



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA,
OPCIÓN INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA
ELECTRÓNICA

SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y
CONTROL DE MICROCLIMA EN
INVERNADEROS PARA EL CULTIVO DE
HONGO SETA *PLEUROTUS OSTREATUS*

Presenta:

Ing. Alejandro Rojas Centeno

Asesores:

Asesor Dr. José Fermi Guerrero Castellanos

Co- asesor Dr Ernesto Castellanos Velasco

17 de Abril 2024

Dedicatoria

A Dios, quien ha sido mi roca y mi refugio en todo momento. Por su gracia y misericordia, he sido fortalecido para enfrentar los desafíos y perseverar en este viaje académico. A Él dedico esta tesis, como un humilde testimonio de mi gratitud por su amor incondicional, su sabiduría infinita y su constante provisión.

A mis padres, Rolando y Francisca por su amor incondicional y sacrificio han sido la base de mi crecimiento y desarrollo, les dedico este logro con profundo agradecimiento y admiración. Por su constante inspiración y apoyo han sido la fuerza que me ha impulsado a alcanzar nuevas alturas en mi vida académica y profesional.

A mis hermanos, cuya complicidad y cariño han sido mi refugio en los momentos de duda y dificultad, les dedico este trabajo como un testimonio de nuestra unión inquebrantable y como un recordatorio de la importancia de la familia en el camino hacia nuestros sueños más grandes.

A mis asesores, agradezco de corazón la dedicación y el compromiso del Dr. Fermí y del Dr. Ernesto, quienes han guiado mi crecimiento intelectual con su profundo conocimiento y experiencia. Valoraré siempre su influencia en mi desarrollo como persona y como profesional.

A mis amigos y colegas, quienes han compartido conmigo risas, lágrimas y momentos inolvidables a lo largo de este viaje. Su amistad ha sido un regalo invaluable, y estoy eternamente agradecido por su apoyo incondicional y por estar siempre a mi lado, celebrando cada uno de mis logros y compartiendo mis desafíos.

Por último, pero no menos importante, agradezco a todas las personas que de alguna manera han contribuido a este logro, ya sea con su apoyo, consejos o palabras de aliento. Este trabajo es el resultado de un esfuerzo colectivo y refleja el apoyo y la colaboración de muchas personas queridas. A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento.

Resumen

La siguiente tesis propone un enfoque innovador para el control y monitoreo de un invernadero destinado al cultivo del hongo *Pleurotus Ostreatus*. Se desarrollaron modelos para la validación mediante métodos matemáticos que integran un controlador proporcional integral (PI) basado en eventos utilizando una red de sensores para supervisar y controlar el cultivo de hongos. Este proceso de control y monitoreo se lleva a cabo mediante la integración de herramientas como Simulink MATLAB, ThingSpeak y una Raspberry Pi 4. Los resultados obtenidos revelan cambios significativos en el crecimiento del hongo cuando se mantiene en un ambiente ideal y controlado. Estos resultados destacan el potencial del control basado en eventos para optimizar el cultivo de hongos en invernaderos, ofreciendo una vía prometedora para mejorar la productividad y la calidad del producto final en la industria agrícola.

Abstract

The following thesis proposes an innovative approach for the control and monitoring of a greenhouse dedicated to the cultivation of the *Pleurotus Ostreatus* mushroom. Models were developed for validation using mathematical methods, which integrate a proportional integral (PI) controller based on events employing a sensor network to supervise and regulate the cultivation of mushrooms. This control and monitoring process is carried out through the integration of tools such as Simulink MATLAB, ThingSpeak, and a Raspberry Pi 4. The results obtained reveal significant changes in the growth of the mushroom when maintained in an ideal and controlled environment. These findings highlight the potential of event-based control to optimize mushroom cultivation in greenhouses, offering a promising pathway to enhance productivity and the quality of the final product in the agricultural industry.

Índice general

Introducción	XII
Planteamiento del problema	XIII
Justificación	XIV
Objetivos	XV
Objetivo general	XV
Objetivos específicos	XV
Organización de la tesis	XVI
1. Marco teórico	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Estado del arte	3
1.3. Componentes del sistema de monitorización y control	4
1.3.1. Invernadero	4
1.3.2. Raspberry Pi 4B	5
1.3.3. Protocolo de comunicación IoT	6
1.3.3.1. Etapa de la arquitectura IoT	7
1.3.4. Protocolo MQTT	8
1.4. Características del hongo seta (<i>Pleurotus ostreatus</i>)	11
1.4.1. Ciclo de vida del <i>pleurotus ostreatus</i>	11
1.4.2. Características nutrimentales	12
1.4.3. Propiedades medicinales	13
1.4.4. Etapas de crecimiento de los basidiocarpos de <i>Pleurotus</i>	14
1.5. Estrategias de control PID	14
1.5.1. Estrategia de control PID basado en tiempo	15
1.5.2. Estrategias de control PID basado en eventos	16
2. Metodología	20
2.1. Diseño y construcción del prototipo	20
2.1.1. Diseño y modelo 3D	20
2.1.2. Construcción de estructura	22
2.2. Instalación de sistema de microclima	23

2.2.1.	Sistema de ventilación forzada	24
2.2.2.	Sistema de nebulización	25
2.2.3.	Sistema de calefacción	26
2.2.4.	Sistema de luz artificial	26
2.2.5.	Circuito eléctrico	27
2.2.6.	Prototipo de invernadero final	29
2.3.	Cultivo de hongo seta	30
2.4.	Elección de sistema de red	30
2.5.	Configuración de Raspberry Pi 4B y red de sensores	33
2.5.1.	Configuración de red de sensores	33
2.5.2.	Configuración de servidor ThingSpeak	34
2.5.3.	Configuración de acceso remoto de Raspberry Pi con Simulink	38
2.6.	Propuesta de control	40
2.7.	Modelo dinámico no lineal de invernadero	41
2.7.1.	Ecuaciones dinámicas de temperatura y humedad	41
2.7.2.	Ecuaciones en variable de estado	43
2.7.3.	Conversión de humedad relativa a humedad absoluta	44
3.	Implementación	47
3.1.	Simulación y validación de modelo matemático	47
3.1.1.	Diagramas de bloques del modelo matemático	47
3.1.2.	Simulación de modelo matemático	49
3.1.3.	Simulación de controlador PI	51
3.1.4.	Interfaz y conectividad	53
3.2.	Diseño de controlador PI por eventos	56
3.2.1.	Controlador proporcional-integral (PI)	56
3.2.2.	Lógica de eventos	57
3.2.3.	Diseño de diagrama de control completo	59
4.	Resultados	61
4.1.	Resultados de simulación modelo matemático con invernadero real	61
4.2.	Resultados de Controlador PI por eventos y monitoreo en interfaz	63
4.3.	Resultados de cultivo de hongo seta.	64
	Bibliografía	70
	Apéndices	75
A.	Discusión de autores	75
A.1.	Discusión sobre desarrollo vegetativo del hongo seta	75

B. Pruebas de cultivo ante diferentes condiciones climáticas	77
B.1. Experimento 1	77
B.2. Experimento 2	78

Índice de figuras

1.1. Condiciones de un invernadero	4
1.2. Raspberry Pi 4B [1]	5
1.3. Flujo de datos: desde el borde hasta el servidor/nube [2]	6
1.4. Ejecución del servidor MQTT [3]	10
1.5.	12
1.6. Descomposición de un intervalo de estado estacionario [4].	17
2.1. Desdoblamiento isométrico de prototipo de invernadero.	21
2.2. Diseño 3d vista frontal y lateral izquierdo.	22
2.3. Diseño 3d vista superior.	22
2.4. Estructura y cubierta de invernadero	23
2.5. Ubicación de ventiladores para circulación de aire	24
2.6. Sistema de nebulización	25
2.7. Instalación de calentador	26
2.8. Circuito eléctrico	27
2.9. Circuito interactivo de conexiones.	28
2.10. Circuito eléctrico físico.	29
2.11. Prototipo final	29
2.12. Procedimiento para el cultivo de hongo seta	30
2.13. Modulo ESP8266 WiFi y TP-Link	32
2.14. Esquemático de conexión de ESP8266 y DHT11	33
2.15. flujo	34
2.16. Pagina oficial de ThingSpeak	35
2.17. Creación de nuevo canal.	35
2.18. Ventana de usuario Channel Settings	36
2.19. Interfaz de monitoreo del invernadero desde PC	36
2.20. Interfaz de monitoreo desde teléfono móvil	37
2.21. Bloques de input y read de ThingSpeak	37
2.22. Ventana para configuración de Field y keys	38
2.23. Acceder a configuración de red en simulik	38

2.24. Selección de tarjeta	39
2.25. Datos de conexión a acceso remoto	39
2.26. Sistemas de control multivariable [5]	40
2.27. Diagrama de control	41
3.1. Diagrama de bloques para el sistema en lazo abierto del invernadero	48
3.2. Diagrama de bloques para ecuación de temperatura	48
3.3. Diagrama de bloques para ecuación de humedad	49
3.4. Parametros en editor de Matlab	50
3.5. Respuesta de sistema ante escalón unitario	51
3.6. PI analógico en forma matemática	52
3.7. Respuesta de controlador PI analógico	52
3.8. Diagrama de bloques: temperatura y humedad Indoor/Outside	53
3.9. Subsistema de conversión de H_R a H_{abs}	54
3.10. Diagrama de circuito en tiempo real	55
3.11. Error en estado estacionario en la temperatura y humedad	57
3.12. Diseño de disparo de eventos en el sistema de regulación del invernadero	57
3.13. Umbral de eventos para acción de actuadores	58
3.14. Comparadores para establecer umbral	59
3.15. Diseño de controladores PI por eventos.	60
4.1. Comparación de temperatura de molelo matemático con invernadero.	62
4.2. Comparación de temperatura de molelo matemático con invernadero real	62
4.3. Monitoreo de micro clima del invernadero	63
4.4. Monitoreo de micro clima del invernadero	64
4.5. Día 1 en condiciones ideales	64
4.6. Día 2 en condiciones ideales	65
4.7. Día 3 en condiciones ideales	65
4.8. Día 4 en condiciones ideales	66
4.9. Día 5 en condiciones ideales	66
4.10. Cosecha de hongo seta	67
B.1. Fructificación de sin ambiente controlado	77
B.2. Fructificación con ambiente cerrado en invernadero	78
B.3. Hongo momificado	79

Índice de tablas

1.	Clima semestral de Chilchotla, Puebla 2022	XIV
2.1.	Lista de materiales para construcción de invernadero	23
2.2.	Lista de materiales para construcción de sistema de nebulización.	25
2.3.	Tabla comparativa de controladores	31
2.4.	Tabla comparativa de tipos de red	32
3.1.	Parámetros internos y externos del sistema	49

Glosario

PLC: Programmable Logic Controller (controlador lógico programable).

HMI: Human-machine interface (interfaz humano-máquina).

E/S: Entrada/salida.

CPU: Central Processing Unit (unidad central de procesamiento).

RAM: Random Access Memory, (memoria de acceso aleatorio).

GPIO: General Purpose Input/Output (entrada/salida de propósito general).

TCP/IP: Protocolo de control de transmisión/Protocolo de Internet

WPA: Wi-Fi Protected Access (acceso Wi-Fi protegido)

WPA2: Wi-Fi Protected Access 2 (acceso Wi-Fi protegido 2)

PWM: Pulse Width Modulation (modulación por ancho de pulso)

Introducción

La agricultura protegida ha surgido desde hace varios siglos, por ejemplo, en la edad Antigua en ciudades como Mesopotamia, Egipto y Roma se protegía a los cultivos en túneles, galerías o despensas; en bagajes bíblicos se dice que hace unos 3000 años en Jerusalén “nada faltaba en la mesa del Rey Salomón, ni rosas con el color de verano, ni calabacines en la estación lluviosa” es decir se producía, aunque no fuera de temporal.

Actualmente la humanidad esta enfrentando crisis globales, ecológicas, económicas, de salud y alimentarias. Estas crisis se caracterizan por la caída del crecimiento económico, un aumento considerable hasta del 65 % en los precios de los alimentos y las materias primas, así como los efectos del cambio climático. En México todo esto ha repercutido en la seguridad alimentaria de la población, en su derecho a tener acceso a alimentos sanos y nutritivos, así como a una alimentación balanceada y diversa [6]. Los hongos comestibles son una buena alternativa para contender con estas crisis al ser un sistema de producción-consumo, presenta procesos biotecnológicos aplicados que pueden desarrollarse a pequeña y gran escala para producir 1.- Alimento humano de buena calidad nutritiva y con propiedades medicinales, 2.- Suplementos dietéticos y 3.- Enzimas y productos metabólicos de importancia industrial [7, 8]. Con un alto contenido de aminoácidos esenciales, minerales, vitaminas del complejo B y provitamina D, así como fibra cruda y con un contenido relativamente bajo en grasa, demostrando propiedades anticancerígenas, antibióticas, antioxidantes, antitromboticas, antidiabéticas y disminuyen los niveles de colesterol y la hipertensión [9]. Esas propiedades son únicas y diferentes a las que se pueden obtener de otros alimentos que son principalmente consumidos, debido a que los hongos pertenecen al reino Fungi que presenta características propias, además de que tienen una gran tradición cultural sobre todo en nuestro país como lo sugiere Mayett [6]. En México el cultivo, aprovechamiento de hongos comestibles se ha venido promoviendo por más de 70 años en pequeña y gran escala, principalmente en las variedades de Champiñón *Agaricus*, Setas *Pleurotus* y shiitake *Lentinula*. Su valor económico representa 200 millones de dólares anuales [10]. Sin embargo, el cultivo del hongo requiere de condiciones climáticas específicas como son la humedad y la temperatura para su desarrollo, de tal forma que sus características nutricionales puedan ser alcanzadas. Para ello es necesario tener espacios controlados, donde las variables en cuestión puedan ser monitorizadas y el ambiente pueda ser controlado. Esto se lleva a cabo generalmente en invernaderos. Un problema

interesante y que ha sido abordado es el control de los invernaderos considerándolos un sistema ciber-físico.

Un sistema ciber-físico conocido como CPS (por sus siglas en inglés *cyber-physical system*), es la integración de elementos y procesos computacionales con procesos físicos. Dichos sistemas se caracterizan por ser conformados por sistemas embebidos, redes de comunicación y algoritmos de control, en los que los lazos de retroalimentación son afectados tanto por procesos físicos como por procesos computacionales. Para los CPS, el uso de plataformas y redes digitales emerge como una tendencia obvia para ahorrar espacio, peso y energía. Sin embargo, las implementaciones digitales pueden dar lugar a problemas adicionales, como la determinación de la frecuencia con la que necesita ser actualizada la señal de control que garantice la estabilidad del sistema en lazo cerrado. El objetivo de este trabajo de tesis es desarrollar un sistema de control del microclima usando una red de sensores distribuidos (nodos), se pretende controlar el riego por nebulización, temperatura y luminosidad de un invernadero a escala a partir de la lectura de estas variables, usando como computadora central una Raspberry Pi 4 para mantener las condiciones ideales para el cultivo de hongo seta. Con la implementación de esta tecnología se pretende que en el municipio de Chilchotla se logre aumentar la producción y el crecimiento ante condiciones ideales que se requiere de hongo seta y así mantener la calidad durante todo el año no importando los cambios repentinos de temperatura y humedad que existen en la región.

Planteamiento de problema

El clima a nivel mundial ha cambiado de forma drástica debido al aumento de los índices de contaminación y el posterior surgimiento de fenómenos como el efecto invernadero. Esta situación ha generado una serie de problemáticas de índole ambiental que han alterado el estilo de vida de la humanidad, especialmente la forma en la cual se desarrollan los procesos en la agricultura.

Estas variaciones climáticas tales como las heladas, generación de tormentas de grandes proporciones, el incremento de la radiación solar, las sequías, etc., afectan los diversos cultivos, de tal forma que se presenta una preocupante reducción de la cantidad y calidad de los productos agrícolas cosechados. Esta afectación de la producción, genera a su vez un detrimento de las ganancias de los agricultores. En la actualidad la necesidad de una gran cantidad de productos agrícolas provocan una exigencia mayor en los requerimientos de calidad, para ello las condiciones climáticas de muchos lugares no son ideales, en particular en la región de Chilchotla no son muy favorables.

Se muestra en la Tabla 1 el registro de temperatura y humedad promedio del primer semestre de 2022 en Chilchotla Pue, datos tomados de Conagua, siendo un clima 74 % húmedo y por lo regular es un lugar frío donde en promedio esta en un 40 % de del día

con nubosidad.

Tabla 1: Clima semestral de Chilchotla, Puebla 2022

Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Temp min/max	11°C/21°C	11°C/21°C	13°C/24°C	15°C/27°C	26°C/16°C	15°C/26°C
Hume- dad	80 %	77 %	68 %	73 %	75 %	74 %
Nubo- sidad	49 %	45 %	42 %	32 %	53 %	43 %

Al ser un clima húmedo y frío y sin mucha luz diurna se tienen una alta probabilidad de que el cultivo pueda ser sensible a: Quemaduras por frío y llegar a momificarse o podrirse, puede contraer enfermedades provocadas por hongos como el *Penisillium* entre otros y algunas bacterias. La problemática radica que al no tener un buen control de estas variables se pueden generar este tipo de enfermedades, al ser cultivos de ciclo corto son muy sensibles al calor, humedad y frío, así mismo al ser un clima inestable en esta región, se puede encontrar algunas deficiencias en el desarrollo vegetativo y absorción de nutrientes por falta de luminosidad o calor, Lo cual hace que sea una buena zona para realizar las pruebas del sistema.

Justificación

La Modificación de los factores ambientales dentro de los invernaderos permite ofrecer un medio favorable para que el cultivo dentro de ellos exprese su potencial productivo sin las restricciones ambientales a que están sometidas cuando se desarrollan a campo abierto. Una consecuencia de esto es que los que tienen invernaderos deben vivir cerca de ellos, puesto que el cuidado de estos es muy estricto y se tiene que cuidar día y noche incluso. La tecnología actual nos propone tratar de reducir estos cuidados que muchas veces en horas-hombre se sale del presupuesto o no se obtienen las ganancias que se podrían tener si se utilizara un sistema de automatización.

Los beneficios que este trabajo de tesis aportará es la calidad en la cosecha de hongo seta a partir del uso de un sistema radicular de patrones tolerantes o resistentes al usar un sistema de control. Con la ayuda de un controlador PI basado en eventos, se podrá tener un control óptimo de las variables dentro del invernadero, una de sus ventajas es mandar acciones de control exclusivamente en perturbaciones externas que estén fuera del umbral programado permitiendo reducir el consumo de energía, agua y el uso de contaminantes, esto a su vez usa una red de sensores que estarán enviando información

a la red, actualizándola en un tiempo determinado para que se pueda monitorear y al mismo tiempo se pueda usar para el control del invernadero. Estos avances tecnológicos de control y automatización de invernaderos son para la generación de un microclima apto para la aplicación para el hongo seta, evitando el uso de contaminantes químicos para tener un buen manejo preventivo de enfermedades y plagas evitando la pérdida de producción hasta un 50 % y aumento del crecimiento de hasta un 42 %.

Así mismo garantizar al consumidor un producto libre de cualquier agente contaminante, es decir, físico químico o biológico desde establecimiento de la planta. Los invernaderos automatizados, ayudan no solo a reducir los espacios necesarios para el cultivo, sino que, además, mediante el uso de herramientas de automatización, permiten el control de los cultivos de formas mucho más eficientes, reduciendo el consumo energético y de recursos naturales, logrando incrementar notablemente la productividad y calidad de los cultivos. Por lo cual existe el interés en este proyecto, de poder desarrollar y probar otras opciones en sistemas de automatización que además de tener un costo accesible, también sean fáciles de usar e implementar por los productores.

Objetivos

Objetivo general

Desarrollar un sistema de control del microclima en un invernadero para el cultivo de hongo seta (*Pleurotus ostreatus*) a través de una distribución adecuada de sensores, nodos de comunicación, y una mini computadora central, que permita tener la información en un sitio y de manera remota.

Objetivos específicos

- Estudiar las condiciones climáticas para el cultivo de hongo seta en su segunda etapa para la creación de microclima en invernadero.
- Identificar el modelo matemático que describa la evolución de la temperatura y humedad relativa dentro del invernadero.
- Desarrollar controladores PI disparado por eventos para el control de temperatura y humedad relativa en el microclima, basándose en los modelos antes identificados.
- Implementar el sistema de control de temperatura y humedad, usando una red de sensores distribuidos (nodos) y teniendo como computadora central una Raspberry Pi 4.

- Realizar una interfaz para modificar consignas y visualizar de manera local y remota la evolución de las variables. Esta interfaz también permitirá revisar el historial y estadísticas de dichas variables.

Organización de la tesis

La sección 1 proporciona una visión general de los antecedentes y el estado del arte relacionados con el problema de automatización y control de un microclima. Se incluye un análisis histórico, una revisión de los trabajos previos y una visión actualizada de las investigaciones relevantes. Además, se presenta el marco teórico necesario para comprender el tema. En la sección 2, se detalla la metodología y los procedimientos utilizados para abordar el problema de control. La sección 3 se centra en la implementación de diagramas y conectividad. Finalmente, en la sección 4, se presentan los resultados de la validación del modelo matemático y del controlador PI basado en eventos, seguidos de las conclusiones, la bibliografía y los apéndices.

Capítulo 1

Marco teórico

En este primer capítulo se muestran antecedentes que retoman desde el surgimiento y la necesidad del uso de invernaderos hasta hoy en nuestros días. Se aborda el estado del arte donde se presentan algunos trabajos que dan solución a problemas de control en microclimas con invernaderos.

