:30.639000	2025-07-06
16.25	11:53:25.586000	2025-07-06
16.25	11:53:20.487000	2025-07-06
16.25	11:53:15.438000	2025-07-06
16.25	11:53:10.428000	2025-07-06
16.25	11:53:05.378000	2025-07-06
16.25	11:53:00.167000	2025-07-06

16.3	11:52:50.263000	2025-07-06
16.3	11:52:45.122000	2025-07-06
16.35	11:52:40.773000	2025-07-06
16.85	11:52:36.718000	2025-07-06
16.85	11:52:29.912000	2025-07-06
16.85	11:52:24.907000	2025-07-06

Fuente: Elaboración Propia.

Mediante el sensor BH1750 se mide el grado de luminosidad en la que se encontraba las plantas dentro el módulo, ya que este factor es importante para la etapa de floración y germinación de los frutos. Los valores registrados se observan en la Tabla 23.

Tabla 23.

Recopilación de valores de luminosidad en tiempo de 3 minutos.

Valor recolectado (lm)	Hora (h/min/s/ms)	Fecha
460.0	11:55:15.22000	2025-07-06
456.667	11:55:10.735000	2025-07-06
462.5	11:55:03.047000	2025-07-06
458.33	11:53:55.952000	2025-07-06
455.833	11:53:52.220000	2025-07-06
454.167	11:53:45.797000	2025-07-06
452.5	11:53:40.793000	2025-07-06

450.833	11:53:35.742000	2025-07-06
450.0	11:53:30.639000	2025-07-06
449.167	11:53:25.586000	2025-07-06
447.5	11:53:20.487000	2025-07-06
446.667	11:53:15.438000	2025-07-06
445.833	11:53:10.428000	2025-07-06
445.833	11:53:05.378000	2025-07-06
445.833	11:53:00.167000	2025-07-06
445.833	11:52:50.263000	2025-07-06
446.667	11:52:45.122000	2025-07-06
446.667	11:52:40.773000	2025-07-06
445.833	11:52:36.718000	2025-07-06
445.0	11:52:29.912000	2025-07-06
445.0	11:52:24.907000	2025-07-06

Fuente: Elaboración Propia.

El sensor DHT-11 tiene la capacidad de medir el porcentaje de humedad del ambiente, por lo que el mismo sensor registra los valores que se observan en la Tabla 24, lo que asegura lecturas adecuadas para la investigación.

Tabla 24.

Recopilación de valores de la humedad del entorno en tiempo de 3 minutos.

Valor recolectado (%)	Hora (h/min/s/ms)	Fecha
80.45	11:55:15.22000	2025-07-06
80.05	11:55:10.735000	2025-07-06
80.05	11:55:03.047000	2025-07-06
80.75	11:53:55.952000	2025-07-06
80.8	11:53:52.220000	2025-07-06
80.75	11:53:45.797000	2025-07-06
80.75	11:53:40.793000	2025-07-06
80.754	11:53:35.742000	2025-07-06
80.75	11:53:30.639000	2025-07-06
80.7	11:53:25.586000	2025-07-06
80.65	11:53:20.487000	2025-07-06
80.7	11:53:15.438000	2025-07-06
80.75	11:53:10.428000	2025-07-06
80.25	11:53:05.378000	2025-07-06
80.75	11:53:00.167000	2025-07-06
80.25	11:52:50.263000	2025-07-06
80.25	11:52:45.122000	2025-07-06

80.2	11:52:40.773000	2025-07-06
80.7	11:52:36.718000	2025-07-06
80.2	11:52:29.912000	2025-07-06
80.2	11:52:24.907000	2025-07-06

Fuente: Elaboración Propia.

Para corroborar que el número de datos recolectados es el correcto o es necesario obtener más datos para realizar el análisis final, se realiza con la Ecuación 4. Cabe recalcar que la muestra es de un periodo de 3 minutos, donde se obtiene 21 datos de temperatura.

Ecuación 4.

Ecuación para determinar si la muestra es correcta.

$$N = \left(\frac{40 \times \sqrt{n \cdot \sum X^2 - (\sum X)^2}}{\sum x} \right)^2$$

Adicionalmente para aplicar esta fórmula es necesario utilizar el método estadístico de dispersión de datos, con esto podemos conocer si los datos son adecuados para establecer una respuesta final o si se encuentran dentro del rango o punto establecido.

El registro de los valores de temperatura una vez aplicado el sistema de control de temperatura PID en el periodo de 3 minutos se visualiza en la Tabla 25, en donde se aplica métodos estadísticos de dispersión de datos para determinar el promedio de temperatura se mantiene dentro del módulo y el error de estabilización que presenta el PID, esto a partir de límites superiores e inferiores.

Tabla 25.

Tabla de medidas de dispersión de datos de temperatura implementado el PID.

Tiempo	Temperatura	Media	lim sup +2	lim inf -2
1	16,85	16,32619	16,82915	15,82323
2	16,85	16,32619	16,82915	15,82323
3	16,85	16,32619	16,82915	15,82323
4	16,35	16,32619	16,82915	15,82323
5	16,3	16,32619	16,82915	15,82323
6	16,3	16,32619	16,82915	15,82323
7	16,25	16,32619	16,82915	15,82323
8	16,25	16,32619	16,82915	15,82323
9	16,25	16,32619	16,82915	15,82323
10	16,25	16,32619	16,82915	15,82323
11	16,25	16,32619	16,82915	15,82323
12	16,25	16,32619	16,82915	15,82323
13	16,2	16,32619	16,82915	15,82323
14	16,15	16,32619	16,82915	15,82323
15	16,15	16,32619	16,82915	15,82323
16	16,6	16,32619	16,82915	15,82323
17	16,1	16,32619	16,82915	15,82323

18	16,1	16,32619	16,82915	15,82323
19	16,05	16,32619	16,82915	15,82323
20	16	16,32619	16,82915	15,82323
21	16,5	16,32619	16,82915	15,82323

Nota. Se establece el valor de ± 2 en cada limite correspondiente esto porque al ser una muestra con un rango de temperatura pequeña, no es necesario establecer valores altos.

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Tabla 26.

Medidas de tendencia central.

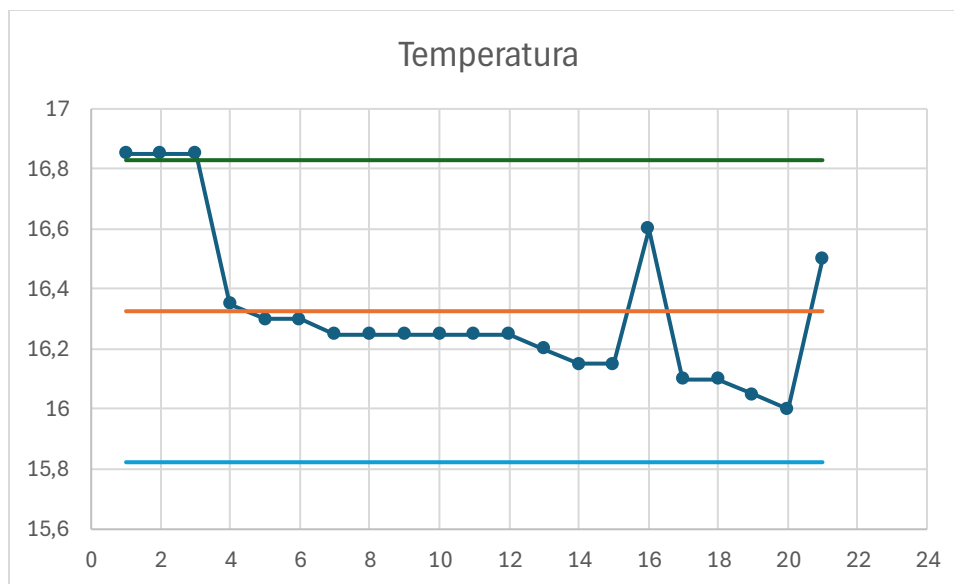
	X	X²
Promedio	16,32619	266,6077381
Desviación Estándar	0,251481	8,280284455
Varianza	0,063243	68,56311066

Fuente: Elaboración Propia.

En la Tabla 26 se determina que la desviación estándar es de 0.25 C, lo cual quiere que decir que los cambios presentes en el control de temperatura no superan este valor, determinando un PID estable y seguro para el crecimiento de las frutillas.

Figura 47.

Grafica de dispersión de datos de temperatura.



Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 47 se puede analizar de manera más adecuada como es la variación de la temperatura en función del tiempo, en donde se observa que los valores se encuentran dentro del rango de 16 a 17 C, mostrando puntos de estabilización y control. Se determina que los valores son exactos, pero no precisos, ya que presenta ruidos de temperatura mínimos, pero tiende a estabilizarse para estar dentro del rango adecuado.