1.1. Antecedentes

En la edad Media, conocida como el obscurantismo en cuanto a las ciencias, pero no en los avances tecnológicos, ya que como lo plantean (Aquino, Corona y Fernández, 2016) [11], en el siglo XVI aparecen libros que tendrán implicaciones en el arte de bien cultivar: "De Re Hortensi Libellus" (Charles Estienne, Paris 1536) y "The Jewel House of Art and Nature" (Sir Hugh Platt) ya ponderaban la recuperación de energía residual, generada por los gases de combustión de cocinas o chimeneas, para calentar invernaderos adosados a habitaciones o a refinerías de azúcar. Sin embargo, no es hasta la primera revolución industrial en el siglo XVIII, que se fueron identificando procesos como la transferencia de calor (conducción, convección y radiación), así como investigaciones sobre termodinámica y energía, todo ello abono a las aplicaciones en la modelización y en el control del clima de los invernaderos de la segunda mitad del siglo XX [11].

La acumulación de conocimiento, técnicas, innovaciones, tecnologías y en general todo proceso lógico, es el resultado de todo un devenir histórico, en el cual influyeron los contextos específicos de cada época para los logros que se conocen actualmente. Posterior a la primera revolución industrial, se pueden contemplar la tercera y cuarta como antecedentes fundamentales para la automatización y su aplicación en diferentes sectores. Como dato se tiene en 1960 el primer sistema de control de clima, precursor de las computadoras digitales, en 1970 se empieza a sustituir el carbón para el sistema de calefacción además de que a partir de 1980 se comienzan a instalar las pantallas móviles.

Por último, la cuarta revolución industrial se caracteriza por la adopción de las Tecnologías de Comunicación e Información comúnmente conocidas como las (TIC) así como de todas las funciones en la fabricación digital se transita de la integración holística del hardware a la integración holística de las comunicaciones, [12]. Estas tecnologías han influido en los actuales proyectos de investigación, en los cuales es posible controlar los procesos industriales y procesos de cultivo en invernaderos.

No obstante, surgen múltiples debates desde las cuestiones éticas, económicas, sociales, culturales que vale la pena considerar, ya que la innovación debe ir acompañada de la sustentabilidad y la mejora para la sociedad, además de considerar otras áreas del conocimiento, en este caso la agricultura, para el desarrollo de proyectos aplicables y con un impacto favorable a la humanidad. Con base a las investigaciones realizadas sobre el control de humedad y temperatura en un invernadero en [13] se presenta el control de clima de un invernadero mediante un sistema basado en eventos en combinación con redes de sensores inalámbricos, dando como objetivo proponer variables de baja frecuencia para ser las acciones controladas por eventos cuando haya una irregularidad (disturbio).

Para el modelado de la transpiración de un cultivo de tomate bajo invernadero para el diseño de sistemas de control de riego [14] propuesto por Baille, presentan como emplear modelos de transpiración a partir del modelo simplificado de evaporación, donde se presenta la transpiración como un proceso basado en 3 variables principales: radiación solar, DTV (déficit de presión de vapor) y LAI (índice del área foliar) a cultivos de tomate con el fin de que en un futuro sean parte de una arquitectura de control basada en eventos, también presentan resultados y calibración para validación de los modelos reales en diferentes estaciones del año.

Por otro lado se presenta el control basado en eventos predictivos para el control del riego [15] donde se mantiene la humedad y evitar el consumo excesivo de agua, el diseño del controlador determina el volumen del agua para compensar el riego y perturbaciones del sistema, se analiza el comportamiento del sistema (dinámica) de las cuales las variables a considerar son suministro de agua, evaporación y salida de agua. También en [16] se presenta el seguimiento de trayectoria y rechazo de perturbaciones, se propone un controlador PID convencional para el control del clima de invernadero en combinación con una red RBF.

1.2. Estado del arte

En este apartado son presentados algunos trabajos donde se realizan diferentes metodologías para la automatización y control de invernaderos con diferentes controladores y plantaciones.

Se presenta un sistema de control para el ambiente de un invernadero en el cultivo de tomate, se realiza un seguimiento al crecimiento de la planta modificando la cantidad de luz, temperatura y humedad. Se ha abordado tanto la construcción física del invernadero como la implementación del control automático mediante una Raspberry Pi [17].

El diseño para el control de riego de un invernadero en el cultivo de verduras y hortalizas [18], cuenta con un tablero eléctrico en el cual un PLC controla contactores y por medio de una pantalla HMI que se utiliza para monitoreo, se visualiza la activación de electroválvulas para la apertura y cierre de fertirriego ya sea de forma manual o automática.

Para el cultivo de rosales [19] como objetivo se desea tener los niveles convenientes de temperatura, humedad, luz, CO₂ a través de un PLC para la actuación combinada de los equipos del invernadero, la apertura y control de las ventanas y el funcionamiento simultáneo de la calefacción cuando se produce un exceso de humedad ambiente, el control que se maneja es a través de consignas de las variables climáticas importantes para el cultivo, además del registro de evolución de las variables en una base de datos accesible en Open DataBase.

En [20] se implementa un invernadero automatizado en cultivos hidropónicos mediante arduino Mega 2560 para control de temperatura, humedad y luminosidad de igual manera un indicador donde se ha implementado en una aplicación móvil a través del desarrollador de aplicaciones AppInventor. En dicha aplicación móvil se reciben los estados de los actuadores, y la información de cada uno de los sensores.

También en [21] se implementa un control automático sobre las variables de temperatura, humedad con el fin de regularlas y mantenerlas en un equilibrio óptimo para la salud de las plantas micropropagadas, a su vez llevar un registro de dichas variables todo desde labview usando una tarjeta de adquisición de datos.

En otro proyecto [22] realizan un diseño de automatización de riego, calefacción y aireación de un invernadero en cultivos ornamentales a través de la comunicación de X10 y LabVIEW, realizando una base de datos para tener un registro de la lectura de los sensores en Excel.

1.3. Componentes del sistema de monitorización y control

En este apartado se abordan los conceptos generales de algunos componentes para el control del microclima del invernadero, así como técnicas de comunicación, para dar un panorama más general, también para comprender los controladores basados en eventos y sus aplicaciones.

1.3.1. Invernadero

Un invernadero es un espacio cerrado apropiado para el óptimo desarrollo de una plantación específica. A partir del estudio técnico de ambientación climática [23], es necesario obtener en él, la temperatura, la humedad relativa y la ventilación apropiadas para alcanzar alta productividad a bajo costo, en menos tiempo, sin daño ambiental, protegiendo al cultivo de lluvias, granizo, heladas, insectos o excesos de viento perjudiciales.

De acuerdo con la norma UNE-EN13031-1 establecida en 2002 se entiende por invernadero, Figura.1.1 la estructura utilizada para el cultivo y/o protección de plantas, que favorece la transmisión de la radiación solar bajo condiciones controladas con el fin de mejorar el ambiente de desarrollo de las plantas, presentando tales dimensiones que permita a las personas trabajar en su interior. [24]

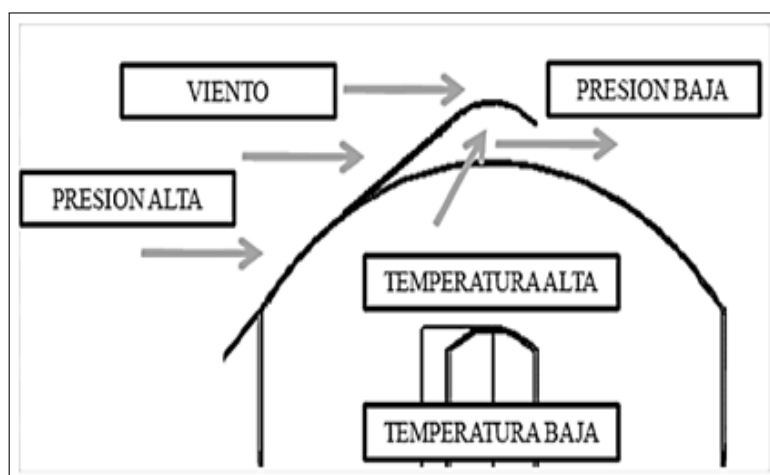


Figura 1.1: Condiciones de un invernadero

Para el caso de un cultivo protegido como se muestra en [25], los objetivos son los siguientes:

- Reducir las necesidades de agua.

- Proteger los cultivos de las bajas temperaturas.
- Reducir la velocidad del viento.
- Reducir daños de plagas, enfermedades, nematodos, malas hierbas, pájaros y otros depredadores.
- Extender las áreas de producción y los ciclos de cultivo.
- El control climático permite optimizar la productividad y calidad
- Estabilizar los suministros de productos de alta calidad a los mercados hortícolas

1.3.2. Raspberry Pi 4B

En la Figura.1.2 se presenta un pequeño ordenador personal llamado Raspberry Pi, diseñado como una herramienta para el aprendizaje de programación de computadores y de diseño de sistemas electrónicos digitales.

Es el primero de una nueva generación de computadoras Raspberry Pi compatibles más RAM y rendimiento de CPU, GPU y E / S significativamente mejorado; todo dentro de una forma similar factor, envolvente de potencia y costo como la generación anterior Raspberry Pi 3B [1].

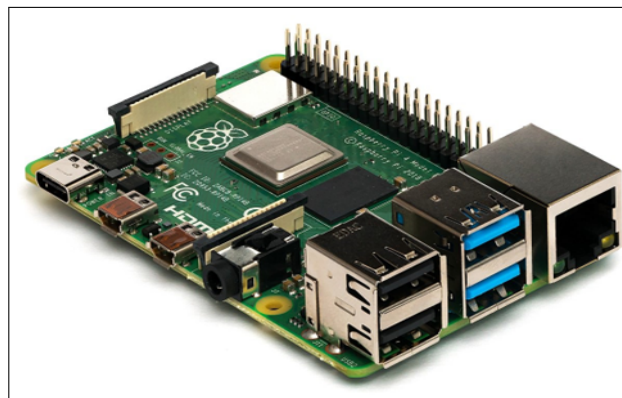


Figura 1.2: Raspberry Pi 4B [1]

Las características de la Raspberry Pi 4 modelo B son las siguientes:

- Sistema en un chip: Broadcom BCM2711.
- CPU: Procesador de cuatro núcleos a 1,5 GHz con brazo Cortex-A72.

- GPU: VideoCore VI.
- Memoria: 4GB LPDDR4 RAM.
- Conectividad: 802.11ac Wi-Fi / Bluetooth 5.0, Gigabit Ethernet.
- Vídeo y sonido: 2 x puertos micro-HDMI que admiten pantallas de 4K@60Hz a través de HDMI 2.0, puerto de pantalla MIPI DSI, puerto de cámara MIPI CSI, salida estéreo de 4 polos y puerto de vídeo compuesto.
- Puertos: 2 x USB 3.0, 2 x USB 2.0.
- Alimentación: 5V/3A vía USB-C, 5V vía cabezal GPIO

1.3.3. Protocolo de comunicación IoT

IoT La arquitectura del sistema suele describirse como un proceso de cuatro etapas en el que los datos fluyen desde los sensores conectados a las cosas a través de una red y, finalmente, a un centro de datos corporativo o a la nube para su procesamiento, análisis y almacenamiento.[2]

En la Internet de las Cosas, una cosa puede ser una máquina, un edificio o incluso una persona. Los procesos de la arquitectura IoT también envían datos en la otra dirección en forma de instrucciones o comandos que indican a un actuador u otro dispositivo conectado físicamente que realice alguna acción para controlar un proceso físico. Un actuador puede hacer algo tan sencillo como encender una luz o tan importante como detener una cadena de montaje si se detecta un fallo inminente.

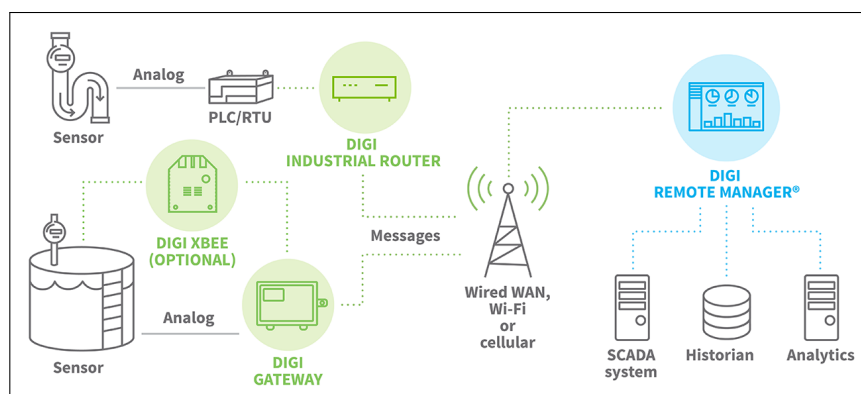


Figura 1.3: Flujo de datos: desde el borde hasta el servidor/nube [2]

1.3.3.1. Etapa de la arquitectura IoT

Fase 1 Actuadores y sensores: El proceso comienza con los sensores y actuadores, los dispositivos conectados que supervisan (en el caso de los sensores) o controlan (en el caso de los actuadores) alguna cosa o proceso físico. Los sensores captan datos sobre el estado de un proceso o una condición ambiental, como la temperatura, la humedad, la composición química, los niveles de fluido en un depósito, el flujo de fluido en una tubería o la velocidad de una línea de montaje, entre otros.

En algunos casos, un sensor puede detectar una condición o evento que requiere una respuesta casi inmediata para que un actuador pueda realizar acciones de corrección en tiempo real, por ejemplo, ajustar el caudal de un fluido, o los movimientos de un robot industrial. En estas situaciones, se requiere una latencia muy baja entre el sensor y el actuador de análisis/disparo. Para evitar el retraso de un viaje de ida y vuelta de los datos al servidor, el análisis de los datos para determinar el fallo y el envío del control a la cosa a controlar, este procesamiento crítico se realiza muy cerca del proceso que se supervisa o controla.

Fase 2 Pasarelas de Internet y sistemas de adquisición de datos: Un sistema de adquisición de datos (DAS) recoge los datos brutos de los sensores y los convierte de formato analógico a digital. A continuación, el DAS agrega y formatea los datos antes de enviarlos a través de una pasarela de Internet mediante WAN inalámbrica (como Wi-Fi o celular) o WAN cableada para la siguiente fase de procesamiento. En este punto, el volumen de datos es máximo. Las cantidades pueden ser enormes, especialmente, por ejemplo, en una fábrica donde cientos de sensores pueden estar recogiendo datos simultáneamente. Por eso, los datos también se filtran y se comprimen hasta alcanzar un tamaño óptimo para su transmisión.

Fase 3 Preprocesamiento, Análisis en la frontera: Una vez que los datos de IoT han sido digitalizados y agregados, necesitarán ser procesados para reducir aún más el volumen de datos antes de que vayan al centro de datos o a la nube. El dispositivo de borde puede realizar algunos análisis como parte del preprocesamiento. El aprendizaje automático puede ser muy útil en esta fase para proporcionar información al sistema y mejorar el proceso de forma continua, sin esperar a que las instrucciones lleguen desde el centro de datos corporativo o la nube. El procesamiento de este tipo suele tener lugar en un dispositivo situado cerca de donde residen los sensores, como en un armario de cableado in situ.

Fase 4 Análisis en profundidad en la nube o en el centro de datos: En la fase 4 del proceso, pueden utilizarse potentes sistemas informáticos para analizar, gestionar y almacenar los datos de forma segura. Esto suele tener lugar en el centro de datos corporativo o en la nube, donde se pueden combinar los datos de múltiples sitios/sensores de campo para proporcionar una imagen más amplia del sistema global IoT y ofrecer

información procesable tanto a los responsables de TI como a los de la empresa. Una empresa puede tener operaciones en diferentes zonas geográficas y los datos de IoT pueden analizarse para identificar tendencias y patrones clave, o para detectar anomalías.

A este nivel, se pueden utilizar aplicaciones específicas del sector y/o de la empresa para realizar análisis en profundidad y aplicar reglas de negocio para determinar si es necesario tomar medidas. Los datos entrantes pueden indicar cambios deseables en la configuración de los dispositivos u otras formas de optimizar el proceso, formando un bucle que facilita la mejora constante. La fase 4 también incluye el almacenamiento en un almacén de datos, tanto para el registro como para el análisis posterior. Para llevar a cabo todo esto es necesario trabajar con protocolos de comunicación en este caso se trabaja con el protocolo MQTT.

1.3.4. Protocolo MQTT

MQTT es un protocolo de mensajería basado en estándares, o un conjunto de reglas, que se utiliza para la comunicación de un equipo a otro. Los sensores inteligentes, los dispositivos portátiles y otros dispositivos de Internet de las cosas (IoT) generalmente tienen que transmitir y recibir datos a través de una red con recursos restringidos y un ancho de banda limitado. Estos dispositivos IoT utilizan MQTT para la transmisión de datos, ya que resulta fácil de implementar y puede comunicar datos IoT de manera eficiente. MQTT admite la mensajería entre dispositivos a la nube y la nube al dispositivo. [26]

MQTT viene de las siglas de "Message Queuing Telemetry Transport" y en un principio, se creó para conectar dispositivos y enviar la información de un sensor a servidores remotos relacionados con el sector de la industria petrolífera. Hoy en día, se utiliza en una amplia variedad de industrias, como la automotriz, la fabricación, las telecomunicaciones, el petróleo y el gas, etc. Sin embargo, está en auge en la Internet de las Cosas (IoT), tal y como hemos dicho, al no consumir demasiados recursos. Conceptos básicos para entender el protocolo. Antes de continuar explicando más, conviene repasar o explicar los términos que se van a usar. Así puedes consultarlos más adelante incluso.

- **Broker** - El broker es el servidor que distribuye la información a los clientes interesados conectados al servidor.
- **Cliente** - El dispositivo que se conecta al broker para enviar o recibir información.
- **Topic** - El nombre del mensaje. Los clientes publican, se suscriben o hacen ambas cosas a un tema.

- **Publicar** - Clientes que envían información al broker para distribuirla a los clientes interesados en base al nombre del tema.
- **Suscribirse** - Los clientes le dicen al agente de bolsa qué tema(s) les interesa(n). Cuando un cliente se suscribe a un tema, cualquier mensaje publicado al broker es distribuido a los suscriptores de ese tema.
- Los clientes también pueden cancelar la suscripción para dejar de recibir mensajes del corredor sobre ese tema.

citado en [26]

¿Cómo funciona el protocolo MQTT?

Su función se asemeja al HTTP porque implementa la pila TCP/IP, pero con pequeñas variaciones. El protocolo MQTT se basa en un modelo de publicación/suscripción (pub-sub) que permite la comunicación asincrónica entre el editor y los clientes suscriptores.

Un cliente MQTT es cualquier dispositivo conectado a la red (por ejemplo, un microcontrolador, un ordenador) que ha implementado la pila TCP/IP y el protocolo MQTT (puede comunicarse usándolo). Hay bibliotecas cliente MQTT listas para usar en diferentes idiomas, por lo que es relativamente sencillo usarlo. Vale la pena mencionar en este punto que un cliente MQTT puede actuar simultáneamente como suscriptor y editor. Los clientes, editor y suscriptor, no se comunican directamente entre sí. Además, un cliente puede reenviar un mensaje a otro cliente sin conocer su dirección IP y su existencia.

¿Cómo es esto posible?

Hay un elemento intermediario en el modelo de publicación/suscripción: el agente de mensajes, conocido como broker. Recibe mensajes de los clientes de publicación y luego los distribuye a los clientes suscriptores correspondientes.

¿Cómo sabe el broker a qué clientes suscriptores enviar un mensaje determinado?

El editor, al enviar un mensaje, le agrega información adicional: un texto llamado "topic", y el broker envía el mensaje a los clientes que se suscriben a este tema (topic).

El siguiente gráfico muestra en la Figura 1.4, la forma en la que un cliente puede transferir información a muchos clientes a un costo muy bajo: todo lo que tiene que hacer es enviar un mensaje al broker y él hará todo el trabajo, y además eficientemente.

Gracias a esto, podemos implementar el cliente en pequeños microcontroladores, como Raspberry, en este caso, el broker necesita muchos más recursos. Después de todo, puede haber muchos clientes conectados a él, tiene que filtrar y enviar muchos mensajes, lidiar con la autenticación y autorización de los clientes, además de almacenar mensajes. Por tanto, se instala en plataformas más eficientes. Afortunadamente, como en el caso del cliente, existen soluciones listas para usar, tanto de pago como gratuitas.

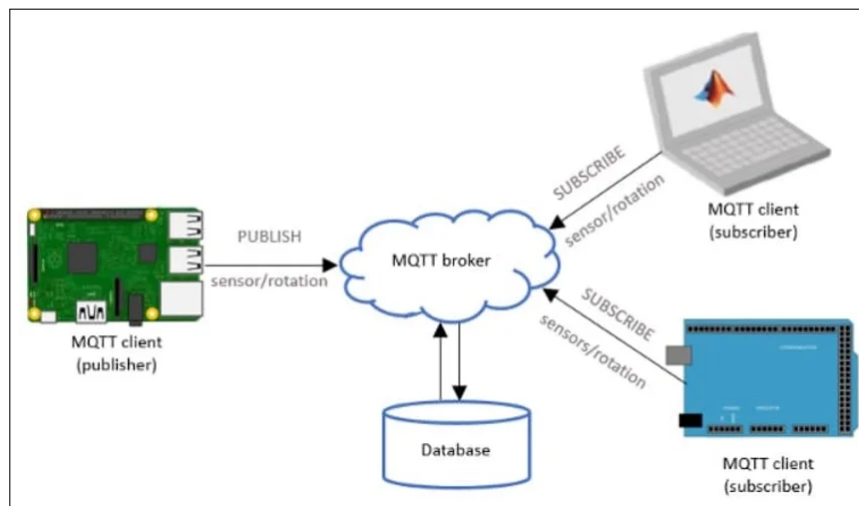


Figura 1.4: Ejecución del servidor MQTT [3]

¿Dónde puede ejecutarse un servidor MQTT?

Un servidor MQTT se puede instalar tanto en un ordenador local, remoto o incluso virtual. También se adapta muy bien a la nube de Internet, por lo que dependerá de tus necesidades específicas y de tus preferencias.

Al MQTT se le llama un protocolo ligero porque todos sus mensajes tienen una pequeña huella de código. Cada mensaje está formado de un encabezado fijo (2 bytes), un encabezado variable opcional, una carga útil del mensaje que está limitada a 256 megabytes (MB) de información y un nivel de calidad de servicio (QoS).

En cuanto a la seguridad del sistema MQTT incluye transporte SSL/TLS y autenticación por usuario y contraseña o mediante certificado. La autenticación se presenta como un nombre de usuario y una contraseña en texto claro, que son enviados por el cliente al servidor esto, como parte de la secuencia de paquetes CONNECT/CONNACK. Durante la fase de comunicación, un cliente puede realizar operaciones de publicación, suscripción, de inscripción y ping. La operación de publicación envía un bloque binario de datos (el contenido) a un tema definido por el editor.

MQTT soporta grandes objetos binarios de mensajes (BLOBs) de hasta 256 MB de tamaño. El formato del contenido será específico de la aplicación. Las suscripciones a los temas se realizan utilizando un par de paquetes SUBSCRIBE/SUBACK, y la cancelación

de la suscripción se realiza de forma similar utilizando un par de paquetes UNSUBSCRIBE/UNSUBACK [3].

1.4. Características del hongo seta (*Pleurotus ostreatus*)

Pleurotus es el termino de una gama de hongos comestibles, conformados por agua, hidratos de carbono y lípidos. El termino *Pleurotus* deriva del griego *pleuron* (costado o lado) y del latín *otus* (oreja). *Pleurotus* es el género perteneciente al reino Fungi, que crecen en maderas duras como el roble y el encino y es uno de los más comunes descomponedores de la madera, se desarrolla en condiciones de los bosques templados y bosques tropicales del mundo. *Pleurotus* especie *ostreatus* es un hongo comestible saprófito, que es conocido en algunos lugares como hongo seta, hongo de cazahuate, u hongo ostra, es considerado un alimento de alta calidad para consumo humano, con sabor y textura apreciable y sobre todo por su valor nutritivo. La ubicación taxonómica permite clasificar a los hongos, como a otros seres vivos siguiendo una serie de caracteres morfológicos y biológicos, a continuación, se presenta la ubicación propuesta para *Pleurotus* [27].

1.4.1. Ciclo de vida del *pleurotus ostreatus*

En la Figura 1.5 se observa el ciclo de vida de *Pleurotus*, el cual consiste en dos fases: La Fase vegetativa la cual comienza con la germinación de una basidiospora, la cual establece un micelio primario que se caracteriza por tener un crecimiento indefinido. Este micelio primario interactúa con otro micelio primario compatible a través de la plasmogamia, para dar origen a un micelio secundario, llamado también dicarion. El dicarion presenta núcleos haploides en cada compartimento hifal, cada uno proveniente de su respectivo micelio primario, también tiene un crecimiento y en cada septo tiene pequeños apéndices llamados fíbulas, lugar por donde los núcleos migran [27].

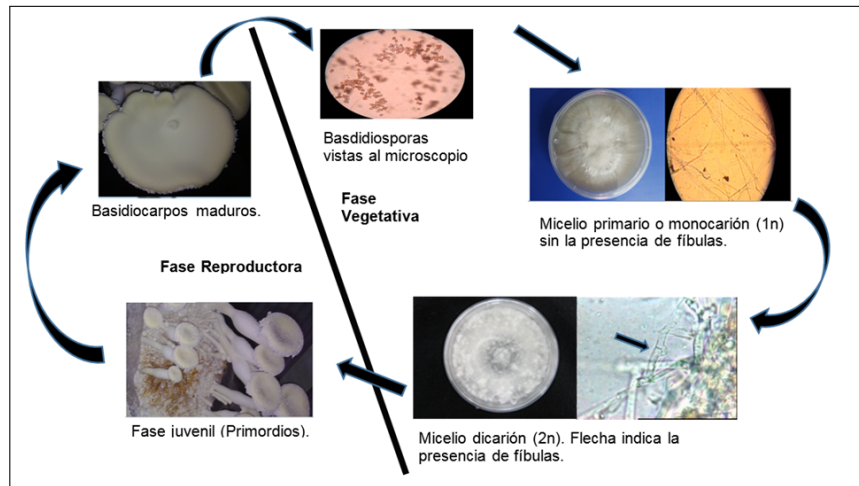


Figura 1.5: Ciclo de vida *Pleurotus* [28]

Cuando las condiciones son adecuadas inicia la fase reproductora, en donde el micelio dicariótico puede diferenciarse para originar uno o varios basidiocarpos, en cuyo himenio formado por un gran número de láminas, se localizan los basidios. Los basidios son estructuras especializadas en donde ocurre la fusión de los núcleos haploides formando un núcleo diploide. Posteriormente, dicho núcleo diploide sufre el proceso de meiosis, en este proceso el material genético se recombina y se segrega originando cuatro núcleos haploides, los cuales formarán parte de las cuatro basidiosporas localizadas en la parte externa del basidio. Si las condiciones son apropiadas nuevamente las basidiosporas vuelven a germinar iniciando de nuevo el ciclo [29].

1.4.2. Características nutrimentales

Existe un gran interés en la producción de este hongo debido a su alto valor nutricional, ya que contiene una gran cantidad de carbohidratos. Su contenido de fibra dietética, principalmente de quitina (la cual es efectiva para evitar la obesidad ocasionada por la absorción de grasas) también es alto. *Pleurotus*, empezó a cultivarse en América a fines del siglo XIX. Aunque este hongo nunca es mencionado en los primeros lugares entre los hongos medicinales, ofrece muchos beneficios. *Pleurotus* ayuda a mantenernos sanos y hábiles para superar enfermedades y heridas y puede ayudar a desacelerar los procesos de envejecimiento aliviando las molestias de la senectud. *Pleurotus* es un alimento consumido diariamente en todo el mundo desde hace siglos y no se ha encontrado toxicidad alguna en animales o seres humanos. Son fuente de vitaminas, fibras, minerales, y aportan de 150 a 350 calorías por kilogramo además de sus propiedades medicinales [9].

Proteínas

El valor nutritivo de *Pleurotus* ssp. ha sido reconocido desde hace mucho tiempo, sus proteínas, las cuales contienen todos los ácidos aminoácidos (alanina, el ácido glutámico y la glutamina), son de valor nutritivo más alto que las proteínas de plantas, con la calidad muy cercana a la proteína animal [30].

Carbohidratos

En particular el *Pleurotus ostreatus* tiene un contenido elevado de carbohidratos de 5% y 14% de fibra cruda, de los cuales el 474% es fibra dietética. Dentro de los carbohidratos que contienen dichos hongos, se encuentran pentosas, hexosas, sacarosa, azúcares-ácidos metil-pentosas y amino azúcares como la quitina [30].

Minerales

Los hongos absorben todos los minerales que contienen el substrato donde son cultivados, por lo general contienen buena cantidad de fósforo, potasio y calcio en menor cantidad. En el caso de *Pleurotus*, se han encontrado además buenas cantidades de zinc, cobre, magnesio, hierro y manganeso. También se ha demostrado que la ingesta de setas, permite una mejor absorción de minerales a nivel intestinal esto es debido a la presencia de metaloproteínas [30].

Vitaminas

Los contenidos de ácido ascórbico (vitamina C) son muy altos, hasta de 90 a 144mg/100g. Del peso seco por lo que pueden ser muy buena fuente de antioxidantes y agentes reductores para el uso de medicamentos y complementos nutricionales estos pueden ser utilizados en el tratamiento del escorbuto la diabetes hipoglucemia, cáncer etc [30].

1.4.3. Propiedades medicinales

Estudios mostraron que las setas tienen efectos anti-mutagénicos y protectores contra radiación lo cual hace de él un estupendo aliado en los tratamientos de cáncer a base de radioterapia. Muchos hongos han sido empleados durante siglos en la medicina tradicional, especialmente en China y Japón. Hoy en día se han realizado estudios que permiten afirmar que muchas especies de hongos son en realidad alimentos funcionales con propiedades medicinales comprobadas. Entre las propiedades de los hongos encontramos efectos antitumorales, inmunomodulatorios, cardiovasculares, hipocolesterémicos, antivirales, antimicrobianos, antiparasitarios, hepatoprotectores y antidiabéticos [31].

Efectos antitumorales

Se ha demostrado en investigaciones recientes que *Pleurotus* contiene cantidades importantes de polisacáridos de estructura molecular compleja, a los cuales se les ha encontrado una importante capacidad antitumoral, es decir, se ha comprobado a nivel de laboratorio que estas sustancias son capaces de retardar y disminuir el tamaño de algunos tipos de tumores, además de prevenir la formación de estos. Seguramente el mecanismo consiste en que estos polisacáridos actúan como potenciadores de las células de defensa que posteriormente destruyen las células cancerosas sin ocasionar efectos colaterales al enfermo [32].

Efectos antivirales

Se ha encontrado que el micelio de *Pleurotus* contiene una mezcla de diferentes polisacáridos de bajo peso molecular parecidos a la zeatina, la cual contiene citoquinina, sustancia similar a las fitohormonas de las cuales se conoce tiene efectos antivirales y no causa efectos colaterales ni toxicidad en pacientes enfermos. El alto contenido de ácido glutámico, que es un aminoácido que se sabe tiene un efecto estimulante del sistema inmunológico, se encuentra en concentraciones particularmente altas en *Pleurotus* y en forma natural el glutamato monosódico [31].

1.4.4. Etapas de crecimiento de los basidiocarpos de *Pleurotus*.

Para el cultivo de hongos comestibles se utilizan como substratos diversos subproductos agrícolas disponibles en la región, tales como paja de trigo, rastrojos de maíz, pulpa de café, entre otros. Estos substratos se someten a un proceso de pasteurización o esterilización, la cual puede ser por medio de vapor o de agua caliente y posteriormente se siembran con la semilla de la especie deseada. El substrato sembrado se incuba por un período de dos a tres semanas. La obtención de los basidiocarpos varía de acuerdo con la especie, la calidad de la semilla y del substrato, así como de las condiciones ambientales [31].

1.5. Estrategias de control PID

En esta sección primeramente se habla de la estrategia de control basada en tiempo y su implementación en computadora. Después son presentadas las estrategias de control PID basado en eventos.

1.5.1. Estrategia de control PID basado en tiempo

Esta estrategia ha sido ampliamente estudiada, por lo que existe una teoría bien definida, por ejemplo en la literatura se propone la siguiente ecuación.

$$u(t) = k_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (1.1)$$

Donde y es la variable del proceso medido, r ó y_{sp} es la referencia de la variable, u es la señal de control y e es el error de control ($e = r - y$). La variable de referencia es a menudo llamada señal de referencia (set point). La señal de control es así una suma de los tres términos: el término P (es proporcional al error), el término I (es proporcional a la integral del error), y el término D (es proporcional a la derivada del error). Los parámetros del controlador son proporcionales a la ganancia k_p , tiempo integral T_i , y tiempo derivativo T_d . La parte integral pueden ser interpretada como acción de control basada en el pasado. La parte derivativa puede ser interpretada como predicción.

Implementación en computadora

La estrategia de control basada en tiempo es implementada en computadora utilizando la ecuación 1.2, donde cada periodo h_{nom} se actualizará la señal de control.

La señal v implementada en computadora, es la suma de los términos proporcional, integral y derivativo, la salida del controlador es $u = sat(v)$, donde sat es la función de saturación que modela el actuador. La implementación del término proporcional $k_p(\beta(r - y))$ es simple solo se remplazan las variables continuas con su versión muestreada. Por lo tanto:

$$P(t_k) = k_p(\beta(r(t_k) - y(t_k))) \quad (1.2)$$

Donde t_k denota el instante de muestreo que es el tiempo donde la computadora lee una entrada. El operador da h_{nom} que representa el periodo de muestreo, así que $t_{k+1} = t_k + h_{nom}$. El término integral es obtenido aproximando la integral con la suma.

$$I(t_{k+1}) = I(t_k) + k_i h_{nom} e(t_k) + \frac{h_{nom}}{T_t} (sat(v) - v) \quad (1.3)$$

Donde $T_t = h_{nom}/k_t$ representa el término anti-windup. El término de derivada filtrada D es dado por la ecuación en diferencias

$$D(t_k) = \frac{T_f}{T_f + h_{nom}} D(t_k - 1) - \frac{k_d}{T_f + h_{nom}} (y(t_k) - y(t_k - 1)) \quad (1.4)$$

1.5.2. Estrategias de control PID basado en eventos

En este apartado se muestran las más emblemáticas estrategias de control PID y PI basado en eventos que han sido propuestas en la literatura .

Control PID basado en eventos propuesto por Árzén:

La decisión de calcular una nueva señal de control es tomada cuando se cruza cierto nivel. El controlador propuesto en [33] se basa en dividir el controlador en dos partes: 1) la lógica de detección de eventos y 2) la lógica de control. El detector de eventos se ocupa de indicar a la lógica de control que debe producir una acción de control debido a que se dan las circunstancias adecuadas, es decir cuando se cruza el nivel propuesto. La lógica de detección de eventos es síncrona y está sujeta a un periodo de muestreo nominal de forma que cada h_{nom} se examina si se cumplen las condiciones necesarias para activar la lógica de control. Las dos condiciones de activación del control PID basado en eventos de Árzén son las siguientes:

$$|e(t_a) - e(t_a - 1)| \geq q_{nom} \quad \text{ó} \quad (t_k - t_{k-1}) \geq h_{max} \quad (1.5)$$

Las condiciones anteriores expresan que el cálculo de una nueva acción de control puede producirse ante dos situaciones: por error o por tiempo. La primera de las condiciones analiza si el valor absoluto de la diferencia entre el valor actual del error $e(t_a)$, y el valor del error en que se disparó el cálculo de la última acción de control $e(t_a - 1)$, supera un umbral q_{nom} , esta condición es llamada *condición relativa*. La segunda condición es una medida de seguridad que obliga a producir una nueva acción de control cuando el tiempo transcurrido desde que se calculó la última supera un límite h_{max} . En el trabajo de Árzén, si se cambia la señal de referencia después de un periodo de estado estacionario largo, aparecerán importantes sobre tiros. La parte integral de la ecuación 1.6 del controlador PID basado en eventos, es responsable de estos sobre tiros. Donde t_a es el instante actual donde se detectó un evento, t_{a-1} es el instante anterior donde se detectó un evento.

$$u_i(t_a) = u_i(t_{a-1}) + K_i \cdot h(t_a) \cdot e(t_a) \quad (1.6)$$

Después de esperar a un evento durante mucho tiempo, el valor de $h(\cdot)$ se va haciendo muy grande [4]. Mientras no ocurre un evento $u_i(t_a)$ crece desmedidamente, el valor de $e(\cdot)$ aumenta drásticamente y así termina el estado estacionario. El cálculo de la parte integral necesita del producto $he(\cdot)$ que es llamado *ganancia integral*, este producto explota al final del intervalo del estado estacionario. El estado estacionario se puede dividir en dos partes (ver Figura 1.6), que son: *i*) el intervalo de tiempo donde la señal está realmente en estado estacionario y *ii*) el intervalo de tiempo requerido para detectar un nuevo cruce

de nivel. La primera parte inicia después del cálculo de la última señal de control, es en el instante de muestreo t_{a-1} y termina justamente después de que la señal de referencia cambia.

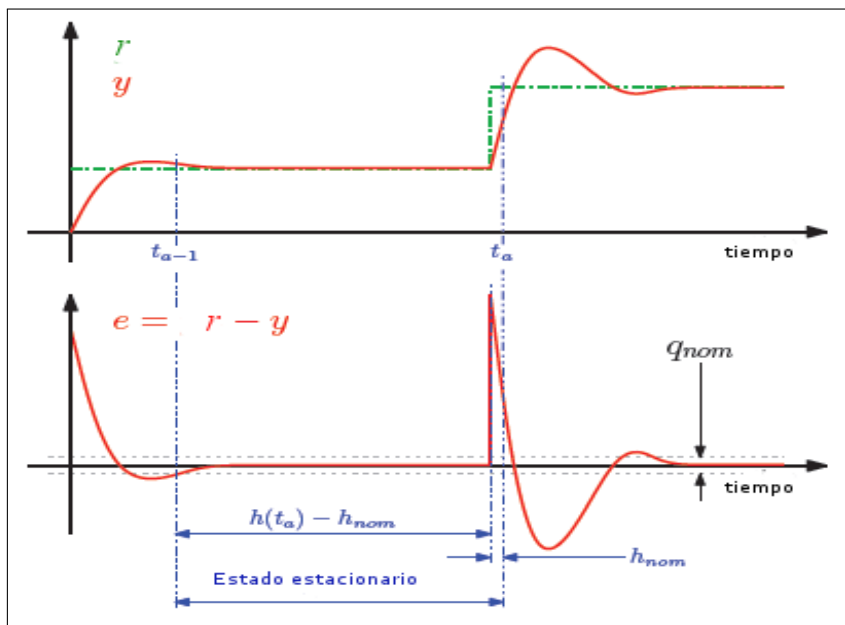


Figura 1.6: Descomposición de un intervalo de estado estacionario [4].

Nuevas estrategias de control

El trabajo original de Årzén tiene un periodo máximo de seguridad h_{max} que fuerza el cálculo de la señal de control, si la señal medida permanece sin cambios; esta condición parece haber sido agregada por razones de inestabilidad, para que se cumpla la condición del teorema de muestreo de Nyquist-Shanon. Sin embargo con estas nuevas estrategias se propone remover el límite de periodo máximo de seguridad gracias a la detección de nivel, ya que la condición de muestreo de Nyquist-Shannon no tiene sentido en este nuevo paradigma. En [34] se muestran los resultados experimentales de estas estrategias basadas en eventos. En esta sección se estudian cuatro de las estrategias de control PID basado en eventos que evitan volver a calcular la señal de control.

En estas estrategias se sustituye la condición relativa propuesta por Årzén por la absoluta $abs(e(t_a)) > q_{nom}$, donde una nueva señal de control es calculada tan pronto como el error actual cruza el nivel q_{nom} . Con este método el número de muestreos aumenta inevitablemente durante los transitorios, pero el error entre el sistema y la referencia seguramente es menor que q_{nom} durante el periodo de estado estacionario. Este método es requerido por controladores basados en eventos sin condición límite de seguridad h_{max} , para asegurar que un estado estacionario es realmente activado antes de decidir no actualizar la señal de control mientras la referencia no cambia, o no ocurre una perturbación. Como un resultado

la señal medida y tiene que rastrear la referencia esperada r durante el intervalo de estado estacionario, que significa un pequeño error (y no un pequeño error relativo, por que el error relativo podría ser pequeño, $abs(e(t_a) - e(t_{a-1})) > q_{nom}$, mientras el sistema esté lejos de la referencia). Estas estrategias basadas en eventos fueron propuestas en ([34], [4]):

Estrategia 1: Únicamente sin condición de límite de seguridad

Este algoritmo corresponde al de Árzén donde la condición de límite de seguridad $h(t_a) \geq h_{max}$ es removida. Para este primer algoritmo, la parte integral queda expresada por la siguiente.

$$\begin{aligned} u_i(t_a) &= u_i(t_{a-1}) + K_i \cdot he(t_a) \\ \text{Donde } he(t_a) &= h(t_a) \cdot e(t_a) \end{aligned} \quad (1.7)$$

Se esperan importantes sobre tiros después de un largo intervalo de estado estacionario.

Estrategia 2: Saturación de la ganancia integral

Este segundo algoritmo consiste en reducir el producto $he(\cdot)$ después de un largo intervalo de estado estacionario, en orden para reducir los sobre-impulsos. De esta manera la ganancia integral es limitada. La parte integral queda definida por la siguiente ecuación.

$$\begin{aligned} u_i(t_a) &= u_i(t_{a-1}) + K_i \cdot he_{sat}(t_a) \\ \text{Donde } he_{sat}(t_a) &= (h(t_a) - h_{nom}) \cdot q_{nom} + h_{nom} \cdot e(t_a) \end{aligned} \quad (1.8)$$

En (1.8) la ganancia integral $he(\cdot)$ es limitada superiormente durante el tiempo de detección de un transitorio por el producto $h_{nom} \cdot e(t_a)$. El periodo de estado estacionario corre únicamente del instante de tiempo t_{a-1} a $t_a - h_{nom}$ que es igual al intervalo de tiempo $h(t_a) - h_{nom}$. Durante este periodo, el error permanece muy pequeño, el error es menor que el nivel de detección q_{nom} de lo contrario el estado estacionario no sería logrado, y así es el producto $he(\cdot)$. De esta manera, la ganancia integral también se limita superiormente por el producto $(h(t_a) - h_{nom}) \cdot q_{nom}$. A pesar de limitar la ganancia integral todavía aumenta con respecto a $h(\cdot)$ y $e(\cdot)$.

Estrategias 3: Factor de olvido exponencial del intervalo de muestreo

Otro método consiste en reducir el impacto del intervalo de muestreo que principalmente aumenta durante el intervalo de estado estacionario. Por eso se agrega el factor de olvido exponencial del intervalo de muestreo. Se elige una función exponencial para disminuir este impacto cuando el tiempo del estado estacionario aumenta, que está dada por la siguiente ecuación:

$$h_{exp}(t_a) = h(t_a).exp(\alpha.(h_{nom} - h(t_a))) \quad (1.9)$$

Donde el parámetro α permite un grado de libertad o disminuye el intervalo exponencial de muestreo. Esto produce un intervalo de muestreo exponencial $h_{exp}(\cdot)$ en la parte integral del controlador como el siguiente:

$$\begin{aligned} u_i(t_a) &= u_i(t_{a-1}) + K_i \cdot h_{exp}(t_a) \\ \text{Donde } h_{exp}(t_a) &= h_{exp}(t_a) \cdot e(t_a) \end{aligned} \quad (1.10)$$

Esta función permite tener *i*) un intervalo de muestreo nominal durante los transitorios, donde $h(t_a) = h_{nom}$, el intervalo de muestreo exponencial es $h_{exp}(t_a) = h_{nom}$ y *ii*) una disminución exponencial del intervalo de muestreo durante los intervalos de muestreo de estado estacionario. Sin embargo, el producto $he(\cdot)$ es más grande cuando el intervalo de muestreo es pequeño.