Retomando si la muestra es adecuada aplicamos la Ecuación 4:

$$N = \left(\frac{40 \times \sqrt{21 \times 5598.7625 - (342.85)^2}}{342.85} \right)^2$$

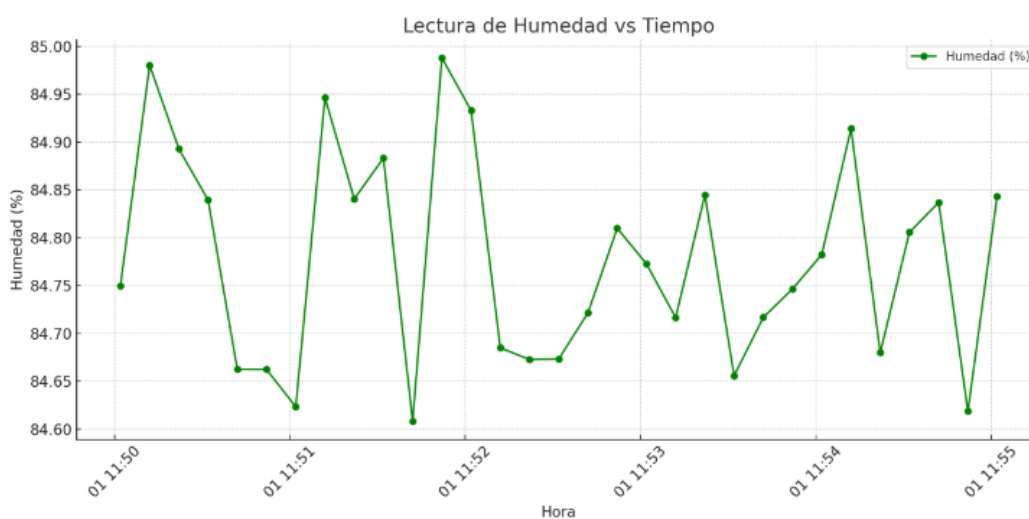
$$N = 0.37$$

Al obtener un valor relativamente bajo quiere decir que no necesitábamos mas de 21 datos para determinar si la estabilización de temperatura es correcta, por lo tanto, la muestra tomada es la adecuada, aunque un poco grande.

Una vez realizada la verificación de muestra de los valores agroclimáticos de cada uno de los sensores para observar el comportamiento y mostrarlos en graficas lineales, se generó mediante herramientas de generación de graficas en Python el cual mediante la función “*Matplotlib*” nos permite generar graficas con los archivos .csv generados por la plataforma Ubidots. En la Figura 48 se visualiza la variación de la humedad dentro del módulo, el cual se mantiene en el promedio de 84.87%, en donde se toma en cuenta la humedad del entorno en donde se encontraba la humedad se mantiene estable y adecuada para el crecimiento de las plantas.

Figura 48.

Grafica Humedad vs Tiempo.

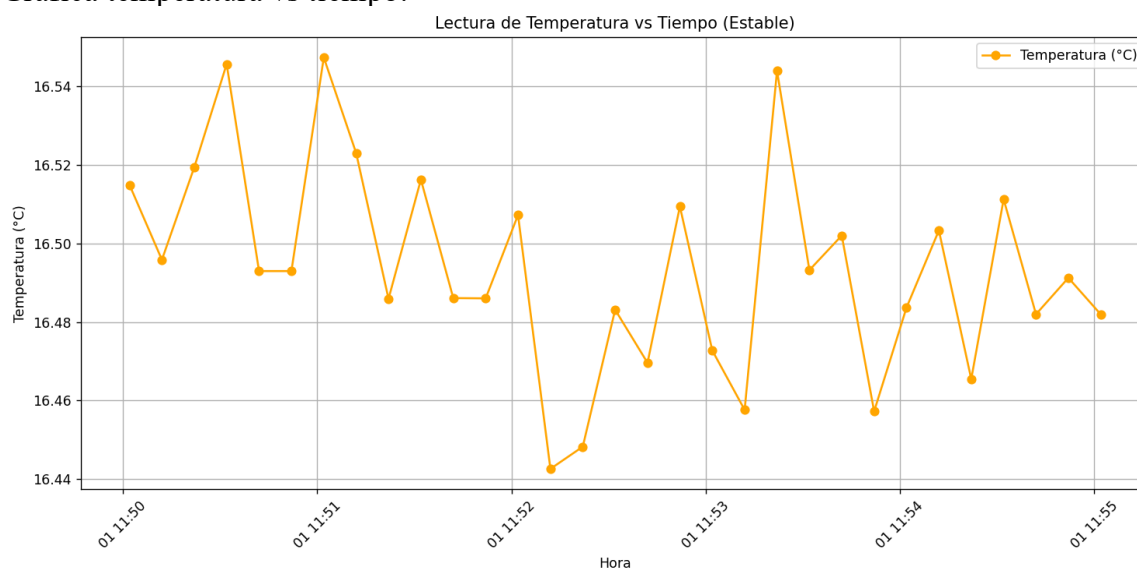


Fuente: Elaboración Propia.

Aplicado el PID para el control de temperatura en un entorno cerrado se obtiene la grafica lineal mostrada en la Figura 49, en donde se determina que la temperatura se mantiene dentro del rango adecuado de crecimiento, ya que mantiene un promedio de 16.48 °C, mostrando leves variaciones, pero estables para la etapa de crecimiento de la planta, la cual se encontraba en su etapa de floración y debía mantenerse entre rango inicial de 15 °C a 23 °C.

Figura 49.

Grafica temperatura vs tiempo.

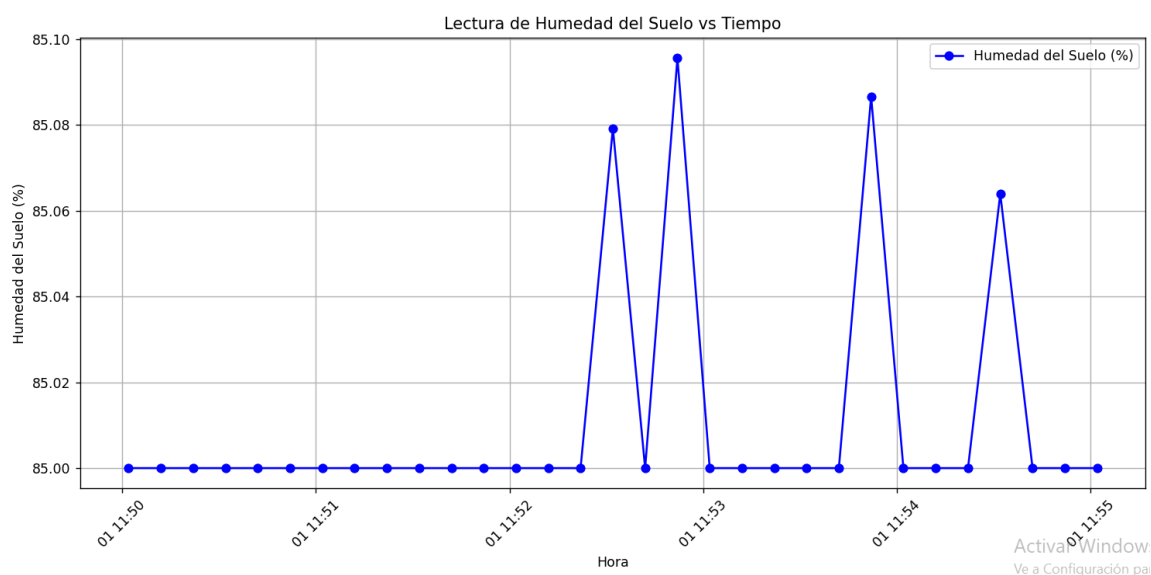


Fuente: Elaboración Propia.

La Figura 50 se muestra la grafica lineal de los datos recopilados de humedad del suelo, tal como se observa este debe mantenerse estable y solo presentar cambios cuando se active el riego automatico, por lo que su promedio es de 85.04%. Esto indica que la tierra se mantiene la cantidad de agua adecuada.

Figura 50.

Grafica humedad del suelo vs tiempo.