Estrategia 4: Híbrida

Finalmente este algoritmo es una mezcla entre la saturación de la ganancia integral y el factor de olvido exponencial del intervalo de muestreo. La idea es tener un menor impacto del intervalo de muestreo todo el tiempo. Por esa razón, el factor de olvido exponencial dado en (1.10) se usa dentro del algoritmo de saturación (1.8). Así el producto $he(\cdot)$ es ahora limitado superiormente por $(h_{exp}(t_a) - h_{nom}) \cdot q_{nom} + h_{nom} \cdot e(t_a)$ y la parte integral llega a ser:

$$\begin{aligned} u_i(t_a) &= u_i(t_{a-1}) + K_i \cdot h_{hibrida}(t_a) \\ \text{Donde :} & \\ h_{hibrida}(t_a) &= (h_{exp}(t_a) - h_{nom}) \cdot q_{nom} + h_{nom} \cdot e(t_a) \end{aligned} \quad (1.11)$$

Capítulo 2

Metodología

En este capítulo se examinan el diseño y la construcción del invernadero, así como la configuración de redes. Se lleva a cabo la validación del modelo matemático, considerando todas las variables que influyen en el microclima. Se comparan los resultados obtenidos del funcionamiento del invernadero real y virtual. Además, se aborda el diseño de los circuitos necesarios para el funcionamiento del invernadero, junto con la programación en Simulink de Matlab.

2.1. Diseño y construcción del prototipo

Para llevar a cabo la construcción se eligió la estructura tipo capilla es decir con base rectangular y cubierta a dos aguas, normalmente se recomienda una pendiente de techo entre 15 y 35° según sea la radiación. Las ventajas que caracteriza este tipo de construcción es por la baja complejidad de construcción y no usan materiales caros.

2.1.1. Diseño y modelo 3D

Se realizó un diseño arquitectónico en AutoCAD de autodesk, Figura 2.1 donde se pueden ver las dimensiones en metros a una escala 10 : 1 del real para obtener un volumen de 0.33m con una altura de 60cm, las vistas que lo componen son; alzado frontal, alzado lateral, planta e isotérmico a 30° ver Figura 2.1. El diseño cuenta con una abertura en el techo que permitirá observar, introducir o sacar el cultivo.

Siguiendo el plano se muestra el modelo en 3D diseñado en Tintercad para dar una panorama de como será el prototipo final del invernadero con actuadores, sensores y circuito de control ver Figura 2.2 Figura 2.3.

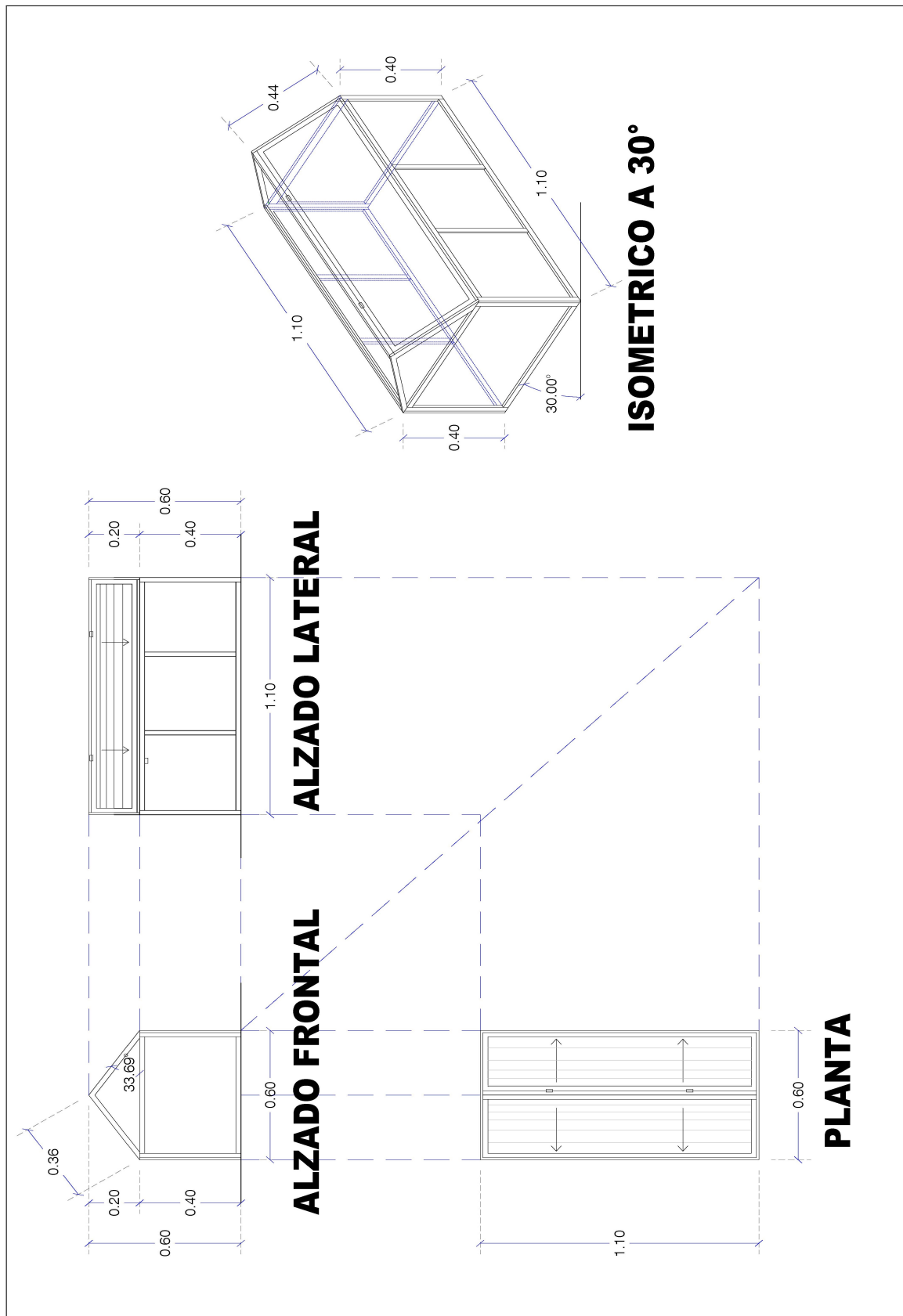


Figura 2.1: Desdoblamiento isométrico de prototipo de invernadero.

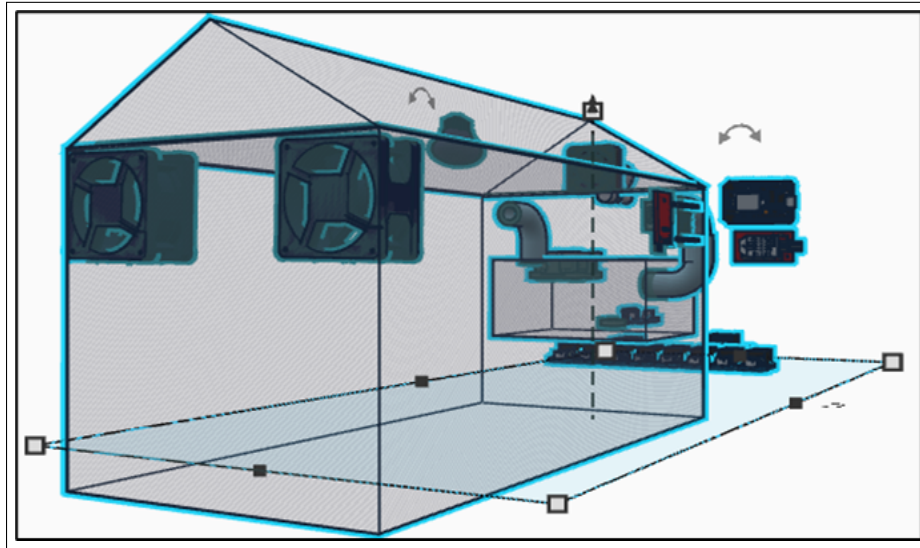


Figura 2.2: Diseño 3d vista frontal y lateral izquierdo.

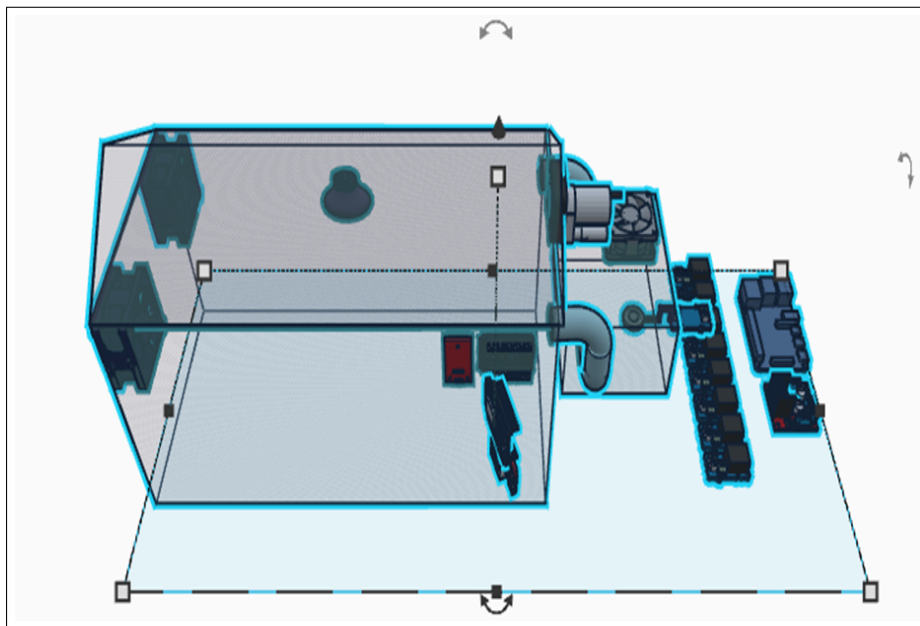


Figura 2.3: Diseño 3d vista superior.

2.1.2. Construcción de estructura

Para la construcción de la estructura y la cubierta del invernadero, se emplearon diversos materiales. En la Tabla 2.1 se presenta una lista detallada que incluye la descripción, cantidad y medidas de los materiales utilizados en la construcción del invernadero tipo capilla.

Tabla 2.1: Lista de materiales para construcción de invernadero

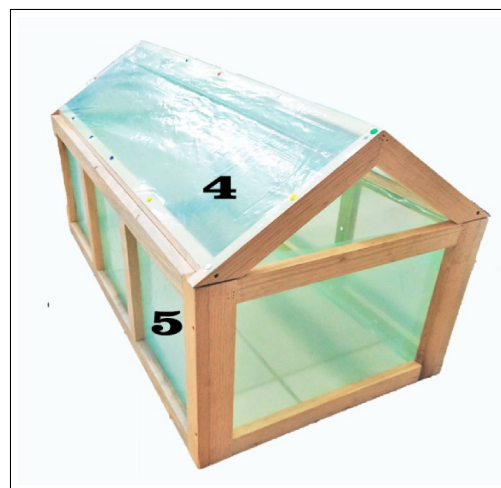
Materiales	Pieza	Medida
Viga de madera	2	2.5x1x2cm
Hule para invernadero color verde	1	5 m
Hule color negro	1	5m
Bisagra Rectangular de acero latón	2	2.54cm
Pija negra	50	3/4pulg

A continuación, en la Figura 2.4, se presenta la estructura construida utilizando los materiales mencionados anteriormente, donde se pueden observar los siguientes detalles:

1. Ventana
2. Cubierta frontal tipo capilla
3. Alzado frontal
4. Planta
5. Alzado lateral izquierdo



(a) Lateral derecho



(a) Lateral izquierdo

Figura 2.4: Estructura y cubierta de invernadero

2.2. Instalación de sistema de microclima

El siguiente paso consiste en la instalación de los sistemas encargados de controlar el microclima dentro del invernadero. Estos sistemas son:

- Sistema de ventilación forzada Frontal
- Sistema de Nebulización
- Sistema de Calefacción
- Sistema de luz artificial
- Circuito de control (red de sensores)

2.2.1. Sistema de ventilación forzada

El sistema de ventilación forzada está compuesto por dos ventiladores helicoidales pequeños ubicados en la parte frontal del invernadero, tal como se muestra en la Figura 2.5. Estos ventiladores facilitan tanto la entrada como la salida de aire, garantizando un flujo constante dentro del invernadero. Dado que no se dispone de un sistema de ventanas o cortinas automáticas para la circulación del aire mediante la apertura, este sistema opera de manera continua, día y noche. Su función principal es favorecer el intercambio de gases, previniendo el aumento de humedad en temperaturas bajas y estimulando la transpiración en condiciones de elevada temperatura [35]. Es crucial destacar su importancia durante la fase vegetativa (segunda etapa), donde se requiere una mayor concentración de oxígeno, como en los procesos de degradación de lignina y crecimiento hifal, donde cesan y se inician la reproducción. La síntesis de proteínas y ácidos nucleicos en los hongos demanda un metabolismo elevado, lo que resulta en un incremento en la necesidad de oxígeno [28].

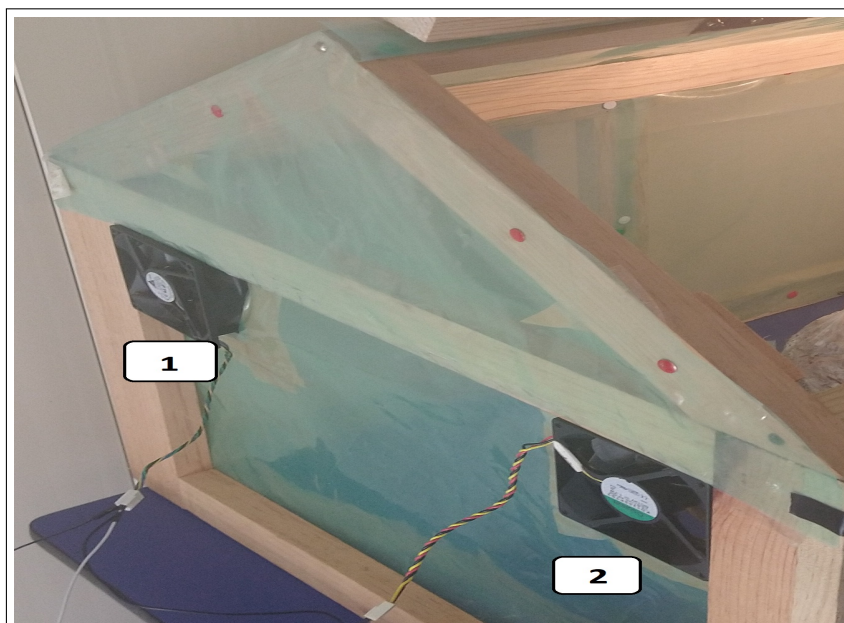


Figura 2.5: Ubicación de ventiladores para circulación de aire

2.2.2. Sistema de nebulización

El propósito del sistema de nebulización es reducir la temperatura y aumentar la humedad dentro del invernadero. A continuación, se presenta una lista detallada de los materiales necesarios para la construcción de este sistema, que se puede consultar en la Tabla 2.2. Los elementos están enumerados de acuerdo con la lista de materiales, que se muestra en la Figura 2.6.

Tabla 2.2: Lista de materiales para construcción de sistema de nebulización.

Numero	Materiales	Pieza	Medida
1	Humidificador ultrasonico de 24v	1	3.5 ϕ x 3 cm
2	Ventilador de 12v	1	9.5x9.5m
3	Manguera industrial trasparente surtek	1	5m
4	Recipiente de plástico	1	21x21x12cm

El humidificador convierte el agua en neblina, la cual se almacena en el recipiente. Cuando el ventilador se enciende, aumenta la presión dentro del recipiente, permitiendo que, con la entrada de aire, la neblina sea expulsada a través de las mangueras, garantizando un flujo constante de humedad al invernadero. La velocidad del ventilador determinará la intensidad del flujo de nebulización. ver Figura 2.6.

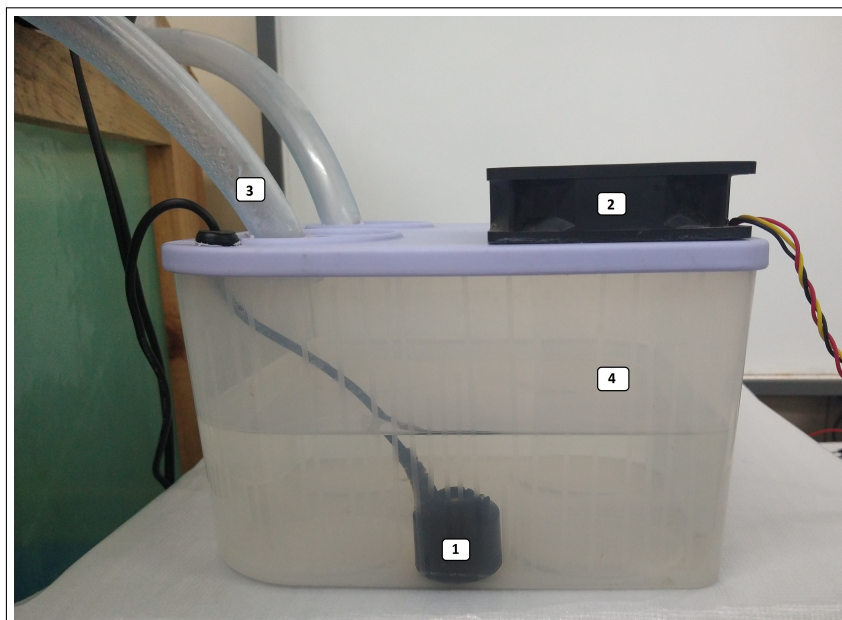


Figura 2.6: Sistema de nebulización

Los hongos requieren niveles elevados de humedad relativa ambiental, que oscilan entre el 60% y el 90%. Si la lectura supera el 90% dentro del espacio de cultivo, es necesario ventilarlo para permitir la mezcla del aire interior y exterior, regulando así la humedad

relativa por debajo del 90 %. De lo contrario, los productores advierten que los primordios pueden morir durante el cultivo. Además, si ya hay presencia de hongos, podrían presentarse estrías o fisuras en ellos, deteniendo su crecimiento de manera irremediable [36]. Estas deformaciones en el desarrollo micelial y en los basidiocarpos son causadas por la falta de control, lo que podría resultar en la pérdida total de la producción y la introducción de agentes biológicos contaminantes en áreas limpias [28].

2.2.3. Sistema de calefacción

El sistema de calefacción tiene como objetivo elevar la temperatura dentro del invernadero durante días de clima frío. Este sistema está compuesto por un ventilador de turbina y una bobina que incrementa su temperatura al ser energizada. Cuando la turbina gira, envía aire hacia la bobina, la cual a su vez expulsa aire caliente al interior del invernadero. Para el cultivo, es necesario mantener un control óptimo de la temperatura, que debe oscilar entre los 18 y 28°C.

En la Figura 2.7, se presenta la vista frontal y trasera del calentador instalado en el invernadero.



(a) Frontal



(a) Trasera

Figura 2.7: Instalación de calentador

2.2.4. Sistema de luz artificial

El sistema de luz artificial tiene como función mantener al invernadero con una luminosidad constante. Algunos estudios sugieren que la alta intensidad lumínica asociada a una alta temperatura puede inhibir e incluso detener el desarrollo del hongo. La radiación ultravioleta (200-300 nm) tiene efectos negativos en el crecimiento vegetativo, produciendo mutaciones y afectando el ADN [37]. Para estos cultivos de hongo seta se requiere de un ambiente en penumbra, es decir a 100 luxes para que el hongo sea de primera calidad, a esta cantidad de luxes el hongo crece bastante tierno y con una coloración muy delicada, hasta una talla de 12 a 15 cm [36].

El circuito eléctrico, como se muestra en la Figura 2.8, ha sido diseñado para supervisar cada actuador y recibir datos de los sensores a través de la red. Está compuesto por una Raspberry Pi 4, que actúa como la computadora central encargada de recibir y enviar señales a los diferentes actuadores. Las ESP8266 son responsables de leer los datos de los sensores DHT22 y enviar la información a ThingSpeak de Matlab. Este último recibe la información desde el bloque ThingSpeak de la Raspberry Pi y la utiliza para lecturas en simulación. Las salidas GPIO de la Raspberry Pi controlan directamente cuatro módulos de relés: uno para los ventiladores de entrada y salida de aire, otro para el control de la luz y, finalmente, uno para encender la bobina del calefactor.

Además, se emplean salidas PWM para ajustar la velocidad de los ventiladores del humidificador y el calefactor. Esto se logra a través de un integrado L293, que no solo protege al controlador sino que también aumenta el voltaje de alimentación. Esto posibilita la regulación de ambos dispositivos y la variación de sus velocidades según las necesidades del invernadero. Se presenta un diagrama interactivo que muestra las conexiones físicas en la Figura 2.9.

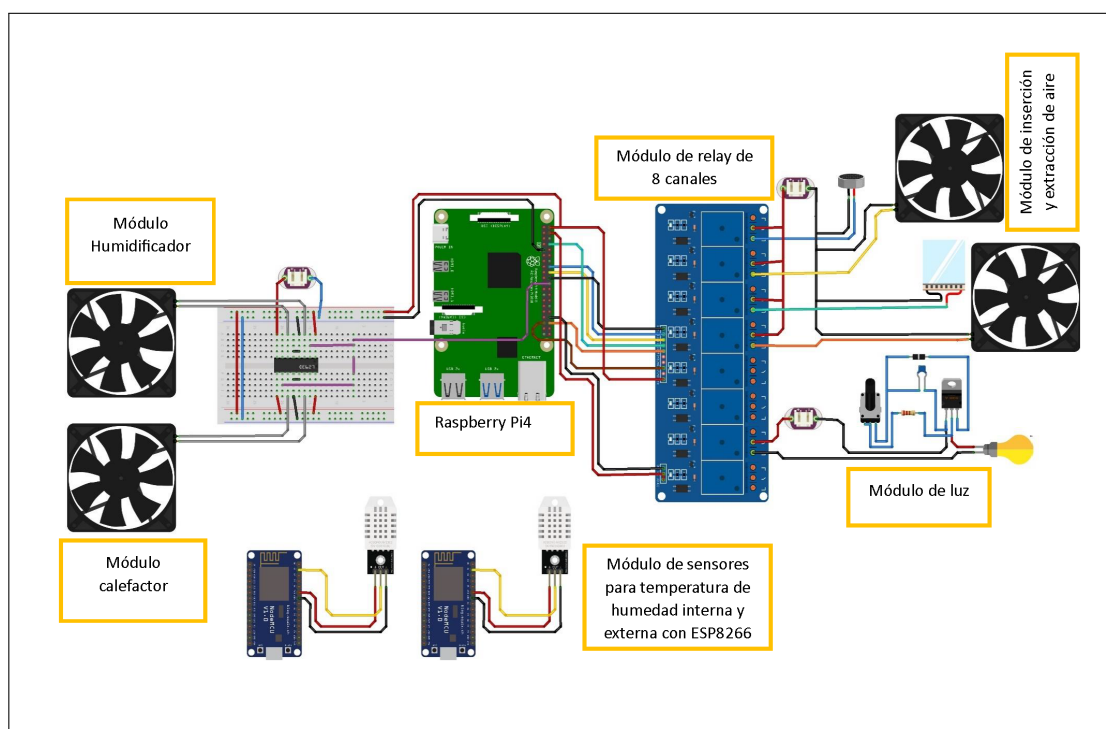


Figura 2.9: Circuito interactivo de conexiones.

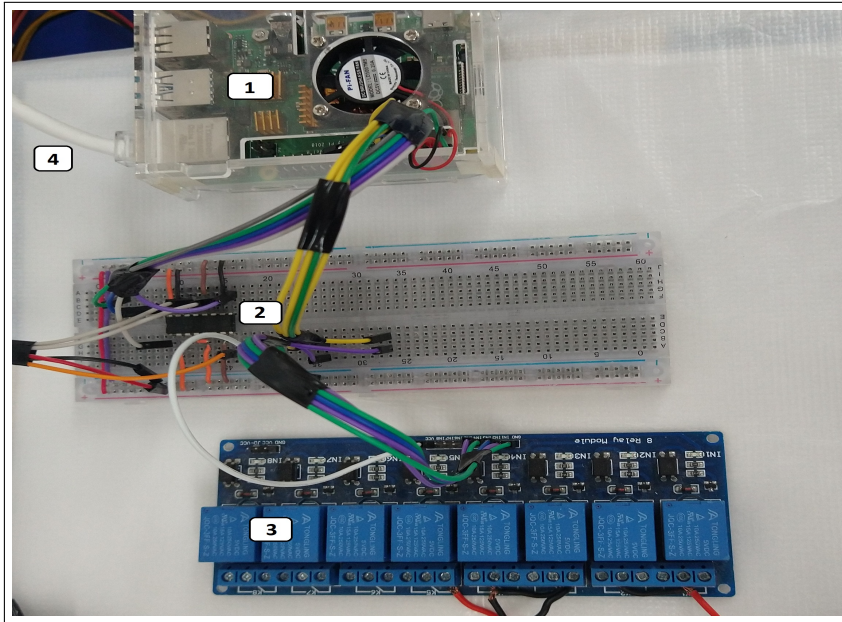
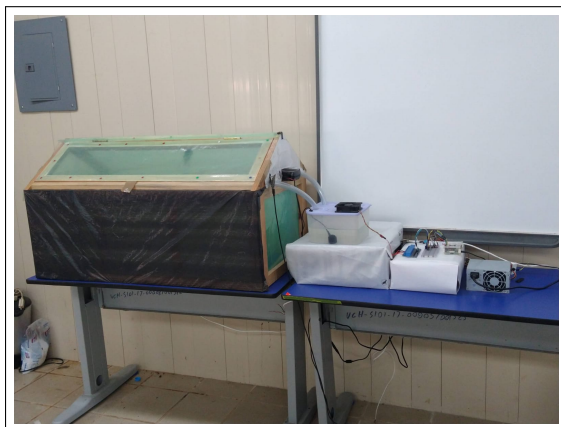


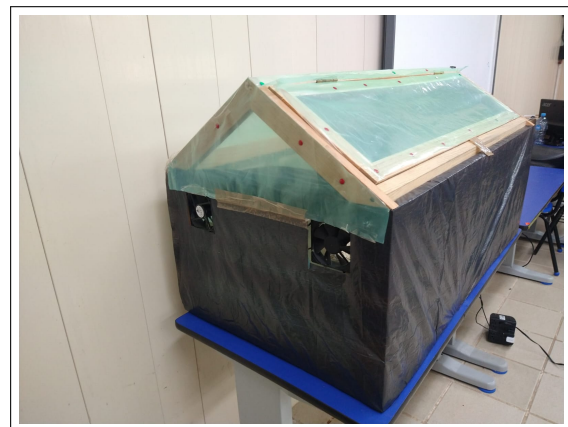
Figura 2.10: Circuito eléctrico físico.

2.2.6. Prototipo de invernadero final

Se realizaron modificaciones al prototipo con el objetivo de alcanzar una iluminación diurna de 100 lux, como se muestra en la Figura 2.11. Esto se logró mediante la implementación de luz artificial proveniente de un foco incandescente, el cual está equipado con un dimmer para ajustar la intensidad lumínica. Estas adaptaciones se llevaron a cabo con el fin de crear y mantener condiciones óptimas en el entorno del invernadero.



(a) Vista lateral izquierda



(b) Vista frontal

Figura 2.11: Prototipo final

2.3. Cultivo de hongo seta

Para el cultivo del hongo seta, se siguió la metodología detallada en la Figura 2.12. Se adquirió el material biológico del laboratorio del Instituto Nacional de Ecología (INECOL) y se procedió siguiendo el protocolo descrito por [38], con algunas adaptaciones. El sustrato utilizado consistió en paja de maíz picada en trozos de aproximadamente 5 cm de longitud, la cual se humedeció hasta alcanzar la saturación y luego se esterilizó en autoclave a 121°C y 1.8 libras de presión durante 15 minutos.

Después de la esterilización, el sustrato se enfrió a una temperatura de 25°C y se procedió a aplicar el inóculo de grano. Para esto, se alternaron capas de paja e inóculo dentro de bolsas de plástico de 1 kg de capacidad. Se utilizó aproximadamente 5 g de inóculo por cada 100 g de sustrato húmedo y se replicó el proceso en 5 ocasiones para obtener repeticiones suficientes.



Figura 2.12: Procedimiento para el cultivo de hongo seta

Las bolsas inoculadas se colocaron en un área con una temperatura de 25°C sin iluminación, en donde tuvo lugar la propagación vegetativa del micelio en el sustrato hasta que lo invadió completamente. Después de aproximadamente 15 días apareciendo los primeros brotes o primordios. En ese momento se retiraron las bolsas de plástico trasladándose al invernadero.

2.4. Elección de sistema de red

Se elaboró una tabla comparativa, como se observa en la Tabla 2.3, para ayudar en la selección del controlador más adecuado para el sistema. Se evaluaron cuatro opciones que

cumplen con las especificaciones necesarias para el control del invernadero, que incluyen:

1. Conexión a Internet
2. Entradas y salidas GPIO para el control de actuadores
3. Sistema operativo compatible
4. Capacidad de ser programable

Tabla 2.3: Tabla comparativa de controladores

Característica	PIC18F4550	Arduino	Raspberry Pi 4B	FPGA	PLC
Tipo de Dispositivo	Microcontrolador	Microcontrolador	Placa de Desarrollo	Dispositivo de Lógica Programable	Controlador Lógico Programable
Arquitectura	Harvard CISC	Harvard RISC	ARM Cortex-A	FPGA Personalizable	Varias, como RISC o CISC
Potencia de Cómputo	Baja	Baja a Media	Media a Alta	Alta	Media a Alta
Sistema Operativo	Sin SO	Depende del modelo	Linux (Raspbian, otros)	No tiene un SO en sí mismo	Depende del modelo
Programación	Ensamblador, C	C, C++, Arduino IDE	C, Python, otros	VHDL, Verilog	Lenguajes Proprietarios
Entradas/Salidas (E/S)	Limitadas E/S	Varía según el modelo	GPIO, USB, HDMI, etc.	Depende de la configuración específica	Varía según el modelo
Comunicación	UART, SPI, I2C, USB	UART, SPI, I2C, USB	Ethernet, Wi-Fi, Bluetooth	Varía según la implementación específica	Ethernet, RS-232, RS-485
Conectividad de Red	Depende de la implementación específica	Depende de la implementación específica	Ethernet, Wi-Fi	Puede depender de la implementación específica	Puede incluir Ethernet
Capacidad de Almacenamiento	Flash, RAM	Depende del modelo	Tarjeta microSD	No tiene almacenamiento propio	Depende del modelo
Aplicaciones Típicas	Controladores básicos, dispositivos embebidos	Proyectos de electrónica, automatización	Servidores, proyectos de IoT	Procesamiento de señales, prototipos de hardware	Automatización industrial

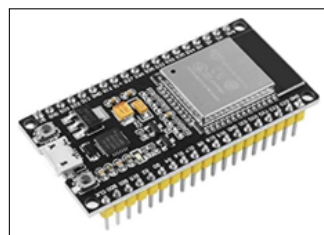
Se eligió la Raspberry PI 4 ver Figura 1.2 por las características que ofrece y por el costo intermedio en comparación con los diferentes controladores (ver la sección 1.3.2).

La Tabla 2.4 presenta distintas opciones de conexión a red. Según las especificaciones del proyecto, no se requiere una red de amplio alcance ni de larga distancia. Por lo tanto, para adaptarse a la proximidad del proyecto, se decidió utilizar la conexión Wi-Fi estándar 802.11ac con una frecuencia de 2.4 GHz, ya que no excede los 15 metros de distancia del área de trabajo.

Tabla 2.4: Tabla comparativa de tipos de red

Característica	Ethernet	Wi-Fi	Fibra Óptica
Velocidad de Transferencia	10 Mbps (Ethernet 10Base-T) a 100 Mbps (Ethernet 100GBase-T)	Varía según el estándar (802.11n, 802.11ac, etc.) 450Mbps Hasta 3.46 Gbps (WiFi 5) y 9.6 Gbps (WiFi 6)	Muy alta velocidad, superando a menudo las capacidades de Ethernet y Wifi 1 Gbps
Confiabilidad	Muy confiable, menos afectado por interferencias	Susceptible a interferencias y obstáculos físicos	Muy confiable, inmune a interferencias electromagnéticas
Latencia	Menos de 1 ms típicamente en conexiones cableadas	Latencia puede ser más alta en comparación con Ethernet	Menos de 1 ms típicamente
Seguridad	Seguridad de capa física, menos vulnerable a interferencias	Seguridad basada en protocolos de encriptación (WPA2, WPA3)	Segura y difícil de interceptar
Rango de Cobertura	Limitado por cables físicos, generalmente hasta 100 metros	Limitado por la distancia al router y obstáculos físicos	550 m para 10 Gbps multimodo, hasta 40 km en un cable de fibra monomodo
Frecuencia	No aplica (cableado físico)	2.4 GHz y 5 GHz (802.11ac, WiFi 5) y 2.4 GHz, 5 GHz y 6 GHz (802.11ax, WiFi 6)	No aplica (luz visible en el caso de fibra óptica)

Se eligieron los siguientes dispositivos Figura 2.13 con las características de conexión a red WiFi.



ESP8266 WiFi



TP-Link

Figura 2.13: Modulo ESP8266 WiFi y TP-Link

El módulo ESP8266 WiFi ofrece las siguientes características: un procesador de 32 bits de bajo consumo, una velocidad de hasta 80MHz (con un máximo de 160MHz), 32 KiB de RAM para instrucciones, una pila de TCP/IP integrada, compatibilidad con Wi-Fi 802.11 b/g/n en la frecuencia de 2.4GHz (con soporte para WPA/WPA2), y certificaciones por FCC, CE, TELEC, Wi-Fi alliance y SRRC. Además, cuenta con 16 pines GPIO y la capacidad de PWM en todos los pines (con resolución de 10 bits).

Por otro lado, el modem TP-Link ofrece las siguientes especificaciones: funciona como un router Wi-Fi en la banda de 2.4 GHz con una velocidad de hasta 300Mbps. Es un dispositivo multimodo, lo que significa que puede funcionar como un router, repetidor o en modo WISP (Wireless Internet Service Provider-Proveedor de servicio inalámbrico de internet).

2.5. Configuración de Raspberry Pi 4B y red de sensores

En las próximas secciones se detallarán con mayor profundidad cada una de las configuraciones de la red de sensores, las comunicaciones entre dispositivos y el monitoreo del sistema.

2.5.1. Configuración de red de sensores

Se incorpora a la red de sensores una ESP8266, un chip Wi-Fi de bajo costo operando a 2.4 GHz, que ofrece seguridad WPA/WPA2, un stack TCP/IP completo, y un microcontrolador integrado.

Además, se incluye un sensor DHT11, el cual está configurado para conectarse a un servidor y realizar lecturas de los sensores de manera simultánea, recopilando información del entorno físico para luego transmitirla a través de una red Wi-Fi. Se ilustra este proceso en la Figura 2.14.

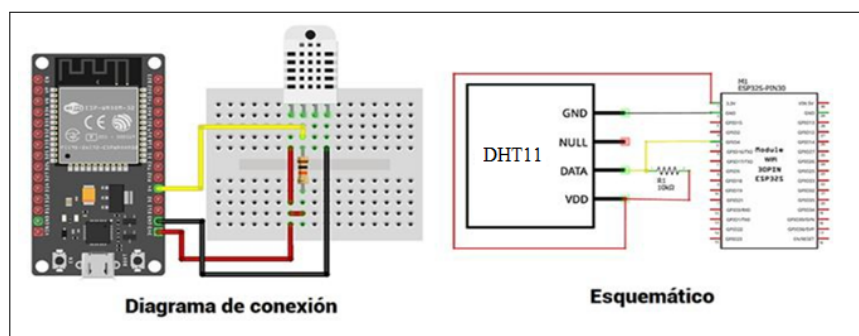


Figura 2.14: Esquemático de conexión de ESP8266 y DHT11

El diagrama de flujo ilustra el proceso de conexión al servidor y el envío de información a ThingSpeak, como se muestra en la Figura 2.15. Los datos recolectados por los sensores se transmiten a través de redes de comunicación para su posterior procesamiento y monitorización, con un intervalo de muestreo de 14 segundos.

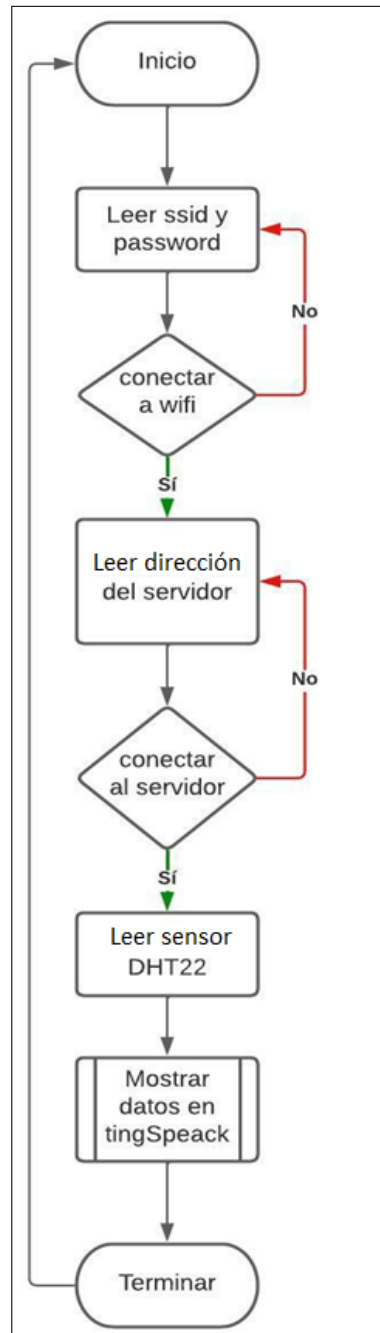


Figura 2.15: Diagrama de flujo de lectura de sensor y conexión a red

2.5.2. Configuración de servidor ThingSpeak

Para la configuración del servidor se necesita crear una cuenta oficial de ThingSpeak, Figura 2.16 una vez iniciado sesión se procede a lo siguiente:

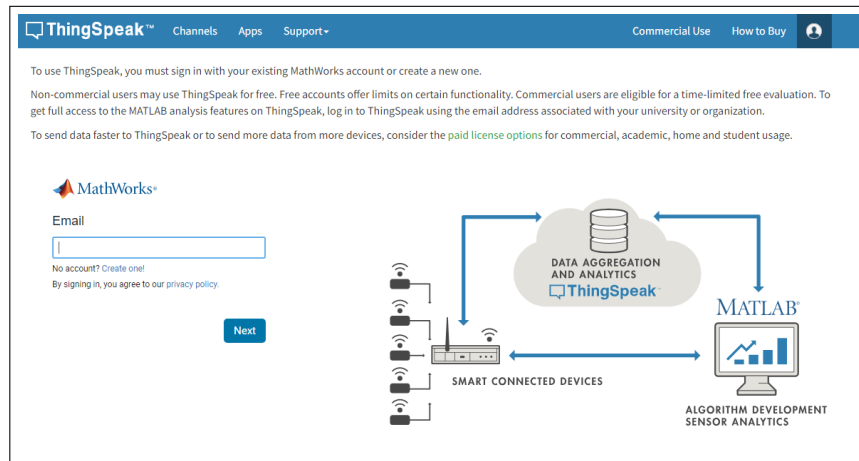


Figura 2.16: Pagina oficial de ThingSpeak

En la ventana principal, se selecciona la opción "New Channel", como se ilustra en la Figura 2.17. Al crear un nuevo canal, se debe asignar un nombre al canal y definir los campos (Fields) necesarios en ThingSpeak. En este caso particular, se utilizarán cuatro campos para recibir la información de temperatura y humedad tanto interior como exterior, como se muestra en la Figura 2.18.

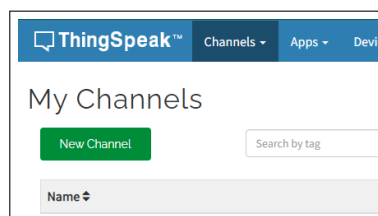


Figura 2.17: Creación de nuevo canal.

También se pueden observar datos como Channel ID, Autor y Access, en el acaso del Channe ID sera útil mas adelante para la lectura de los datos.

Monitoreo en ThingSpeak

ThingSpeak ofrece la posibilidad de monitorear los datos recibidos desde la ESP8266 Wi-Fi de manera gráfica, como se muestra en la Figura 2.19. Esta plataforma también facilita el acceso desde cualquier dispositivo, como se puede apreciar en la Figura 2.20, permitiendo así obtener estadísticas sobre el estado del invernadero desde cualquier ubicación.



Figura 2.18: Ventana de usuario Channel Settings

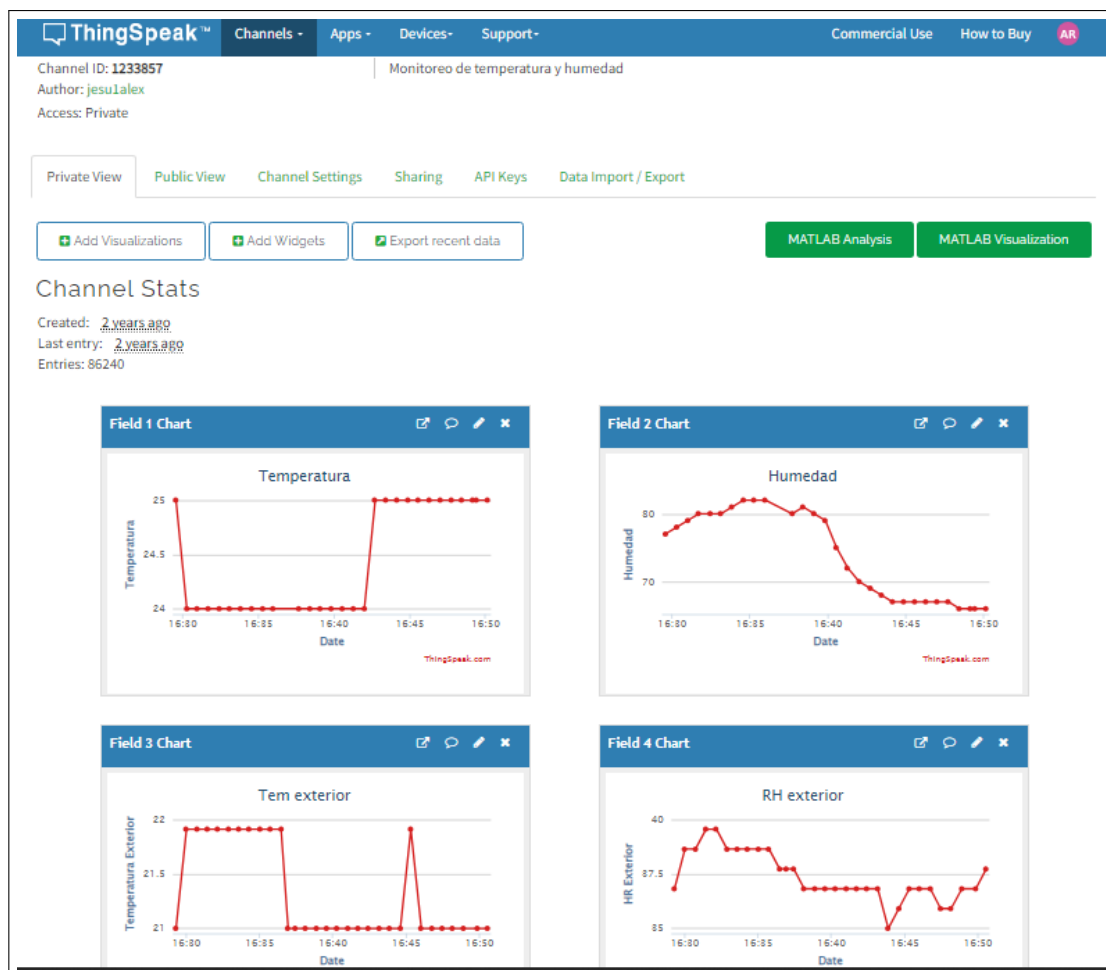


Figura 2.19: Interfaz de monitoreo del invernadero desde PC



Figura 2.20: Interfaz de monitoreo desde teléfono móvil

Entrada de datos a Simulink

Para la entrada de datos a Simulink, hay varias formas de acceder a la información de ThingSpeak. En este caso, se utilizará el bloque "ThingSpeak Input" de la librería Simulink Desktop Real-Time / Internet of Things, además del bloque "ThingSpeak Read" para que la Raspberry Pi pueda leer los datos desde ThingSpeak, como se muestra en la Figura 2.21.