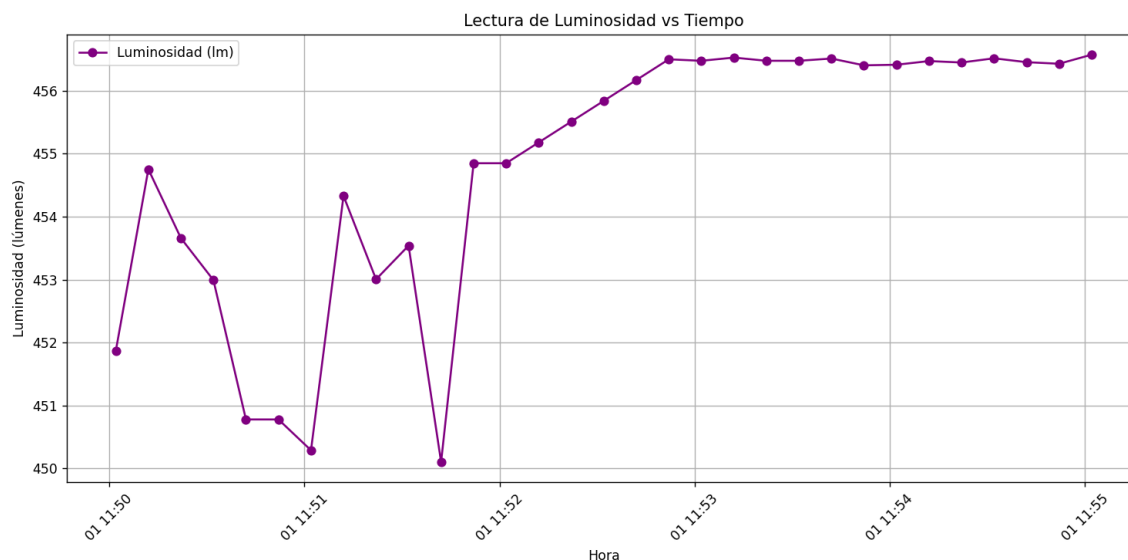


Fuente: Elaboración Propia.

El grado de luminosidad varia en dependencia del dia y factores externos por lo que las lecturas que se obtienen son irregulares. Al depender de la posicion del sol durante el dia y el espacio en donde se encontraba situado el modulo dentro de la reserva este mantiene un grado de luminosidad promedio de 453.5 lumens en ese periodo de tiempo, estos cambios se observan en la Figura 51.

Figura 51.

Grafica luminosidad vs tiempo.

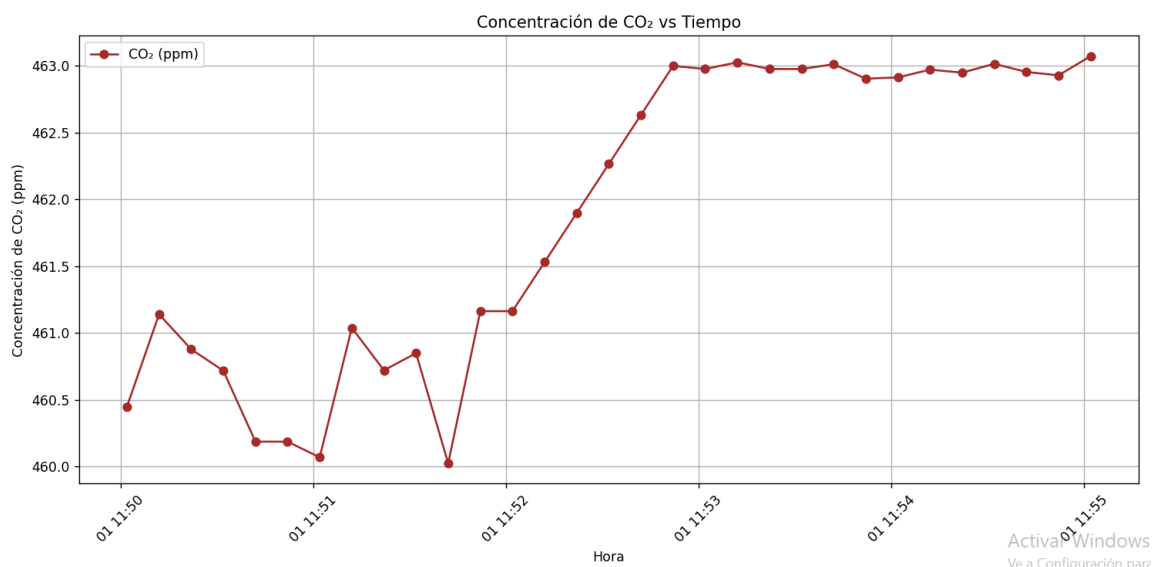


Fuente: Elaboración Propia.

En el caso de las mediciones del CO₂ igual depende de la calidad del aire de la localidad en donde se encuentra el modulo, en este caso al estar situada en la localidad de Limoncocha este tiende a tener un promedio 461.9 ppm, el cual es considerado aire fresco y apto para seres vivos en un entorno cerrado. La recolección y variación de los datos se muestran en la grafica 52.

Figura 52.

Grafica CO₂ vs tiempo.

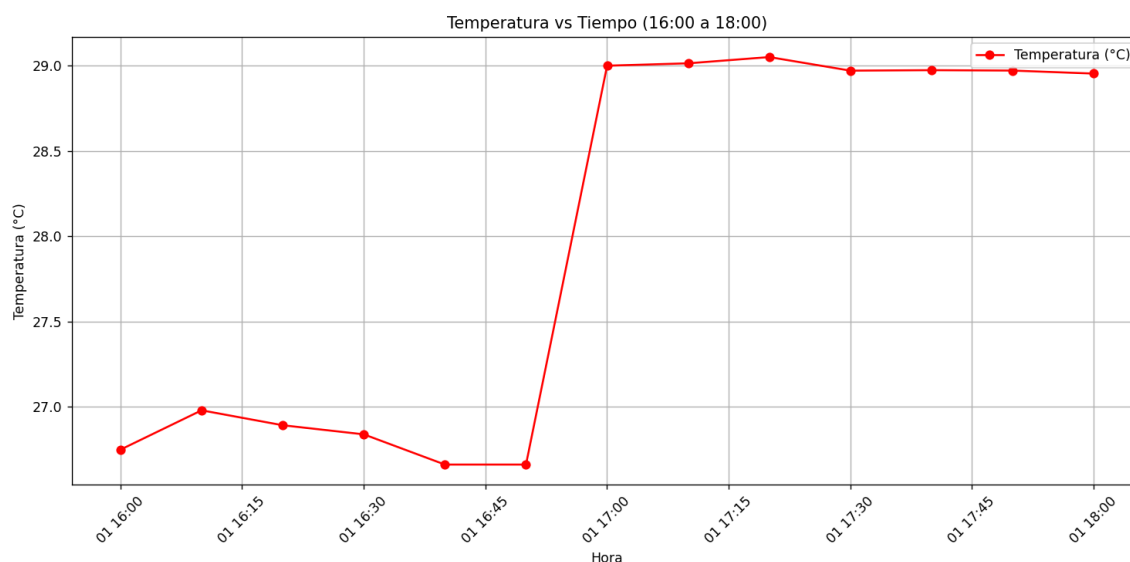


Fuente: Elaboración Propia.

En el caso del PID se hace una comparativa de la temperatura inicial vs la temperatura final con la estabilización del PID de temperatura, como el cultivo se encuentra en etapa de floración el rango de temperatura es amplio desde 15° a 23° C se estableció un setpoint de 17°C para mantener una temperatura ideal dentro del módulo y los cultivos puedan crecer en condiciones ideales, en la Figura 53 son los datos recopilados de temperatura sin implementar el PID de estabilización de temperatura.

Figura 53.

Temperatura inicial.

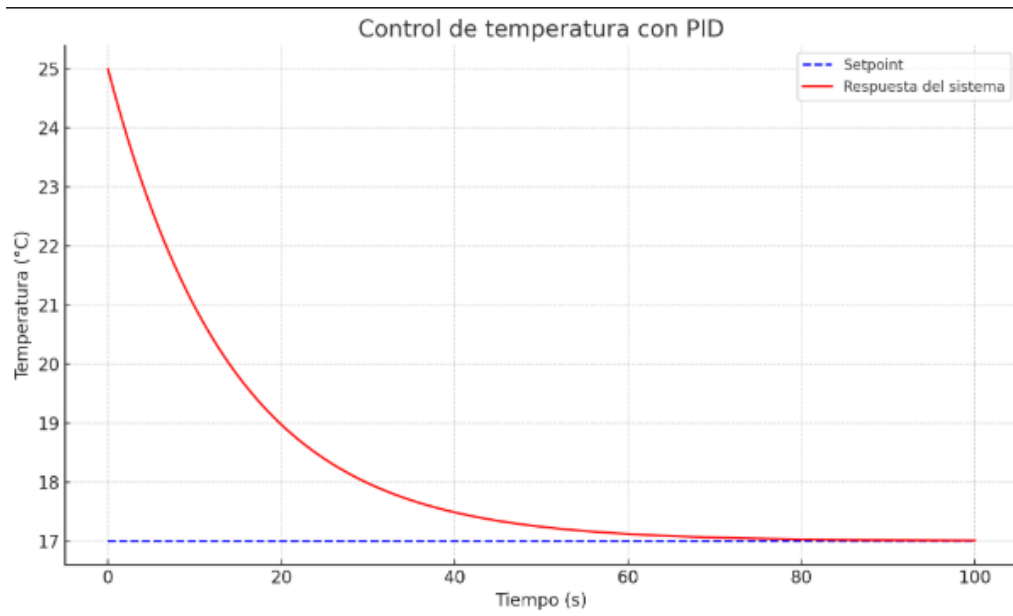


Fuente: Elaboración Propia.