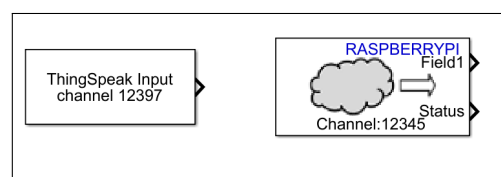


Figura 2.21: Bloques de input y read de ThingSpeak

A continuación se muestra la configuración para recibir la información en simulink para ello se da doble clic al icono y se muestra la siguiente ventana ver Figura 2.22, se da click en configure channel parameters, se abre una nueva ventana donde se escriben los datos que aparecen en Channel Settings, en específico Channel ID y Read API key y por ultimo se le da el periodo de muestreo (ver Figura 2.18).

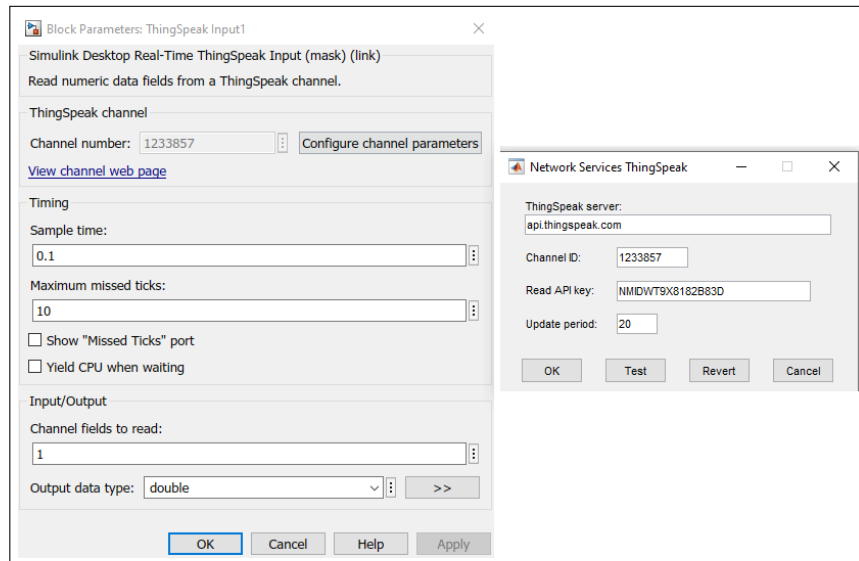


Figura 2.22: Ventana para configuración de Field y keys

Para el bloque de la Raspberry Pi es completamente lo mismo solo que este primero es procesada por la tarjeta y después pasa a Simulink. La configuración es similar solo que en este caso se debe conectar la Raspberry a la red y comunicarse remotamente con simulink para recibir los datos.

2.5.3. Configuración de acceso remoto de Raspberry Pi con Simulink

En la configuración de red para la Raspberry se hizo una conexión previa por WI-FI. Una vez hecho esto se prosigue a detectar la IP de la Raspberry, Esta se puede encontrar al acceder a la configuración de red en su sistema operativo.

En simulink se accede a la pestaña Hardware y después se da click en Hardware Settings como se muestra en la figura Figura 2.23.

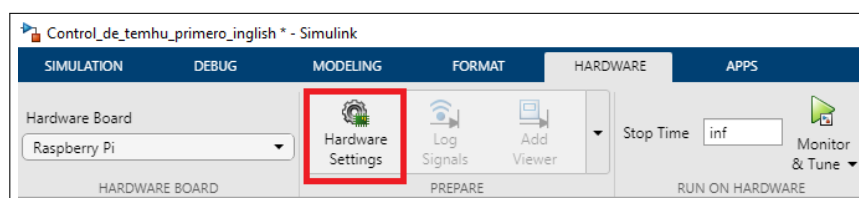


Figura 2.23: Acceder a configuración de red en simulik

El siguiente paso es seleccionar el tipo de tarjeta que se va a vincular con simulink, para ello se selecciona en Diagnostics el apartado Hardware Implementation, y se selecciona la tarjeta Raspberri Pi ver Figura 2.24.

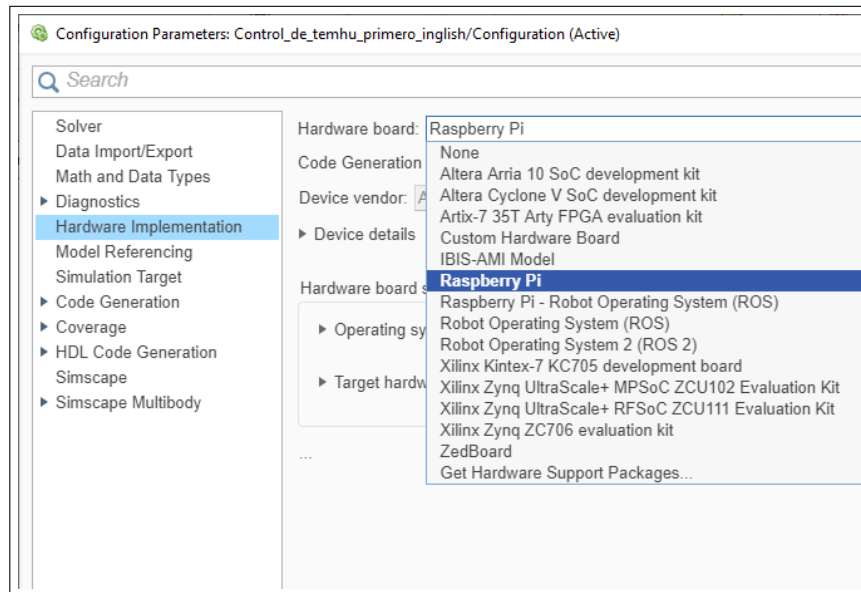


Figura 2.24: Selección de tarjeta

Después en el mismo apartado se selecciona la pestaña Target Hardware resources donde se inserta la dirección IP de la raspberry Pi, nombre de la tarjeta y contraseña ver Figura 2.24.

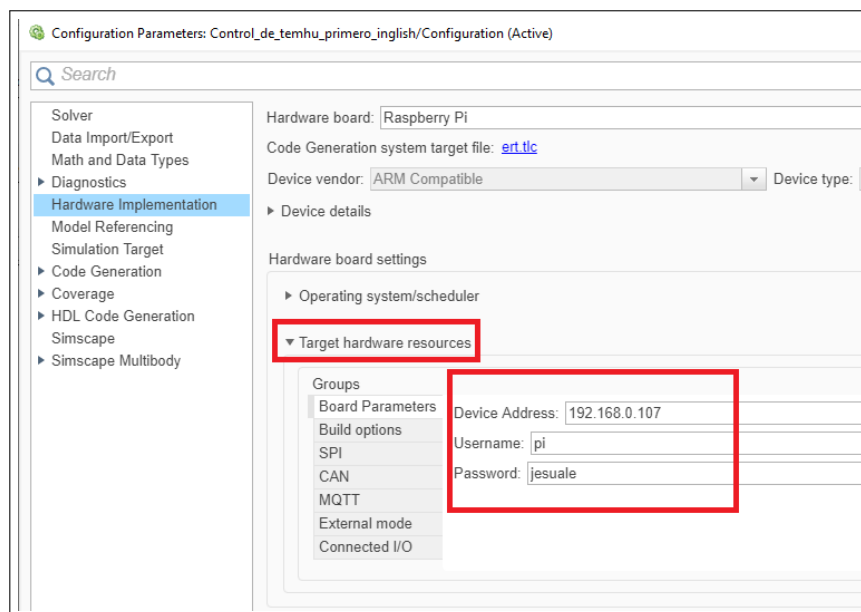


Figura 2.25: Datos de conexión a acceso remoto

Una vez hecho esto ya se podrá acceder a la raspberry remotamente y usar las librerías incluidas en simulink, También se da la opción de correr el programa y mover los parámetros en tiempo real y programar la raspberry para que no dependa de simulink y trabaje independientemente.

2.6. Propuesta de control

La propuesta se basa en un sistema de control multivariable, La interacción entre variables es una característica inherente de los procesos multivariables o MIMO (multivariable inputs, multivariable outputs) Figura 2.26. Se manifiesta por el hecho de que una variable de entrada afecta en mayor o menor grado a todas las variables de salida. [5]

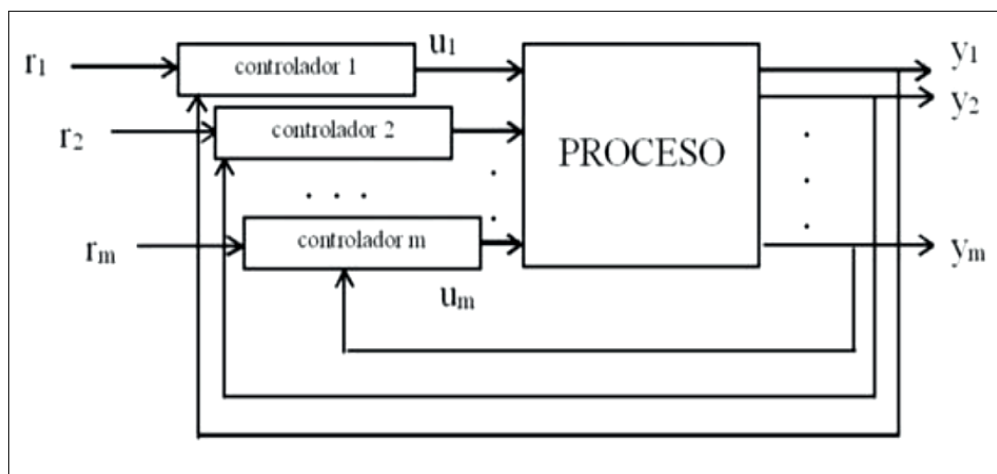


Figura 2.26: Sistemas de control multivariable [5]

En el diagrama presentado en la Figura 2.27, se describe la propuesta de control para optimizar el rendimiento del invernadero. Este sistema incluye dos variables de estado principales, temperatura y humedad, junto con un dispositivo de comparación que supervisa el error en el sistema. Además, se emplea un controlador proporcional-integral (PI) basado en eventos y actuadores principales para regular el microclima del invernadero.

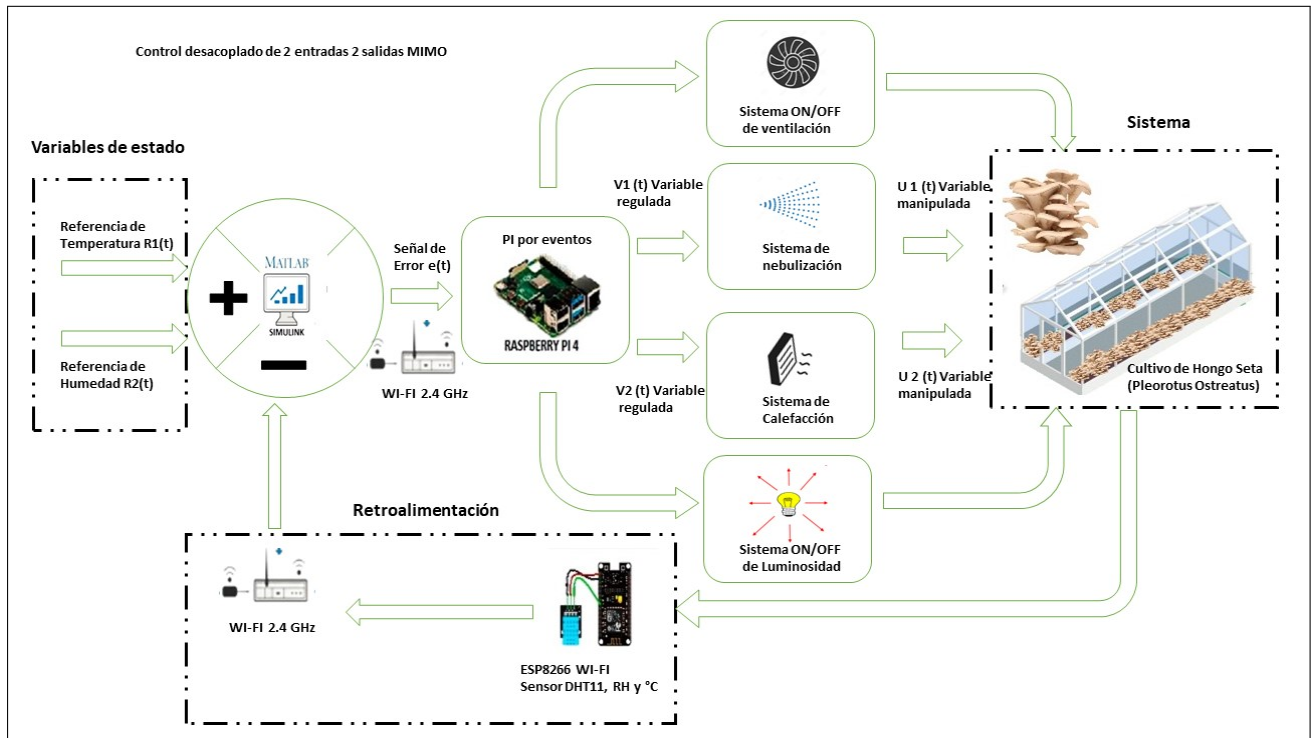


Figura 2.27: Diagrama de control

2.7. Modelo dinámico no lineal de invernadero

2.7.1. Ecuaciones dinámicas de temperatura y humedad

Las siguientes ecuaciones describen la dinámica de la temperatura y la humedad dentro del invernadero. [39]

$$\frac{dT_{in}(t)}{dt} = \frac{1}{\rho C_p V_T} [Q_{heater}(t) + S_i(t) - \lambda Q_{fog}(t)] - \left(\frac{V_R(t)}{V_T} - \frac{U \Delta}{\rho C_p V_T} \right) [T_{in}(t) - T_{out}(t)] \quad (2.1)$$

$$\frac{dH_{in}(t)}{dt} = \frac{1}{\rho V_H} Q_{fog}(t) + \frac{1}{\rho V_H} [E(S_i(t), H_{in}(t))] - \frac{V_R(t)}{\rho V_H} [H_{in}(t), H_{out}(t)] \quad (2.2)$$

donde:

T_{in}/T_{out} es la temperatura interior/exterior del aire del invernadero ($^{\circ}C$), H_{in}/H_{out} es la humedad interior/exterior del aire, ($g[H_2O] kg^{-1}$ [aire seco]),

$U \Delta$ es el coeficiente de transferencia de calor (WK^{-1}), V es volumen de invernadero (m^3),

ρ es la densidad del aire ($1.2kg[aire]m^{-3}$),

C_p es el calor específico del aire ($1006 jkg^{-1}K^{-1}$),

Q_{heater} es el calor suministrado por el calentador de invernadero (W),

Q_{fog} es la capacidad de agua del sistema de niebla ($g[H_2O]s^{-1}$)

S_i es la energía solar radiante interceptada (W),

λ es calor latente de vaporización ($2257 Jg^{-1}$),

VR es la tasa de ventilación ($m^3[air]s^{-1}$),

$E(S_i(t), Hin(t))$ es la tasa de transpiración de las plantas ($g[H_2O]s^{-1}$)

V_T y V_H son los volúmenes de mezcla activos de aire de la temperatura y humedad, respectivamente. Generalmente hablando, V_T y V_H son tan pequeños como 60 % - 70 % de la geometría volumen V del invernadero debido a que existen zonas estancadas en espacios ventilados [39]

Para una aproximación, la tasa de evapotranspiración $E(S_i(t), w_{in}(t))$ está relacionada en su mayor parte con la energía solar radiante interceptada a través de la siguiente relación simplificada:

$$E(S_i(t), w_{in}(t)) = \alpha \frac{(S_i(t))}{\lambda} - \beta_\tau w_{in}(t), \quad (2.3)$$

donde:

α es un coeficiente general para tener en cuenta el sombreado y el índice de área foliar y β_τ es un coeficiente general para tener en cuenta las constantes termodinámicas y otros factores que afectan la evapotranspiración. De la ecuación de Penman-Monteith [40], se obtiene la ecuación para el calculo de β_τ como se muestra:

$$\beta_\tau = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T-273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}, \quad (2.4)$$

donde:

Δ es la pendiente de la curva presión de vapor ($kPa^\circ C^{-1}$)

R_1 es la radiación neta en la superficie del cultivo ($MJ,^{-2} dia^{-1}$)

G es el flujo de calor del suelo ($MJ,^{-2} dia^{-1}$)

γ es la constante psicométrica ($kPa^\circ C^{-1}$)

T es la temperatura media de aire a 2 metros de altura ($^\circ C$)

u_2 es la velocidad del viento a 2 metros de altura (m/s)

$e_s - e_a$ es el déficit de presión de vapor (kPa)

e_s es la presión de vapor de saturación (kPa)

e_a es la presión de vapor (kPa)

2.7.2. Ecuaciones en variable de estado

Al sustituir la ecuación (2.3) en (2.2) las ecuaciones (2.1) y (2.2) quedaran de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \frac{dT_{in}(t)}{dt} = & \frac{1}{\rho C_p V_T} [Q_{heater}(t) + S_i(t) - \lambda Q_{fog}(t)] \\ & - \left(\frac{V_R(t)}{V_T} - \frac{U\Delta}{\rho C_p V_T} \right) [T_{in}(t) - T_{out}(t)], \end{aligned} \quad (2.5)$$

$$\frac{dH_{in}(t)}{dt} = \frac{1}{\rho V_H} Q_{fog}(t) + \alpha \frac{S_i(t)}{\lambda \rho V_H} - \frac{\beta_t}{\rho V_H} - \frac{V_R(t)}{\rho V_H} [H_{in}(t), H_{out}(t)], \quad (2.6)$$

para obtener la variable de estado de las siguientes ecuaciones (2.5) y (2.6) se hace la siguiente analogía:

$$\begin{aligned} T_i n &= y_1 = x_1, \\ H_{in} &= y_2 = x_2, \\ Q_{heater} &= u_1, \\ Q_{fog} &= u_2, \\ S_i &= v_1, \\ T_{out} &= v_2, \\ H_{out} &= v_3, \\ heater &= v_4. \end{aligned}$$

El modelo matemático se basa en la siguiente forma de variables de estado:

$$\dot{x} = f(t, x, u, v), \quad (2.7)$$

donde x son las variables de estado, temperatura, humedad interior y concentración de dióxido de carbono. v son las entradas externas (radiación solar, temperatura del aire, humedad relativa, concentración de dióxido de carbono exterior) también conocidas como perturbaciones, en el modelo matemático no lineal, t denota tiempo, u son las variables de control (tasa de ventilación, flujo de calor por el calentador, flujo de dióxido de carbono, intensidad de luz suplementaria).[39, 41].

$$\dot{x} = Ax + Bu + d(t) \quad (2.8)$$

Se utiliza la siguiente forma matricial para sistema de control desacoplado con los 2 estados.

$$A = \begin{bmatrix} a_1 & 0 \\ 0 & a_2 \end{bmatrix} B = \begin{bmatrix} b_1 & 0 \\ 0 & b_2 \end{bmatrix} d(t) = \begin{bmatrix} u_2 + w \\ u_1 + v \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$b_1 = \frac{1}{V_T} \quad (2.10)$$

$$b_2 = \frac{\beta_t}{\rho V_H} \quad (2.11)$$

Quedando las ecuaciones de estado de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 = & \frac{UA}{\rho C_p V_T} x_1(t) - \frac{1}{V_T} x_1(t) u_1(t) - \frac{\lambda}{\rho C_p V_T} u_2(t) + \frac{1}{\rho C_p V_T} v_1(t) \\ & + \frac{UA}{\rho C_p V_T} v_2(t) + \frac{1}{\rho C_p V_T} v_4(t) + \frac{1}{V_T} u_1(t) v_2(t) \end{aligned} \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_2 = & \frac{\beta_t}{\rho V_H} x_2(t) + \frac{1}{\rho V_H} u_2(t) + \frac{\alpha}{\lambda \rho V_H} v_1(t) - \frac{1}{\rho V_H} x_2(t) u_1(t) \\ & + \frac{1}{\rho V_H} u_1(t) v_3(t) \end{aligned} \quad (2.13)$$

2.7.3. Conversión de humedad relativa a humedad absoluta

Para incorporar la humedad en el modelo matemático, se necesita trabajar con humedad absoluta ya que se refiere al peso del vapor de agua por unidad de volumen determinado. Esta unidad de volumen, generalmente es un espacio de un metro cúbico (o un pie cúbico). En este espacio, normalmente hay aire también, aunque no necesariamente. Se sabe que la humedad relativa está basada en la humedad absoluta, bajo las condiciones establecidas; es decir, la humedad relativa es una comparación con la humedad absoluta a la misma temperatura, si el vapor de agua está saturado.

La humedad es la concentración de vapor de agua en el aire húmedo. Hay que recordar que el aire húmedo es la mezcla de aire seco más vapor de agua. el aire seco en el componente no condensable y el vapor de agua en el componente condensable de la mezcla.

Para la humedad absoluta se usará el signo S_a , que corresponde a la masa de vapor de agua por unidad de masa de aire seco. Cuando la relación es mol de vapor de agua por mol de aire seco se denomina humedad molar y se representa por S_m . [42]

Humedad molar

$$H_m = \frac{P_{H_2O}}{P_{sa}} = \frac{n_{H_2O}}{n_{A.S}}, \quad (2.14)$$

o también se puede calcular como:

$$H_m = \frac{P_{H_2O}}{P_T - P_{H_2O}}, \quad (2.15)$$

humedad absoluta (másica)

$$H_{abs} = \frac{M_{H_2O}}{M_{A.S}}, \quad (2.16)$$

donde las masas moleculares son: $18 \text{ kg}_{H_2O} / \text{kg}_{mol, H_2O}$ para el agua y $28,84 \text{ kg}_{aire} / \text{kg}_{mol, aire}$ para el aire seco (considerando el aire seco compuesto por 21 % molar de O_2 y 79 % molar de N_2).

$$H_{abs} = 0.624 H_m, \quad (2.17)$$

teniendo en cuenta que la H_{abs} es 0.624 y de acuerdo con la ecuación 2.17 tenemos la relación de las masas molares con respecto a la humedad molar de lo cual se obtiene el cálculo de la humedad absoluta (sustitución de ecuación 2.16) dando como resultado:

$$H_{abs} = 0.624 \frac{P_a}{P_t - P_a}, \quad (2.18)$$

donde:

P_a es la presión parcial de vapor de agua.

P_t es la presión total del sistema.

Humedad relativa

La humedad relativa es lo mismo que la saturación, solo que ahora aplicada al caso específico de la mezcla aire y agua queda de la siguiente manera:

$$H_R = 100 \frac{P_a}{P_{a,sat}}, \quad (2.19)$$

donde:

P_a es la presión de vapor de agua.

$P_{a,sat}$ es la presión de saturación de vapor.

De acuerdo con la ecuación 2.18 se debe obtener un primer instante la presión de vapor dentro del invernadero por lo cual se despeja la fórmula de H_R ecuación 2.19.

$$P_a = P_{a,sat} \frac{H_R}{100}, \quad (2.20)$$

se requiere la ecuación de Antoine para describir la presión de equilibrio entre un vapor y un líquido a una temperatura determinada. Es importante tener en cuenta que la presión, en cualquier forma de la ecuación de estado, siempre es absoluta. En cuanto a la temperatura, si se proporciona en grados Celsius, debe convertirse a Kelvin, mientras que si se proporciona en grados Fahrenheit, debe convertirse a grados Rankine.

La ecuación de Antoine es una fórmula matemática que establece una relación entre la temperatura y la presión de saturación del vapor para sustancias puras (no aplicable a mezclas), y viceversa [43]. Se deriva de la ecuación de Clausius-Clapeyron para el cambio de líquido a vapor. Su formulación explícita para la presión es la siguiente:

$$\ln(P_v) = A - \frac{B}{C + T} \quad (2.21)$$

A, B, C son constantes según sea el caso de estudio de cada sustancia a utilizar la temperatura T se toma en Kelvin.

Los valores fueron tomados de la tabla de constantes de Antonie en específico para el agua, donde:

$$A = 18.3036$$

$$B = 3816.34$$

$$C = -46.13$$

Capítulo 3

Implementación

En este capítulo se mostrarán los diagramas de bloques para llevar a cabo la validación en tiempo real del modelo matemático y también los diagramas de bloques que posibilitan la conectividad desde Simulink de Matlab con la Raspberry Pi 4 e interfaz con ThingSpeak, con el propósito de tener el control del invernadero mediante el PI basado en eventos.

3.1. Simulación y validación de modelo matemático

3.1.1. Diagramas de bloques del modelo matemático

Se presentan las ecuaciones (2.12) y (2.13) en el diagrama de bloques para simular el clima interior del invernadero en lazo abierto utilizando Simulink de Matlab, como se muestra en la Figura 3.1. Este diagrama exhibe los parámetros externos que tienen influencia, tales como la radiación solar, temperatura, humedad, ventilación, sistema de riego por nebulización y el elemento calefactor. Además, se muestran como salidas las lecturas de los parámetros de humedad absoluta y temperatura.

Para obtener la respuesta del sistema ante un escalón unitario y poder observar el cambio de la temperatura y la humedad interna del invernadero, se han creado dos bloques. Cada bloque interno contiene una ecuación específica. En la Figura 3.2 se muestra el diagrama de bloques correspondiente a la ecuación (2.12) de temperatura, mientras que en la Figura 3.3 se presenta la ecuación (2.13) de humedad.

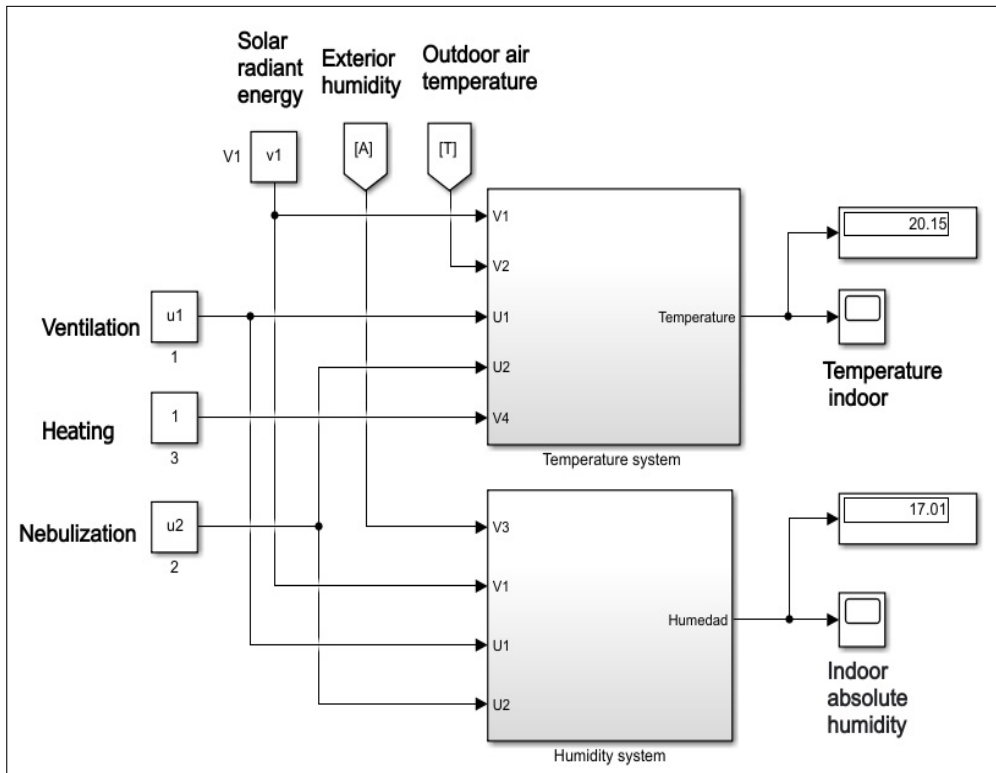


Figura 3.1: Diagrama de bloques para el sistema en lazo abierto del invernadero

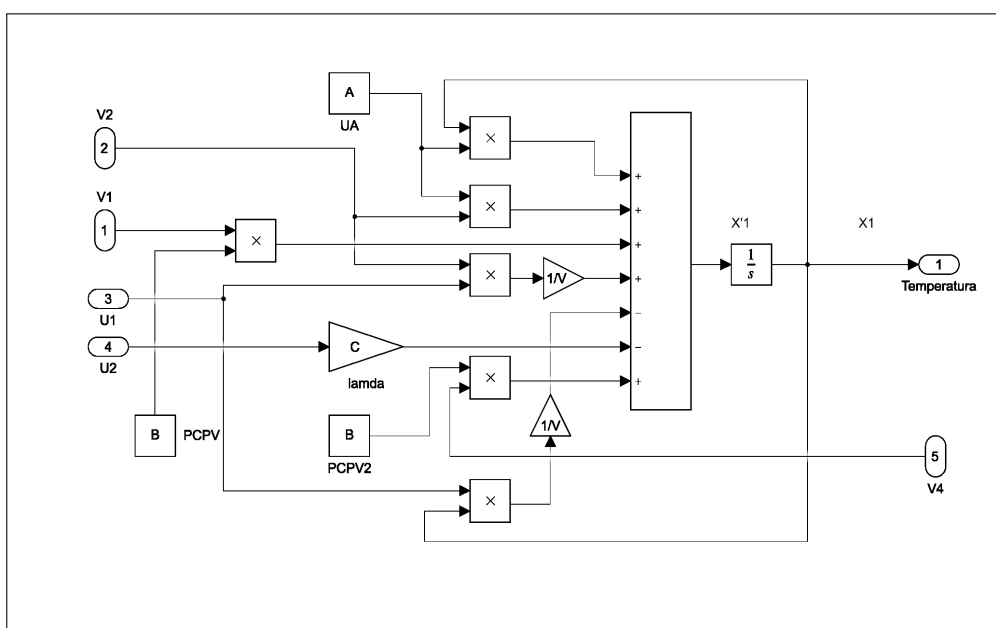


Figura 3.2: Diagrama de bloques para ecuación de temperatura

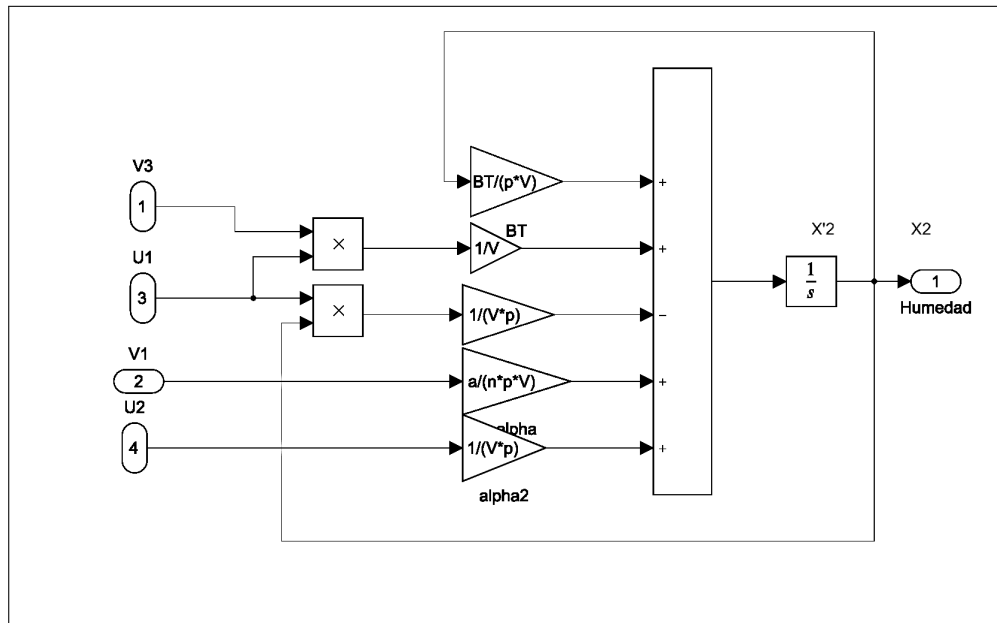


Figura 3.3: Diagrama de bloques para ecuación de humedad

3.1.2. Simulación de modelo matemático

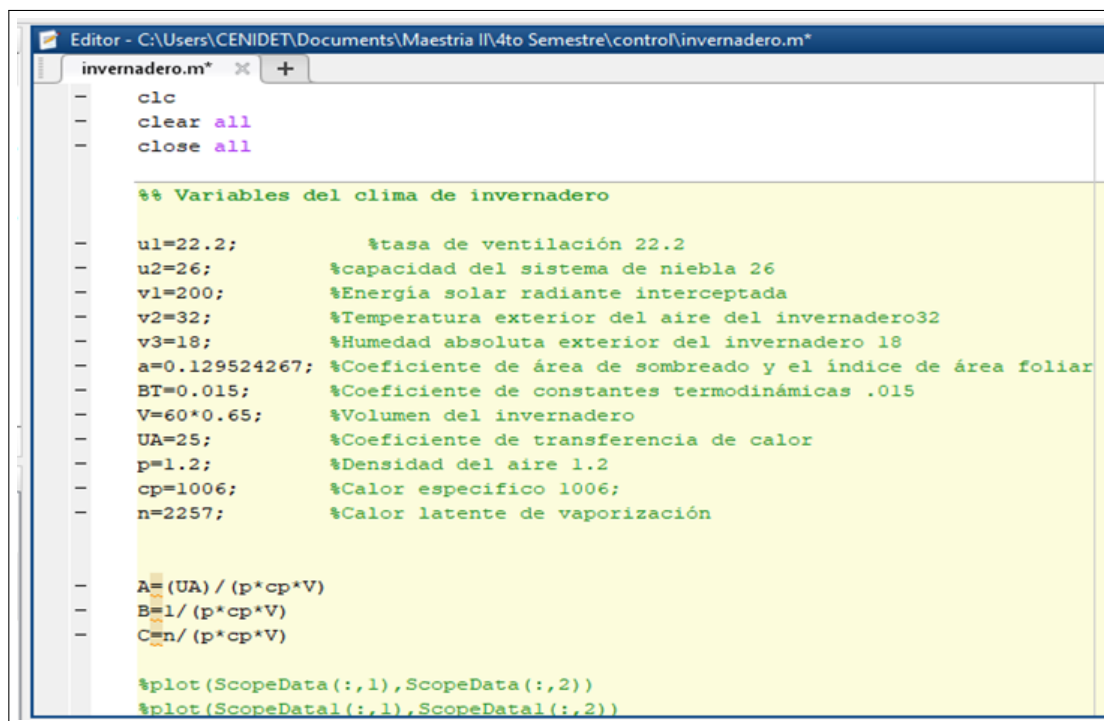
En la simulación de Matlab, se incorporaron los datos detallados en la Tabla 3.1, los cuales representan los parámetros internos y externos del invernadero. Estos parámetros son fundamentales para modelar adecuadamente el comportamiento del sistema y abarcan aspectos como las propiedades físicas del invernadero, las condiciones ambientales. Las unidades utilizadas para expresar estos parámetros corresponden con las definidas en la sección 2.7.1, garantizando así la coherencia en el análisis y la simulación del sistema.

Tabla 3.1: Parámetros internos y externos del sistema

Parámetro	Valor	Descripción
u_1	1	Tasa de ventilación
u_2	1	Capacidad del sistema de niebla
v_1	200	Energía solar radiante interceptada
v_2	22	Temperatura exterior del aire del invernadero
v_3	82	Humedad absoluta exterior del invernadero
α	0.129524267	Coefficiente de área de sombreado y el índice de área foliar
β_t	0.015	Coefficiente de constantes termodinámicas
V	0.33	Volumen del invernadero
UA	25	Energía solar radiante interceptada
ρ	1.2	Densidad del aire
C_p	1006	Calor específico
n	2257	Calor latente de vaporización (U)

Parámetros en editor Matlab

En el editor de Matlab se incorporan los parámetros de la Tabla 3.1, datos que se usan dentro de los bloques de Simulink. Es importante destacar que cada parámetro mencionado anteriormente se ha considerado con valores específicos para verificar el comportamiento del sistema, principalmente en lo que respecta a la ventilación, calefacción y nebulización bajo condiciones ideales.



```

Editor - C:\Users\CENIDET\Documents\Maestria II\4to Semestre\control\invernadero.m*
invernadero.m* x +
-   clc
-   clear all
-   close all

%% Variables del clima de invernadero
-   u1=22.2;           %tasa de ventilación 22.2
-   u2=26;            %capacidad del sistema de niebla 26
-   v1=200;           %Energía solar radiante interceptada
-   v2=32;            %Temperatura exterior del aire del invernadero32
-   v3=18;            %Humedad absoluta exterior del invernadero 18
-   a=0.129524267;    %Coeficiente de área de sombreado y el índice de área foliar
-   BT=0.015;         %Coeficiente de constantes termodinámicas .015
-   V=60*0.65;        %Volumen del invernadero
-   UA=25;            %Coeficiente de transferencia de calor
-   p=1.2;            %Densidad del aire 1.2
-   cp=1006;          %Calor específico 1006;
-   n=2257;           %Calor latente de vaporización

-   A=(UA) / (p*cp*V)
-   B=1/ (p*cp*V)
-   C=n/ (p*cp*V)

%plot(ScopeData(:,1),ScopeData(:,2))
%plot(ScopeData1(:,1),ScopeData1(:,2))

```

Figura 3.4: Parametros en editor de Matlab

Los resultados de simulación son mostrados en la Figura 3.5. La condición inicial de temperatura es de 26°C y el valor final es de 25.5°C al termino de 10 segundos, como se muestra en la Figura 3.5 (a). En cuanto a la humedad absoluta, se estableció una condición inicial de $10\text{g}[H_2O]\text{kg}^{-1}$. Se observa que la humedad converge a $22\text{g}[H_2O]\text{kg}^{-1}$ en 20 segundos, tal como se muestra en la Figura 3.5 (b).

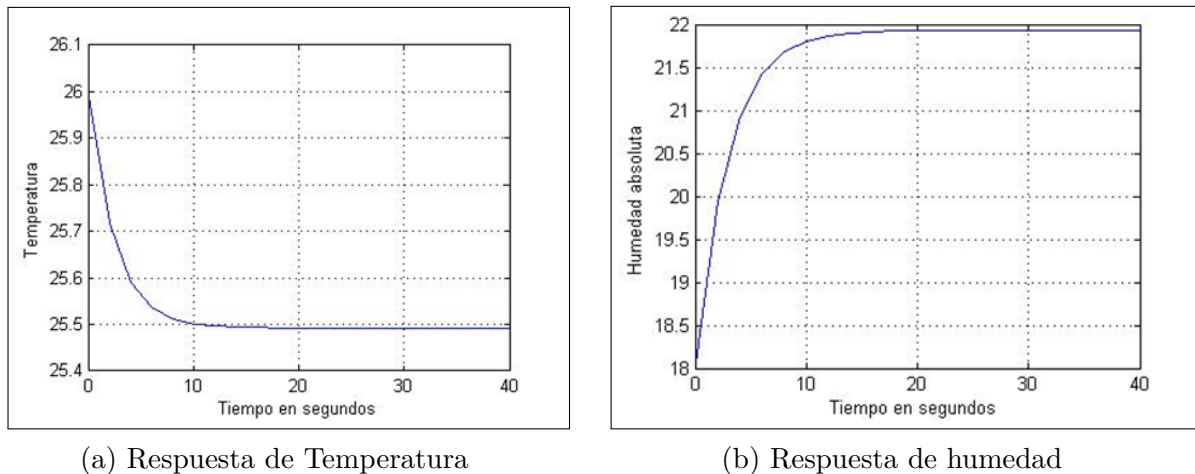


Figura 3.5: Respuesta de sistema ante escalón unitario

3.1.3. Simulación de controlador PI

Para verificar la capacidad de control del invernadero, se implementó un controlador proporcional-integral (PI) analógico para observar el comportamiento del sistema desde el modelo matemático, como se muestra en la Figura 3.6. Este controlador PI se diseñó utilizando los mismos parámetros detallados en la Tabla 3.1. Al comparar la respuesta del sistema controlado con el set point deseado, se podrá evaluar la capacidad del controlador para mantener las condiciones ambientales dentro de los rangos deseados. Además, este análisis permitirá identificar posibles áreas de mejora en el control del microclima del invernadero y guiará el proceso de ajuste de los parámetros del controlador para lograr un rendimiento óptimo.

En la Figura 3.7, se presenta la respuesta del microclima del invernadero con el controlador PI, donde se ha establecido un set point de 25°C para la temperatura y del 70% de humedad absoluta ver Figura 3.6. Esta representación visual permite observar cómo el sistema responde a la aplicación del controlador PI y cómo se ajusta gradualmente hacia los valores deseados de temperatura y humedad.