Implementado el PID de estabilización de temperatura con los valores de SetPoint establecidos en la Tabla 3, se establece la estabilización de temperatura en 1 minuto en todo el interior del módulo, considerado un valor aceptable tomando en cuenta que el entorno donde se estableció el modulo es de clima cálido. En la Figura 54 se observa como es el comportamiento del PID en función del tiempo, el cual no presento errores ni cambios repentinos.

Figura 54.

Estabilización del PID de temperatura.



Fuente: Elaboración Propia.

Para determinar cuál es el error de temperatura se utiliza la Ecuación 5 que toma como referencia el SetPoint, el valor deseado y medido:

Ecuación 5.

Error absoluto medio.

$$e(t) = \text{Temperatura de referencia} - \text{temperatura medida media}$$

Aplicando la formula:

$$e(t) = 17 - 16.33$$

$$e(t) = 0.67$$

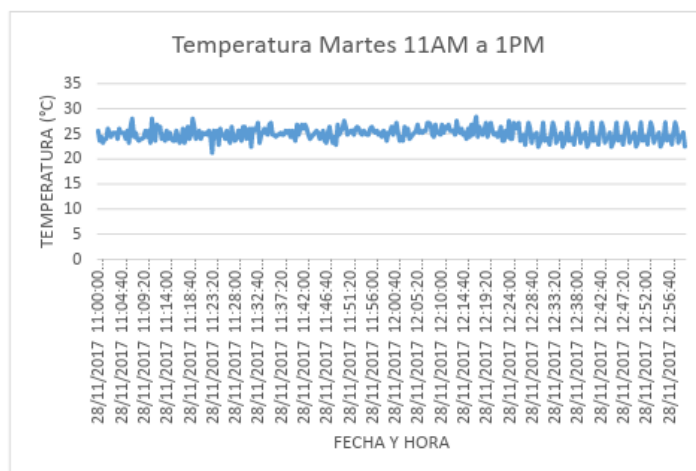
Siendo el error absoluto de 0.67°C lo que evidencia que el valor de referencia y el resultado del error absoluto medio mantiene buena estabilidad del sistema de control.

Discusión de Resultados

Los resultados de este proyecto ponen de manifiesto el importante potencial de las tecnologías IoT para optimizar la eficiencia y la adaptabilidad en la agricultura de precisión, este siendo una base para la adaptación de este tipo de módulos para el crecimiento de plantas en todo tipo de entornos. En esta investigación el control de temperatura de mantuvo dentro del rango de 16 a 17°C , siendo el SetPoint establecido de 17°C , presentando variaciones de 0.25, permitiendo una correcta estabilización, por otro lado, Morantes (2020) en su investigación de control PID de temperatura su variación de temperatura no es estable y según su graficas su control tiende a tener ruido y poca sintonización, siendo su variación de ± 1.2 , esta puede ser observada en la Figura 55.

Figura 55.

Registro control PID.



Fuente: (Morantes J., 2020)

El sistema implementado consiguió mantener las variables agroclimáticas, las cuales son: temperatura, humedad del suelo, luminosidad y CO₂ dentro de los márgenes adecuados para el cultivo de fresa, gracias al uso de sensores inteligentes y un controlador PID. Esto concuerda con lo que comunicaron Quiroz-Valdez et al. (2024), que demostraron que la integración de microcontroladores ESP32 y el protocolo LoRaWAN permitió a los agricultores mexicanos disminuir hasta un 25% el uso de fertilizantes, aunque también resaltaron el reto de adaptar los dispositivos a entornos húmedos, un desafío que esta investigación pudo superar con resultados positivos. Esta capacidad distintiva, también mencionada por Astudillo (2024), destaca la robustez de los sistemas basados en la arquitectura IoT, resistentes al ruido y a la variabilidad ambiental. Siendo esta investigación mas adecuada para el uso de agricultura.

Asimismo, el desarrollo de un sistema modular y replicable da respuesta a la creciente necesidad de soluciones escalables, tal y como destacaron More et al. (2025), que observaron que la agricultura robotizada e IoT puede reducir hasta en un 30% el consumo de agua en cultivos intensivos, si bien se enfrentan al reto del elevado coste y la dependencia de la infraestructura urbana. Nuestra propuesta, centrada en la Amazonía ecuatoriana y que utiliza tecnologías de bajo coste y bajo consumo, como ESP32 y LoRa, brinda una alternativa accesible y adaptable para contextos con conectividad limitada, siendo en este caso el costo de operación de 13.4 dólares y un consumo por debajo del 30% del consumo máximo de los dispositivos, Alvarado (2024) establece mediante investigaciones que el consumo de dispositivos electrónicos en la agricultura de precisión

está en el rango de operación de 20A representando mayor costo de operación para el usuario.

La recopilación de datos en tiempo real, que se guardan en la nube a través de la plataforma Ubidots, simplificó la supervisión continua del microentorno agrícola y sentó las bases para implementar analítica avanzada y técnicas de inteligencia artificial, como sugieren Sánchez et al. (2024) sobre el potencial de los sistemas IoT para la toma de decisiones autónomas en tiempo real. En cuanto al funcionamiento autónomo, tanto esta tesis como otros estudios recientes abogan por la incorporación de sistemas energéticos autosostenibles, como paneles solares, para garantizar la fiabilidad a largo plazo en entornos remotos. Esto reduciría la necesidad de intervención humana, una idea propuesta por García y López (2023).

Conclusiones

La investigación realizada para la parametrización de cada etapa de crecimiento de las frutillas fue la adecuada para establecer los valores en el sistema de control PID, siendo registrados valores de temperatura, humedad, luminosidad, CO₂. La etapa más importante es el florecimiento de la frutilla, por lo que los parámetros más importantes es la temperatura la cual se estableció el valor de referencia de 17 °C y la humedad de 60% para el adecuado crecimiento de la planta.

El diseño del sistema electrónico y eléctrico mediante el uso del software Proteus permitió validar el correcto funcionamiento de la arquitectura diseñada, ya que por medio de las herramientas de simulación garantizo la correcta interacción entre las principales fuentes de alimentación, actuadores y sensores utilizados, evitando sobrecargas dentro el

módulo. Durante la implementación se proporcionó que el consumo energético total del sistema se mantuviera por debajo del 70%, que reduce el riesgo de sobrecalentamiento y fallas por saturación de dispositivos. En el aspecto del consumo de la batería se comprobó que la corriente demandada por el sistema es de 0.5 mA, lo cual se mantiene un 30% por debajo de su capacidad nominal que asegura su vida útil y el uso de 13 días en continuo uso.

La base de datos y la interfaz gráfica desarrolladas en la plataforma Ubidots permitió el almacenamiento y visualización adecuada de los datos ambientales en tiempo real, ya que esta arquitectura realizada en base a los protocolos MQTT el tiempo de adquisición de datos por parte del ESP32 hacia el módulo Heltec LoRa32 presento una variación de ± 0.3 ms en intervalos de 3s, lo que representa un retraso mínimo en el registro en la plataforma, obtenido 1200 registros por hora. La exportación de estos datos en .csv garantizo una base robusta para su caracterización y validación del sistema mediante análisis estadístico. Por lo tanto, se concluye que la plataforma Ubidots es un medio confiable para la toma de decisiones en tiempo real y desde un punto remoto siendo el módulo implementado en Limoncocha y monitoreado desde Quito.

La aplicación y uso de la manufactura aditiva para la fabricación de los soportes y carcasas de protección de los sistemas electrónicos y eléctricos mediante impresión 3D fue acertada, esto fue comprobado mediante las pruebas realizadas de la carcasa, en donde las muestras tomadas sumergidas en agua la temperatura se mantuvo un rango promedio de temperatura de 22.7 °C y la humedad manteniendo en el rango promedio de 53.12% , en el caso de las muestras en el exterior el rango de temperatura se mantiene en

el rango promedio 23.12 °C y la humedad se mantiene en el rango promedio de 52.78%, en donde se analiza que la variación es de ± 0.28 , validando los diseños y parámetros de impresión que cumplen con las normativas de IP67.

El control PID implementado para el ajuste de temperatura es adecuado para el crecimiento de la frutilla, ya que al analizar la muestra mediante métodos estadísticos presenta una desviación estándar de 0.25 °C y varianza de 0.06 °C con respecto a la temperatura seteada, en el caso del error absoluto medio es de 0.67 °C, lo cual es aceptable ya que mantiene la temperatura con bastante precisión y con el menor ruido térmico posible, obteniendo una sintonización del PID bastante estable y con la posibilidad de ser adaptado a nuevos sistemas de control de temperatura. El rango de temperatura de operación registrado fue de 16 a 17 C, obteniendo la estabilización aproximada en 350 ms, que determina que la sintonización y corrección de erros es adecuada para aplicaciones de control ambiental.

Finalmente se comprobó y se evaluó de manera exitosa la adaptación del módulo tipo terrario en la localidad de Limoncocha, obteniendo como resultado el crecimiento adecuado y seguro de las frutillas en un entorno controlado, obteniendo en su implementación en Limoncocha la floración de 10 tallos, el crecimiento de 2 tallos en cada una de las plantas y el total de 14 frutillas en buenas condiciones. El monitoreo en tiempo real, riego automatizado, control de temperatura correcto, propuso la base para la adaptación de módulos tipo terrarios con ambiente controlado en nuevos entornos, diversos tipos de plantas, a bajo costo y con dispositivos que son accesibles a todo tipo de usuario, garantizando el éxito de funcionamiento y crecimiento.

Recomendaciones

Entre las recomendaciones más importantes es mejorar el sistema de enfriamiento/calefacción, ya que este debe ser robusto y controlable para crear el ambiente perfecto para el crecimiento de los cultivos, en este caso se puede reemplazar por actuadores de alta gama o integrar sistemas de calefacción/condensadores similares al de los aires acondicionados, además de mejorar el sistema de alimentación de este.

En cuanto al sistema de alimentación del sistema se sugiere la implementación de un sistema autosustentable como sería el caso de uso de paneles solares o energías limpias que permitan adaptarse al ambiente en el que se encuentre y no sufra problemas de alimentación y conexión ya que este sistema debe funcionar sin la intervención humana, por lo que este añadido permite que el usuario no tenga la necesidad de intervenir en el crecimiento. Además, para el sistema de alimentación interna, se propone la mejora de este, mediante el diseño o creación de módulos, PCB, o dispositivos en donde solo sea necesario utilizar únicamente una entrada de voltaje y este alimente a todo el sistema sin la necesidad de conectar por separado cada parte del módulo.

En el apartado de adquisición y visualización de datos, se recomienda contar con la cuenta PRO de Ubidots ya que esta permite la creación de varios dispositivos y variables, así mismo de no tener un número limitado de datos recopilados por días, ya que esto limita el análisis de funcionamiento del sistema, ya que este debe estar funcionando 24/7.

Por último, para el apartado de construcción del módulo se recomienda seleccionar materiales amigables con el ambiente, esto con el objetivo de crear módulos

que sean seguros para cada entorno al que se introduzca, además de crear bases para la aplicación de ingeniería circular, mediante análisis de nuevos materiales o elementos.

Lista de referencias

1. Gallegos Zurita, D. E., Rodriguez Castillo, K. B., & Ortiz Mosquera, N. S. (2023). Digitalización en el riego 4.0 y la captación de variables climáticas con dispositivos IOT, para optimizar la producción de maíz en un sector de Manabí. *Análisis del comportamiento de las líneas de crédito a través de la corporación financiera nacional y su aporte al desarrollo de las PYMES en Guayaquil 2011-2015*, 7(2), 219–228.
[https://doi.org/10.26820/reciamuc/7.\(2\).abril.2023.219-228](https://doi.org/10.26820/reciamuc/7.(2).abril.2023.219-228)
2. Gutiérrez-Flores, H., Kau-Pérez, J. A., De Alba-Romenus, K., & Sandoval - Rangel, A. (2022). Diseño e implementación de un sistema de control automático de irrigación y fertilización para invernaderos bajo el paradigma de la Agricultura 4.0. *Revista Agraria, SEI*, 11.
<https://doi.org/10.59741/agraria.v19ise1.6>
3. Jairo Eduardo Márquez Díaz Arles Prieto Moreno Martha Andrea Manrique Castro. (2024 12). <https://doi.org/10.37815/rte.v36n2.1227>
4. N. S. Abu Wan Mohd Bukhari Bin Wan Daud C. H. Ong A.M. Kassim Tiffany Azhar Izzuddin M. N. Sukhaimie M. A. Norasikin A. F. A. Rasid. (2022, marzo 5). *Internet of Things Applications in Precision Agriculture: A Review*.
<https://doi.org/10.18196/jrc.v3i3.14159>

5. Orozco Monje, J. S., Arce Santacruz, J. J., & Cerón Rios, G. M. (2023). FoodCraft: design of a precision agriculture system with IoT in indigenous communities in rural areas with difficult Internet access in the department of Cauca-Colombia. *Decisioning 2022. Collaboration in Knowledge Discovery and Decision Making: Applications to Sustainable Agriculture (La Plata, 30 de Junio al 1 de Julio de 2022)*, 22, núm. 3.
6. Quiroz-Valdez, J. A., Almaraz-Damian, J. A., & Ramos-Díaz, E. (2024). Transformación agrícola: implementación de un sistema de Monitoreo IoT para la gestión inteligente de cultivos. *PADI boletín científico de ciencias básicas e ingenierías del ICBI*, 12, 188–198.
<https://doi.org/10.29057/icbi.v12iespecial4.13323>
7. Shadi Atalla Saed Tarapiah Amjad Gawanmeh Mohammad Daradkeh. (2023). *IoT-Enabled Precision Agriculture: Developing an Ecosystem for Optimized Crop Management*. <https://doi.org/10.3390/info14040205>
8. Konecki, K., Chomczyński, P., & Kacperczyk, A. The spirit of communitarianism and the cultural background of the Limoncocha community in the context of sustainable development and environmental protection.
9. Sánchez, A. J. L., Burgos, L. I. M., Sarzoza, E. G. V., & García, M. R. M. (2023). Uso del Internet de las Cosas para la producción hidropónica del cultivo de lechuga bajo el sistema vertical NFT. *Polo del Conocimiento*, 8(12), 769–788. <https://doi.org/10.23857/pc.v8i12.6312>
10. Atalla, S., Tarapiah, A., Gawanmeh, A., & Daradkeh, M. (2023). IoT-enabled

- precision agriculture: Developing an ecosystem for optimized crop management. Information, 14(4), 205. <https://doi.org/10.3390/info14040205>
11. FAO. (2022). *El estado mundial de la agricultura y la alimentación*. <https://doi.org/10.4060/cc2621es>
 12. More, A., Patil, S., & Gadekar, S. (2025). IoT-based smart farming robot for precision agriculture. IEEE Access, 13, 10245–10256. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.1234567>
 13. Orozco Monje, J. S., Arce Santacruz, J. J., & Cerón Rios, G. M. (2023). FoodCraft: Design of a precision agriculture system with IoT in indigenous communities in rural areas with difficult Internet access in the department of Cauca-Colombia. Decisioning, 22(3), 45–60.
 14. Grosse, M., Honda, K., & Pineda, J. C. (2025). Automated work records for precision agriculture management. Quantum Zeitgeist.
 15. Lee, H., Kim, J., & Park, S. (2023). IoT-based strawberry yield prediction using multispectral imaging. Sensors, 23(4), 1512. <https://doi.org/10.3390/s23041512>
 16. Vatin, N. I., Ivanov, V. S., & Rassokhin, V. N. (2024). Low-cost sensors for tropical agriculture. BIO Web of Conferences, 65, 04001. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20246504001>
 17. Zhang, Y., Li, X., & Wang, J. (2024). 5G-enabled smart irrigation system for hydroponic strawberries. IEEE Internet of Things Journal, 11(2), 1234–1245. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2024.1234567>
 18. Grosse, M., Honda, K., & Pineda, J. C. (2025). Automated work records for

precision agriculture management. *Quantum Zeitgeist*.

19. Nexsel. (2024, noviembre 26). Full spectrum grow light for indoor strawberries.
<https://www.nexsel.tech/blog/indoor-vertical-farming/full-spectrum-grow-light-for-indoor-strawberries.php>
20. Hassan, M. U., Khan, A., & Rehman, A. (2024). Internet of Things in Agriculture: A Systematic Review of Recent Developments and Challenges. *Journal of System and Management Sciences*, 14(9), 67–80.
<https://www.aasmr.org/jsms/Vol14/No.9/Vol.14.No.9.05.pdf>
21. Garces, J. (2022). Desarrollo de modelo IoT para solución de agricultura sostenible de arroz en Ecuador. [Tesis de grado, Universidad Politécnica Salesiana]. Repositorio Institucional UPS.
<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/27863/1/UPS-GT005354.pdf>
22. Jacome, G. (2022). Diseño e implementación de un sistema IoT para el monitoreo de variables agroclimáticas en un invernadero [Tesis de grado, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE]. Repositorio ESPE.
<https://repositoriobe.espe.edu.ec/server/api/core/bitstreams/811519e6-e7ca-4258-b00b-84c0c0369d15/content>
23. Hyein, L., Cui, M., Lee, B., Hwang, H., & Chun, C. (2023). Optimization of the pot volume and substrate for strawberry cultivation in a hydroponic system. *Horticultural Science and Technology*, 41(6), 634–644. <https://doi.org/10.7235/HORT.20230054>

24. Díaz García, A. (2022). Sistema IoT para la monitorización de terrenos de cultivo usando una red de área amplia y baja potencia [Trabajo Fin de Grado, Universidade da Coruña]. Repositorio Institucional UDC.
https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/31801/DiazGarcia_Aldara_TFG_2022.pdf?sequence=2
25. Rojas Estupiñán, L. (2020). Sistema de sensores de IoT para el control de variables en un cultivo de fresa [Trabajo de grado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia]. Repositorio UNAD.
<https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/33791/lrojasest.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
26. Cerero, L. (2020). Producción de fresa (*Fragaria ananassa* Duch.) en sistemas hidropónicos bajo invernadero en Zaachila, Oaxaca, México [Tesis de licenciatura, Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca]. Repositorio Nacional de Institutos Tecnológicos.
[https://rinacional.tecnm.mx/jspui/bitstream/TecNM/6800/1/PRODUCCI%C3%93N%20DE%20FRESA%20\(Fragaria%20ananassa%20Duch.\)%20EN%20SISTEMAS%20HIDROP%C3%93NICOS%20BAJO%20INVERNADERO%20EN%20ZAACHI.pdf](https://rinacional.tecnm.mx/jspui/bitstream/TecNM/6800/1/PRODUCCI%C3%93N%20DE%20FRESA%20(Fragaria%20ananassa%20Duch.)%20EN%20SISTEMAS%20HIDROP%C3%93NICOS%20BAJO%20INVERNADERO%20EN%20ZAACHI.pdf)
27. Manotoa, M. (2022). Diseño e implementación de un sistema de monitoreo y control de variables agroclimáticas en un invernadero utilizando IoT [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. Repositorio ESPOCH.

<https://dspace.esPOCH.edu.ec:8080/server/api/core/bitstreams/b4e2c10b-51c8-4a06-9d04-3d5275cedc9a/content>

28. Medina, L. (2022). Aprovechamiento de residuos orgánicos obtenidos en invernaderos de la provincia de Tungurahua [Trabajo de titulación, Universidad Técnica de Ambato]. Repositorio UTA.
<https://repositorio.uta.edu.ec/bitstreams/51f1cc15-2909-401f-972e-a66696633181/content>
29. Pirayesh, H. (2023). Wireless IOT communications and networking: energy efficiency, spectral efficiency, and security. Msu.edu. Recuperado el 9 de junio de 2025, de <https://d.lib.msu.edu/etd/51281>.
30. Sachan, S., Sharma, R., & Sehgal, A. (2023). Energy efficiency and scalability of 5G networks for IoT in mobile wireless sensor networks. En 5G and Beyond (pp. 151–168). Springer Nature Singapore. [10.1007/978-981-99-3668-7_8](https://doi.org/10.1007/978-981-99-3668-7_8)
31. Zana, E., Caso, G., De Nardis, L., Mohammadpour, A., Alay, Ö., & Di Benedetto, M.-G. (2021). Energy efficiency in short and wide-area IoT technologies—A survey. Technologies, 9(1), 22.
<https://doi.org/10.3390/technologies9010022>
32. Márquez, J., Prieto, A., Manrique, M. & Sánchez, Ó. (2024). Sistema de riego automatizado para un cultivo de pequeña superficie. Revista Tecnológica - Espol, 36(2), 32-45.
<https://rte.espol.edu.ec/index.php/tecnologica/article/view/1227>

33. Jabbar, W. A., Mei Ting, T., I. Hamidun, M. F., Che Kamarudin, A. H., Wu, W., Sultan, J., Alsewari, A. A., & Ali, M. A. H. (2024). Development of LoRaWAN-based IoT system for water quality monitoring in rural areas. *Expert Systems with Applications*, 242(122862), 122862.
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.122862>
34. Tonato Chuquimarca, C., & Sinche Maita, S. (2022). Análisis comparativo entre arquitecturas de sistemas IoT. *Revista de Investigación en Tecnologías de la Información*, 10(21), 55–70. <https://doi.org/10.36825/riti.10.21.006>
35. Xu, J., Gu, B., & Tian, G. (2022). Review of agricultural IoT technology. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 6, 10–22.
<https://doi.org/10.1016/j.aiia.2022.01.001>
36. Tang, P., Liang, Q., Li, H., & Pang, Y. (2024). Application of Internet-of-Things wireless communication technology in agricultural irrigation management: A review. *Sustainability*, 16(9), 3575. <https://doi.org/10.3390/su16093575>
37. Kuntke, F., Romanenko, V., Linsner, S., Steinbrink, E., & Reuter, C. (2022). LoRaWAN security issues and mitigation options by the example of agricultural IoT scenarios. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 33(5). <https://doi.org/10.1002/ett.4452>
38. Mahedero, F. (2020). Desarrollo de una aplicación IoT para el envío de Imágenes mediante el protocolo MQTT.
<https://riunet.upv.es/handle/10251/152408>

39. Monges, Y., Flecha, E., & Chaparro, E. (2023). Integración de IIoT en Smart Grid: Análisis de protocolos MQTT y CoAP en subestaciones digitales. REVISTA CIENTÍFICA UNE, 6(1), 78–86.
http://revistas.une.edu.py/index.php/revista_une/article/view/228
40. Chamochumbi, A., (2022). DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE HORNO AUTOMATIZADO PARA EL SECADO DE GRANOS DE MAÍZ CON ARDUINO Y CONTROL PID.
<https://repositorio.urp.edu.pe/entities/publication/59a0fe25-6d67-425a-9584-2b9e8f249039>
41. Kuo, B., (1996). Sistema de control Automático. (pp. 6 – 9). EDIMSA. S.A.
42. Corona, E., (2025). Diseño e implementación de un filtro de Kalman para un controlador PID acoplado a un invernadero.
<https://ru.dgb.unam.mx/server/api/core/bitstreams/ff7533cd-bb88-4127-b315-c41bb968af74/content>
43. Guatapi, A.; Garcia, E. (2022). Desarrollo de aplicaciones de monitoreo y control basadas en IoT a través de la plataforma Ubidots. Aplicaciones a sistemas de automatización bajo entornos de simulación.
<http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/24088>
44. Santos, I. (2021). Diseño y desarrollo de un sistema de cultivo doméstico fabricado mediante impresión 3D
<https://uvadoc.uva.es/bitstream/10324/48092/1/TFG-I-1985.pdf>

45. Mero, A *et al.* (2025). Impresión 3D con Kingroon Kp3s Pro para el diseño de componentes robotizados legos.
<https://revistas.unesum.edu.ec/JTI/index.php/JTI/article/view/95/141>
46. Ávila, F. & Moreno, L. (2024). Impresión 3D: Innovación y sostenibilidad.
<https://elementos.buap.mx/directus/storage/uploads/00000011686.pdf>
47. Septiawan, D., Misbahuddin, & Wiriasto, G. W. (2025). IoT-driven solutions for improved plant care in terrariums. *International Journal of Electrical, Energy and Power System Engineering*, 8(1), 72–85.
<https://doi.org/10.31258/ijeepse.8.1.72-85>
48. International Electrotechnical Commission (IEC) (2025). Iec.Ch. *Ingress protection (IP) ratings*. Recuperado el 9 de noviembre de 2025, de <https://www.iec.ch/ip-ratings>
49. Madeline Vassaux. (2024). Maxongroup.com. Recuperado el 6 de enero de 2026, de <https://www.maxongroup.com/es-es/conocimientos-y-asistencia-tecnica/blog/ip65-ip67-ip68%E2%80%A6-%C2%BFqu%C3%A9-significan-los-grados-de-protecci%C3%B3n--22652>

Anexos

Anexo 1.

Programación del sistema de control del ESP32 en Arduino IDE.

```
#include <WiFi.h>
#include "UbidotsEsp32Mqtt.h"
#include <DHT.h>
#include <PID_v1.h>

// ===== UBIDOTS CONFIG =====
const char *UBIDOTS_TOKEN = "BBUS-Qx00wpg35AZMKjAPe38kTCWqxiHPjR";
const char *WIFI_SSID = "UISEK-LIMONCOCHA";
const char *WIFI_PASS = "1712603875";
const char *DEVICE_LABEL = "tesis";

const char *TEMP_VAR = "temperatura";
const char *HUM_VAR = "humedad";
const char *SOIL1_VAR = "humedad-del-suelo";
const char *CO2_VAR = "co2";

Ubidots ubidots(UBIDOTS_TOKEN);

// ===== PINES =====
#define DHTPIN1      15
#define DHTPIN2      27
#define DHTTYPE      DHT11

#define RELAY_PIN     5
#define FAN_GATE_PIN  23
#define CELL_PWM_PIN  13

#define SOIL1_PIN     34
#define CO2_PIN       35

#define PWM_CHANNEL    0
#define PWM_FREQ       5000
#define PWM_RESOLUTION 8

DHT dht1(DHTPIN1, DHTTYPE);
DHT dht2(DHTPIN2, DHTTYPE);
```

```

// ===== PID CONFIG =====
double Setpoint = 10.0;
double Input = 0;
double Output = 0;
double Kp = 30, Ki = 5, Kd = 15;
PID myPID(&Input, &Output, &Setpoint, Kp, Ki, Kd, DIRECT);

// ===== TIMER =====
unsigned long lastMillis = 0;
const unsigned long interval = 5000;

void callback(char *topic, byte *payload, unsigned int length) {
    // No usado pero requerido
}

void setup() {
    Serial.begin(115200);
    dht1.begin();
    dht2.begin();

    pinMode(RELAY_PIN, OUTPUT);
    pinMode(FAN_GATE_PIN, OUTPUT);

    ledcSetup(PWM_CHANNEL, PWM_FREQ, PWM_RESOLUTION);
    ledcAttachPin(CELL_PWM_PIN, PWM_CHANNEL);
    ledcWrite(PWM_CHANNEL, 0);

    digitalWrite(RELAY_PIN, HIGH);    // Celda OFF
    digitalWrite(FAN_GATE_PIN, LOW);  // Ventilador OFF

    myPID.SetMode(AUTOMATIC);
    myPID.SetOutputLimits(0, 255);

    ubidots.setCallback(callback);
    ubidots.connectToWifi(WIFI_SSID, WIFI_PASS);
    ubidots.setup();
    ubidots.reconnect();
}

```



```

Serial.println("✅ Sistema PID y Ubidots iniciado");
}

void loop() {
  if (!ubidots.connected()) {
    ubidots.reconnect();
  }

  // ===== Lectura de sensores =====
  float temp1 = dht1.readTemperature();
  float temp2 = dht2.readTemperature();
  float hum1 = dht1.readHumidity();
  float hum2 = dht2.readHumidity();

  if (isnan(temp1) || isnan(temp2)) {
    Serial.println("❌ Error leyendo sensores DHT");
    return;
  }

  // ===== Control PID =====
  Input = (temp1 + temp2) / 2.0;
  myPID.Compute();

  if (Input > Setpoint + 0.5) {
    digitalWrite(RELAY_PIN, LOW);           // Celda ON
    digitalWrite(FAN_GATE_PIN, HIGH);       // Ventilador ON
    ledcWrite(PWM_CHANNEL, (int)Output);     // PWM
  } else if (Input < Setpoint - 0.5) {
    digitalWrite(RELAY_PIN, HIGH);          // Celda OFF
    digitalWrite(FAN_GATE_PIN, LOW);        // Ventilador OFF
    ledcWrite(PWM_CHANNEL, 0);
  }

  // ===== Lecturas adicionales =====
  int soilRaw1 = analogRead(SOIL1_PIN);
  int soil1 = map(constrain(soilRaw1, 1000, 3000), 3000, 1000, 0, 100);

```

```

int co2Raw = analogRead(CO2_PIN);
float co2ppm = map(co2Raw, 0, 4095, 400, 1000); // Estimado

// ===== Enviar a Ubidots cada 5s =====
if (millis() - lastMillis > interval) {
  ubidots.add(TEMP_VAR, Input);
  ubidots.add(HUM_VAR, (hum1 + hum2) / 2.0);
  ubidots.add(SOIL1_VAR, soil1);
  ubidots.add(CO2_VAR, co2ppm);
  ubidots.publish(DEVICE_LABEL);

  Serial.print(" T1: "); Serial.print(temp1);
  Serial.print(" | T2: "); Serial.print(temp2);
  Serial.print(" | Prom: "); Serial.print(Input);
  Serial.print(" | PWM: "); Serial.print(Output);
  Serial.print(" | H1: "); Serial.print(hum1);
  Serial.print(" | H2: "); Serial.print(hum2);
  Serial.print(" | Suelo1: "); Serial.print(soil1);
  Serial.print(" | CO2: "); Serial.print(co2ppm); Serial.println(" ppm");

  lastMillis = millis();
}

ubidots.loop();
}

```

Anexo 2.

Programación de comunicación inalámbrica utilizando el módulo LoRa32.

```
#include <WiFi.h>
#include <WebServer.h>
#include "UbidotsEsp32Mqtt.h"

// ===== CONFIG AP =====
const char *AP_SSID = "LoRa_Private_AP";
const char *AP_PASS = "12345678";

// ===== UBIDOTS CONFIG =====
const char *UBIDOTS_TOKEN = "BBUS-Qx00wpg35AZMKjAPe38kTCWqxiHPjR";
const char *DEVICE_LABEL = "tesis";

const char *TEMP_VAR = "temperatura";
const char *HUM_VAR = "humedad";
const char *LUX_VAR = "luminosidad";
const char *SOIL_VAR = "humedad-del-suelo";
const char *PH_VAR = "ph-agua";

Ubidots ubidots(UBIDOTS_TOKEN);

// ===== SERVIDOR HTTP =====
WebServer server(80);

// ===== VARIABLES DE SENSORES =====
float temperatura = 0;
float humedad = 0;
float lux = 0;
int humedadSuelo = 0;
float phAgua = 0;

// ===== TIMER =====
unsigned long lastMillis = 0;
const unsigned long interval = 5000;

// ===== CALLBACK UBIDOTS =====
void callback(char *topic, byte *payload, unsigned int length) {
    // No usado, pero necesario para inicializar MQTT
}
```

```
// ===== RUTA PARA RECIBIR DATOS =====
void handleRoot() {
  if (server.hasArg("temp")) temperatura = server.arg("temp").toFloat();
  if (server.hasArg("hum")) humedad = server.arg("hum").toFloat();
  if (server.hasArg("lux")) lux = server.arg("lux").toFloat();
  if (server.hasArg("soil")) humedadSuelo = server.arg("soil").toInt();
  if (server.hasArg("ph")) phAgua = server.arg("ph").toFloat();

  Serial.println("📡 Datos recibidos del cliente:");
  Serial.printf("Temp: %.2f°C | Hum: %.2f%% | Lux: %.2f lx | Suelo: %d%% | pH: %.2f\n",
    temperatura, humedad, lux, humedadSuelo, phAgua);

  server.send(200, "text/plain", "Datos recibidos");
}

void setup() {
  Serial.begin(115200);

  // ===== CONFIGURAR MODO AP =====
  WiFi.softAP(AP_SSID, AP_PASS);
  Serial.printf("📶 Punto de acceso iniciado: %s\n", AP_SSID);
  Serial.print("IP AP: ");
  Serial.println(WiFi.softAPIP());

  // ===== CONFIG SERVIDOR WEB =====
  server.on("/", handleRoot);
  server.begin();
  Serial.println("🌐 Servidor HTTP iniciado");

  // ===== CONFIG UBIDOTS =====
  ubidots.setCallback(callback);
  ubidots.connectToWifi("UISEK-LIMONCOCHA", "1712603875"); // 📶 Wifi real para enviar a Ubidots
  ubidots.setup();
  ubidots.reconnect();

  Serial.println("✅ Sistema LoRa32 + Ubidots listo");
}

void loop() {
  server.handleClient();

  if (!ubidots.connected()) {
    ubidots.reconnect();
  }

  // Publicar en Ubidots cada 5 segundos
  if (millis() - lastMillis > interval) {
    ubidots.add(TEMP_VAR, temperatura);
    ubidots.add(HUM_VAR, humedad);
    ubidots.add(LUX_VAR, lux);
    ubidots.add(SOIL_VAR, humedadSuelo);
    ubidots.add(PH_VAR, phAgua);

    ubidots.publish(DEVICE_LABEL);
    Serial.println("📡 Datos enviados a Ubidots");

    lastMillis = millis();
  }

  ubidots.loop();
}
```

Anexo 3.

Verificación de creación del punto de acceso privado.



Anexo 4.

Construcción de la caja de refrigeración.



Anexo 5.

Soldadura del módulo de enfriamiento.



Anexo 6.

Proceso de construcción de los módulos con acrílico.

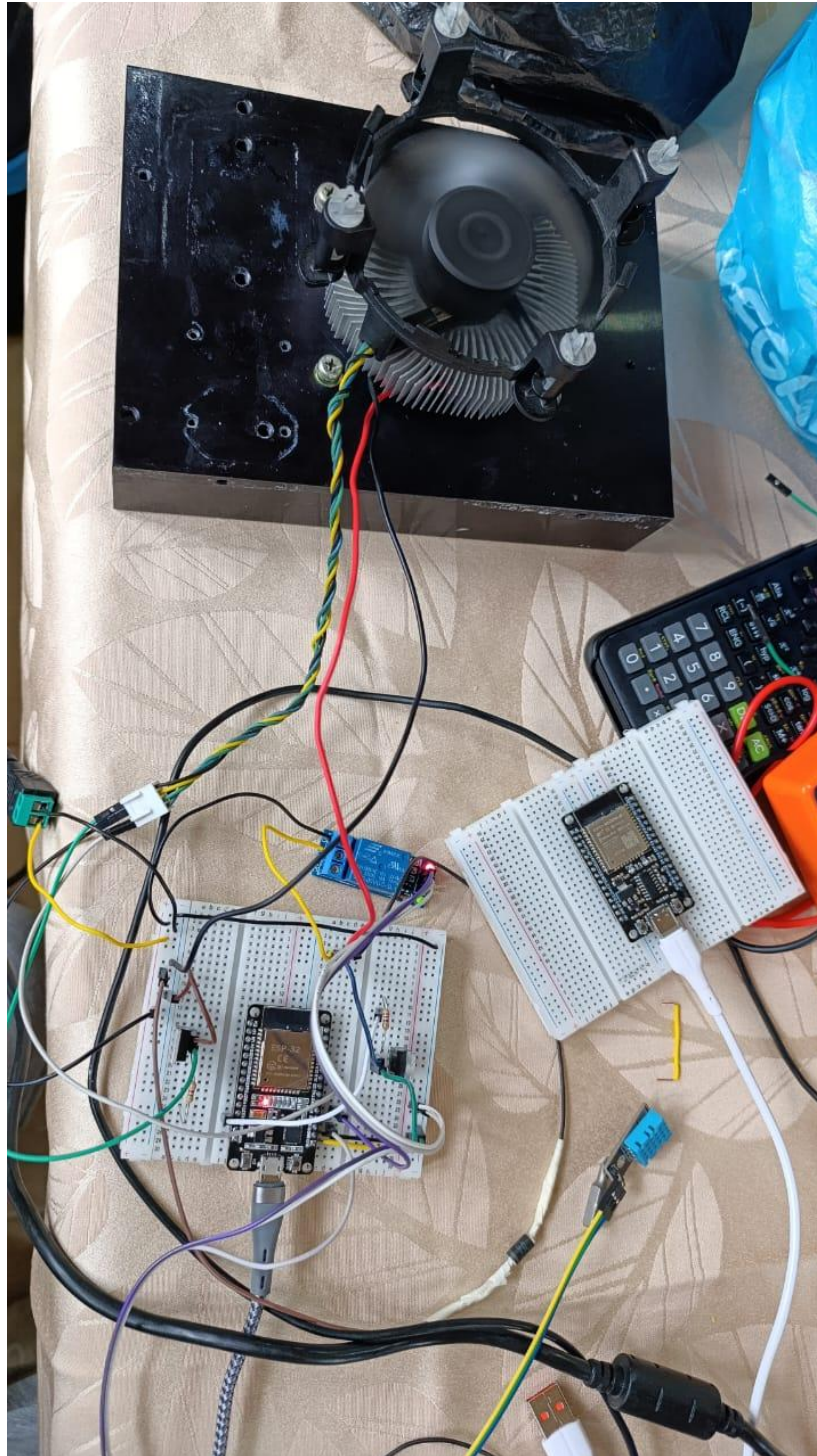
**Anexo 7.**

Proceso de construcción del módulo con acrílico.



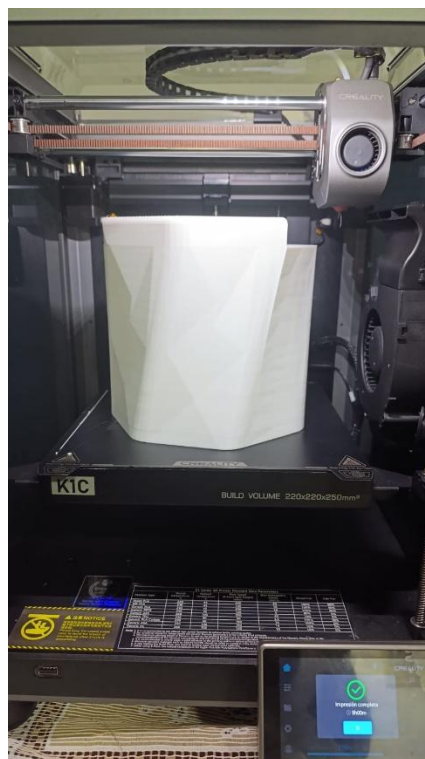
Anexo 8.

Pruebas del circuito de control.

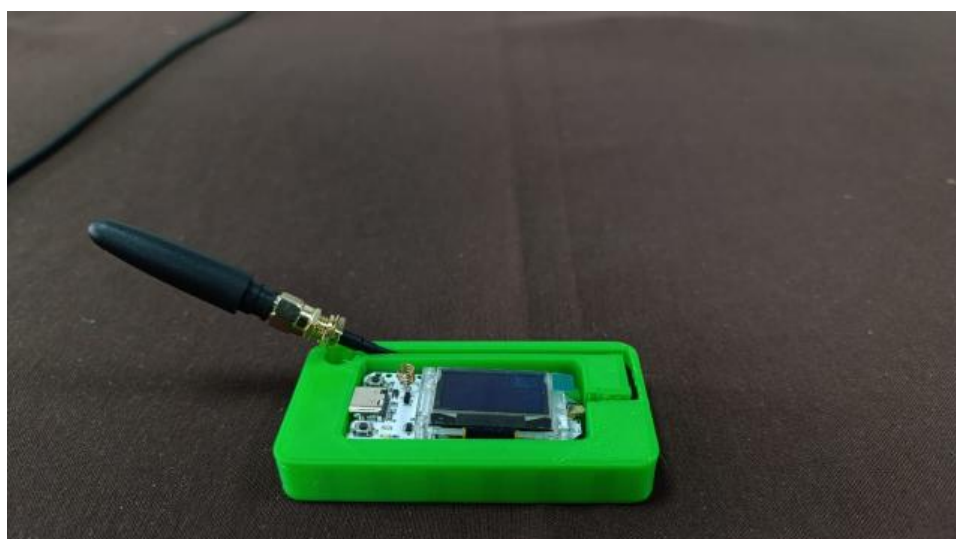


Anexo 9.

Proceso de impresión 3D.

**Anexo 10.**

Pruebas de montaje de piezas impresas en 3D.

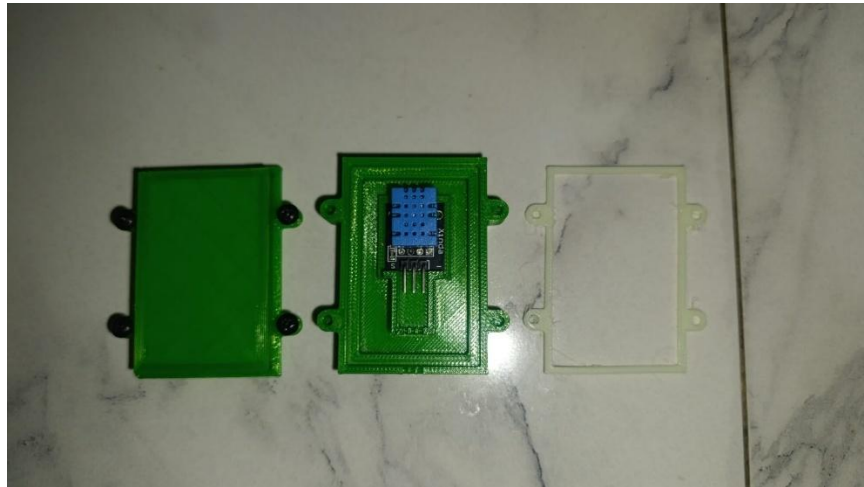


Anexo 11.

Montaje sistema de control y plantas prototipo 1.

**Anexo 12.**

Piezas resultantes para la prueba de verificación de ingreso de líquidos.



Anexo 13.

Ensamble final de la carcasa de prueba.