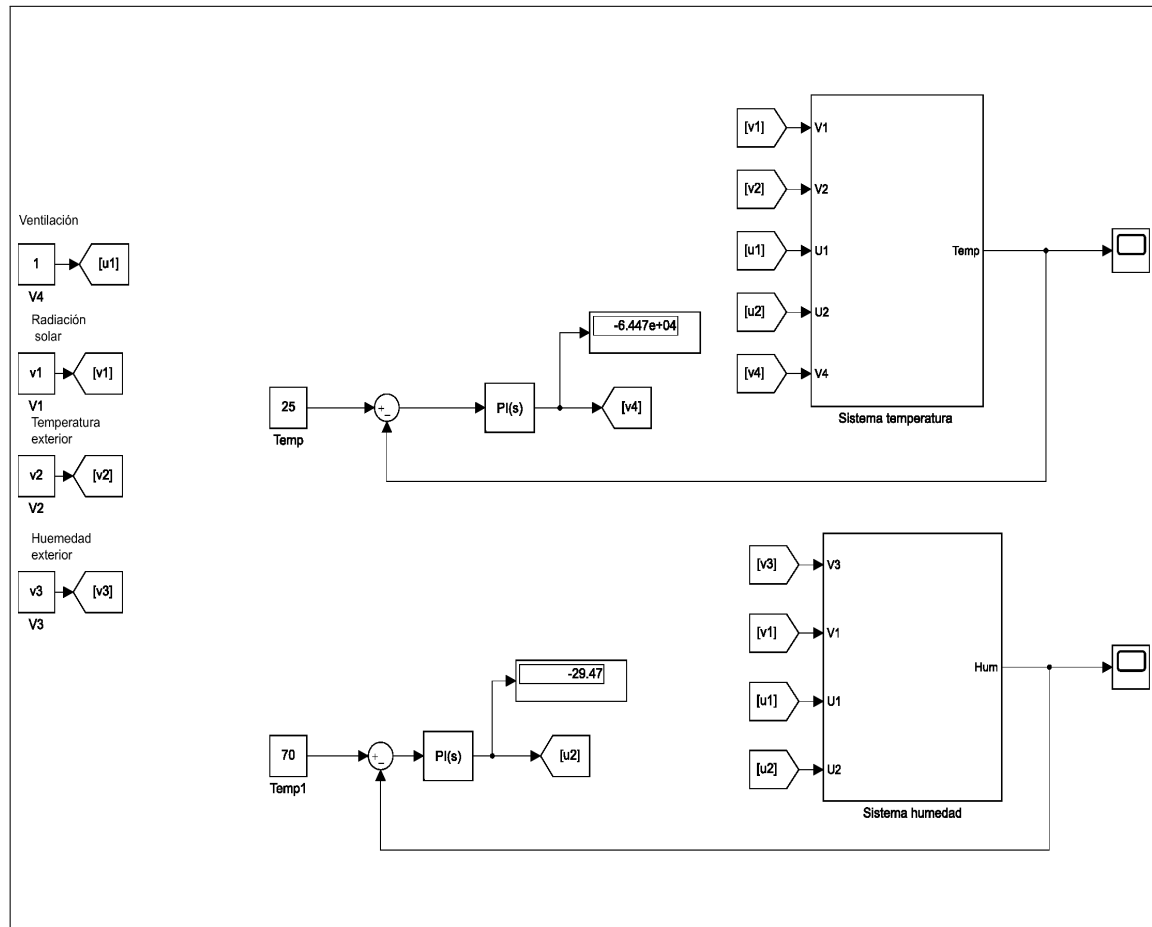
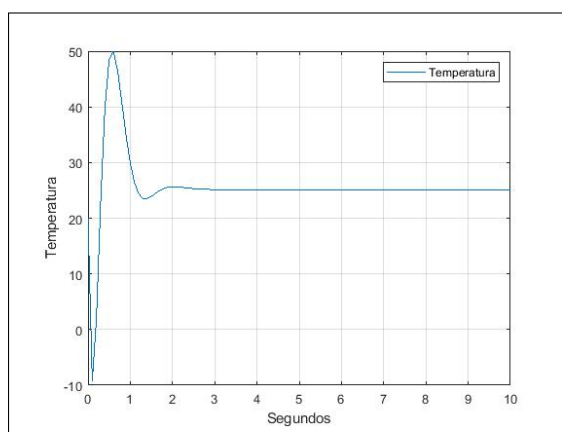
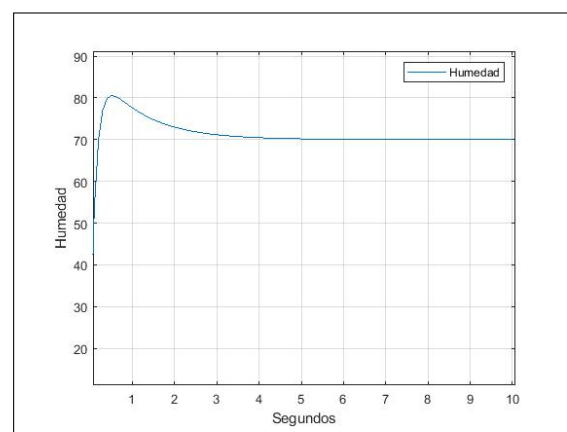


Figura 3.6: PI analógico en forma matemática



(a) Controlador PI de temperatura



(b) Controlador PI de humedad

Figura 3.7: Respuesta de controlador PI analógico

Antes de pasar a la validación del modelo matemático se requiere hacer una conversión de humedad absoluta a relativa y de humedad relativa a humedad absoluta ya que los sensores con los que se cuentan solo detectan humedad relativa por ello se hacen las siguientes consideraciones.

3.1.4. Interfaz y conectividad

Diagrama de conectividad

Para ver la elección del sistema de red y configuración de Raspberry Pi 4B y red de sensores ir a las secciones 2.4 y 2.5.

El siguiente diagrama, ilustrado en la Figura 3.8, está diseñado para medir la temperatura y humedad tanto interna como externa del invernadero. Este diagrama se compone de 4 bloques que facilitan la recepción de datos desde ThingSpeak. Se emplean convertidores para la lectura de estos datos, además de 2 subsistemas dedicados a la conversión de la humedad relativa a absoluta. Estos últimos se utilizan para introducir perturbaciones en las entradas del modelo matemático y para comparar y validar la dinámica y la respuesta de ambos sistemas frente a posibles cambios en la temperatura y la humedad.

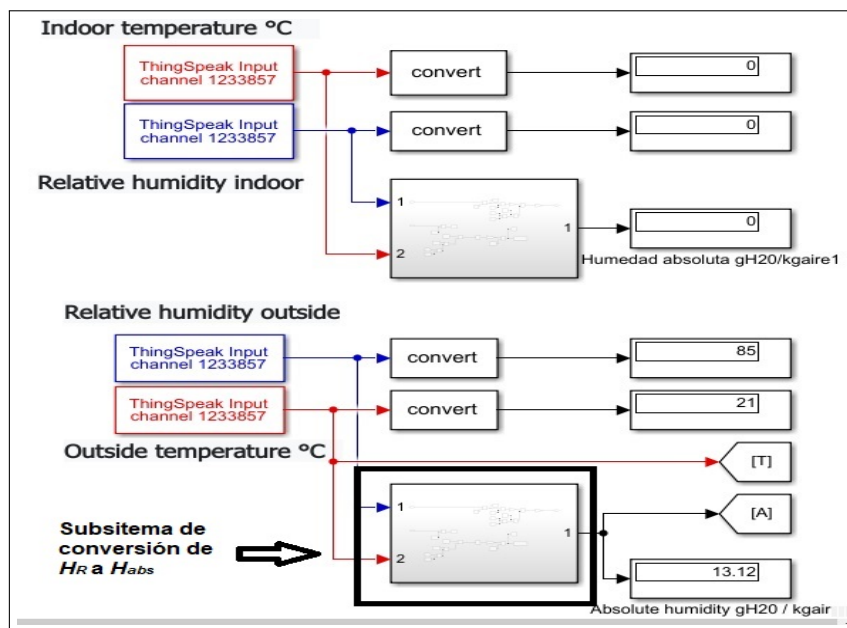


Figura 3.8: Diagrama de bloques: temperatura y humedad Indoor/Outside

Subsistema para conversión de H_R a H_{abs}

Para el subsistema de conversión, como se discutió previamente en la subsección 2.7.3 acerca de la humedad, se procedió inicialmente a crear un nuevo bloque (subsistema para conversión de H_R a H_{abs}) ver Figura 3.8 que incorpora las ecuaciones (2.21) y (2.18).

Como se muestra en la Figura 3.9, en la entrada 1 se recibe la humedad relativa, mientras que en la entrada 2 se recibe la temperatura, la cual se convierte a grados Kelvin para su utilización en la ecuación.

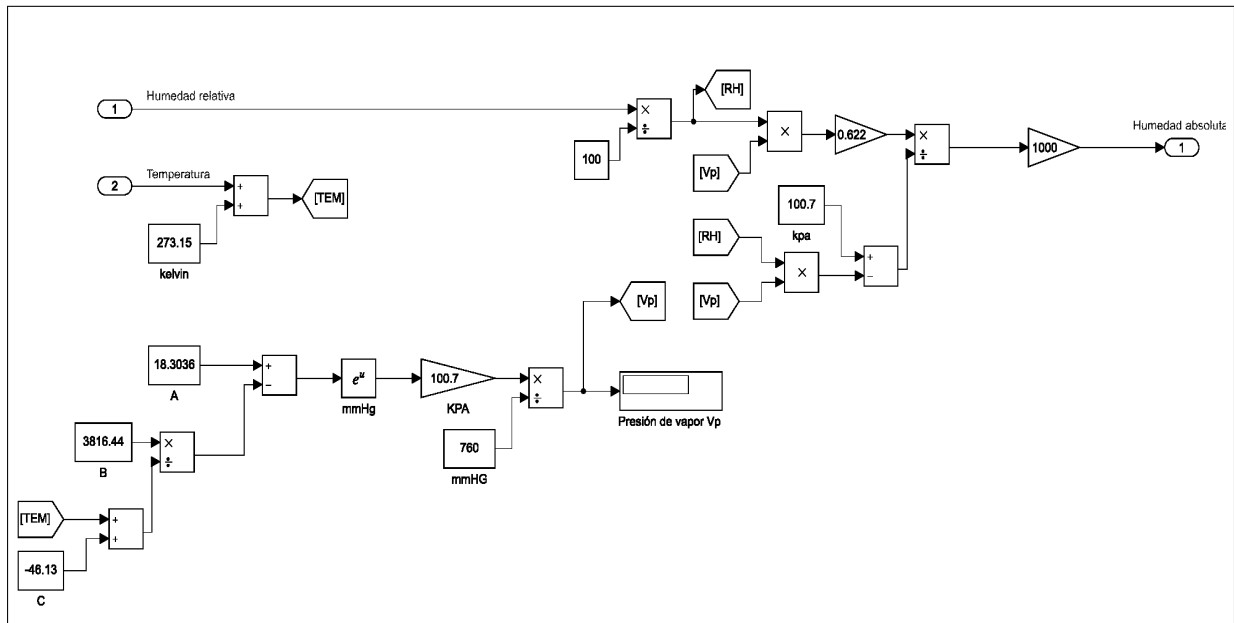


Figura 3.9: Subsistema de conversión de H_R a H_{abs}

El primer paso consiste en calcular la presión de vapor V_p , para lo cual se despeja y se introduce una nueva variable que representa la presión atmosférica. La presión atmosférica varía a lo largo del día, por lo que se estableció utilizar la presión atmosférica más frecuente. Los datos se obtuvieron de una estación meteorológica de la universidad, ubicada a 100 metros del lugar donde se realizó el experimento. Recordando que $1atm$ es igual a $760mmHg$, se realizaron todas estas consideraciones para obtener la humedad absoluta.

La Figura 3.10 presenta el diagrama completo del proceso de validación del sistema. Este incluye el modelo matemático, las lecturas de los sensores ubicados fuera del invernadero y la conversión entre humedad relativa y absoluta, y viceversa. La validación se realiza comparando el modelo matemático con el sistema real, considerando las perturbaciones externas como la humedad y la temperatura. La energía solar se considera constante para ambos sistemas. Para monitorear los cambios en la humedad y la temperatura en tiempo real, se establece una conexión a Internet desde ThinkSpeak de Matlab, con un muestreo cada 14 segundos, ver la sección 2.5. Esto permite obtener datos precisos sobre lo que está ocurriendo en el invernadero.

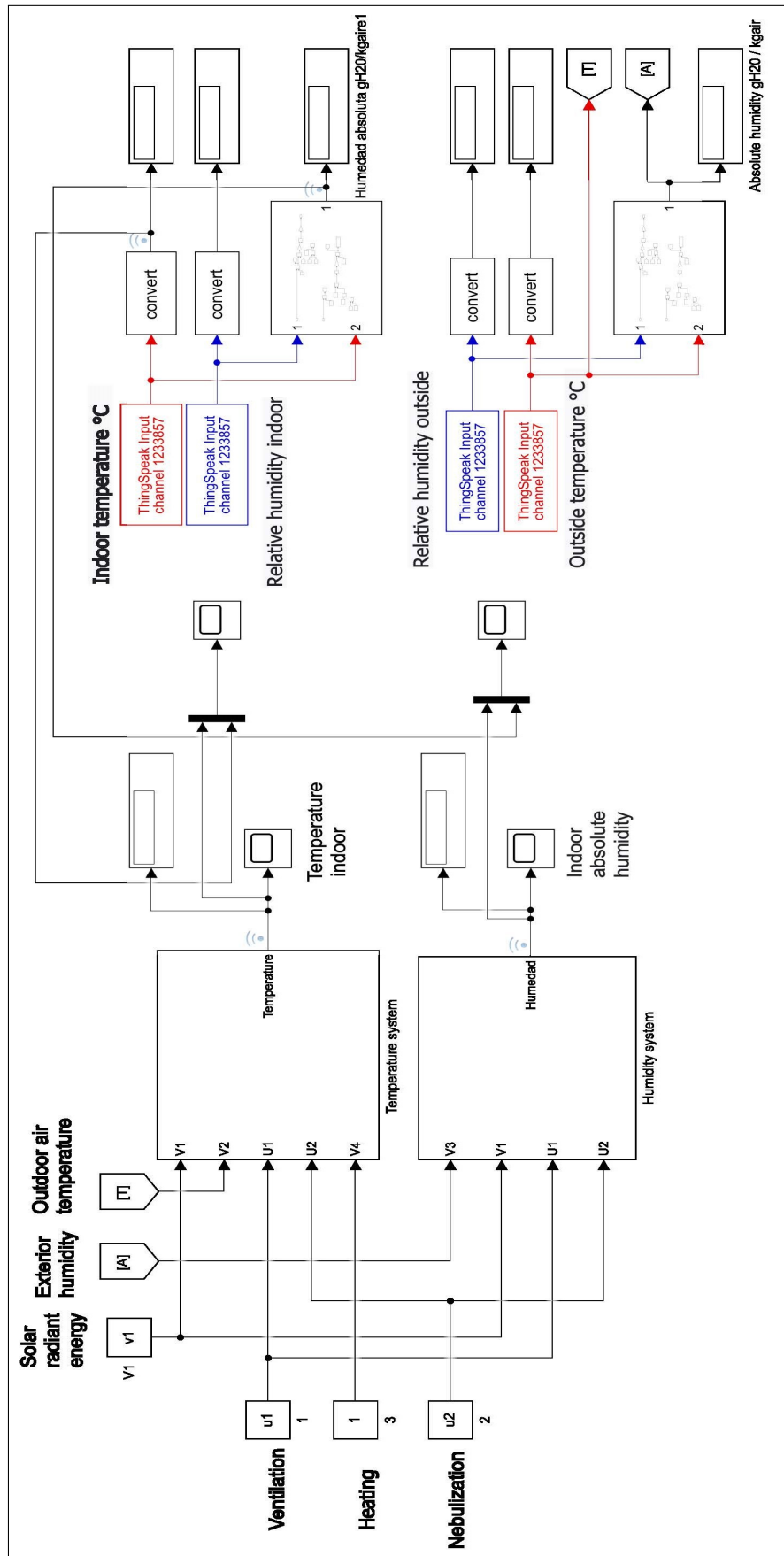


Figura 3.10: Diagrama de circuito en tiempo real

3.2. Diseño de controlador PI por eventos

En el diseño del controlador, se sigue la metodología propuesta por Arzen, como se detalla en la subsección 1.5.2. Esta metodología sugiere que el controlador debe dividirse en dos partes fundamentales:

1. **Controlador proporcional-integral (PI):** Esta parte del controlador se encarga de corregir el error presente entre la señal de referencia y la salida del sistema. La acción proporcional se ajusta de acuerdo con el error presente en el sistema en un momento dado, mientras que la acción integral se encarga de eliminar el error residual a largo plazo.
2. **Lógica de eventos:** Se implementa una lógica de eventos para determinar cuándo y cómo se aplican las acciones de control. Esta lógica se basa en la detección de eventos específicos en el sistema, como cambios en la temperatura o la humedad, para activar o desactivar el controlador según sea necesario.

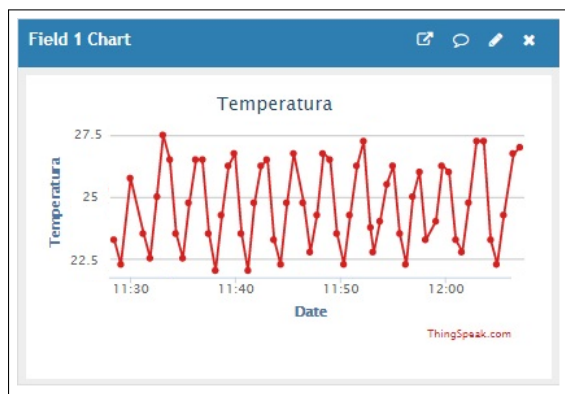
Al dividir el controlador en estas dos partes, se logra una mayor flexibilidad y robustez en el control del sistema, permitiendo una respuesta más eficiente a las variaciones en las condiciones ambientales del invernadero.

3.2.1. Controlador proporcional-integral (PI)

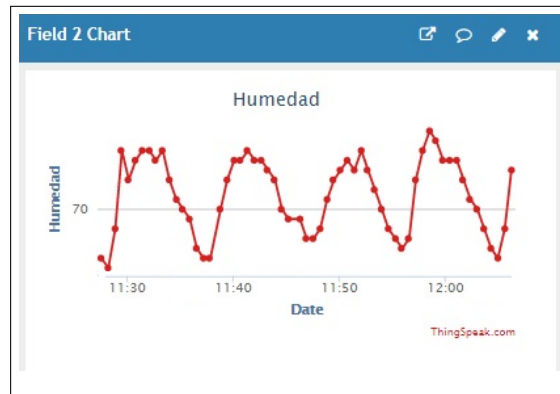
Sintonización de controlador PI

Para la sintonización del controlador, se estableció como objetivo alcanzar una temperatura de 25°C y un 72 % de humedad relativa en el invernadero. Para lograr esto, se inició la ganancia proporcional en 0.7, lo que permitió ver el régimen del estado estacionario tiene una banda de error de 2 % con un tiempo de muestreo de 14 segundos, como se muestra en la Figura 3.11. Durante la experimentación en el invernadero, se ajustó la ganancia proporcional a 0.7 para la humedad y a 1.3 para la temperatura en lazo abierto.

Después de que el sistema oscilara, se procedió a establecer los parámetros correspondientes utilizando el segundo método de Ziegler-Nichols. Para ello, se tomaron los valores de ganancia crítica y periodo crítico obtenidos durante las oscilaciones ver Figura 3.2.1 y se aplicaron los siguientes ajustes: la ganancia proporcional se fijó a la mitad del valor de la ganancia crítica, y el tiempo integral se estableció como la mitad del periodo crítico. Estos ajustes se realizaron con el objetivo de lograr una respuesta más estable y controlada del sistema. En la sección de resultados se mostrará el desempeño del controlador PI basado en eventos, comparando los resultados obtenidos con ambos métodos de sintonización.



(a) Error en estado estacionario de la temperatura



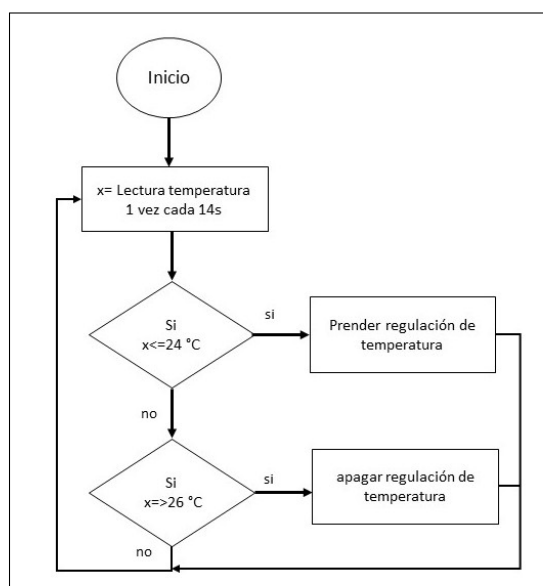
(b) Error en estado estacionario de la humedad

Figura 3.11: Error en estado estacionario en la temperatura y humedad

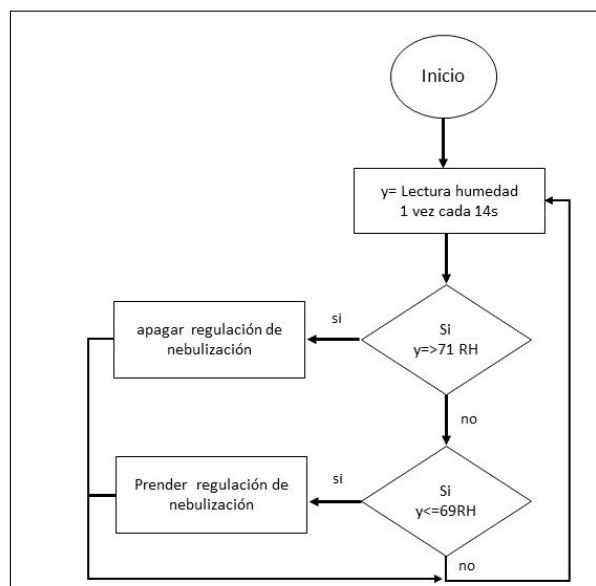
3.2.2. Lógica de eventos

Diseño de umbral para el disparo de eventos

El sistema de disparo de eventos está diseñado para enviar señales a los actuadores y activar o desactivar el sistema de regulación de temperatura y humedad. Estos disparos se configuran con base a umbrales establecidos según las condiciones del cultivo. En la Figura 3.12, se presentan dos diagramas de flujo que describen en detalle el proceso de disparo de eventos.



(a) Diagrama de flujo para disparo de evento en control de temperatura



(b) Diagrama de flujo para disparo de evento en control de temperatura

Figura 3.12: Diseño de disparo de eventos en el sistema de regulación del invernadero

En la Figura 3.13, se presentan los bloques que contienen los umbrales necesarios para activar los actuadores del invernadero. Las señales de entrada, representadas como $t1$, $h1$, o , y $o1$, provienen respectivamente de la temperatura, la humedad interna del invernadero y las señales de los controladores.

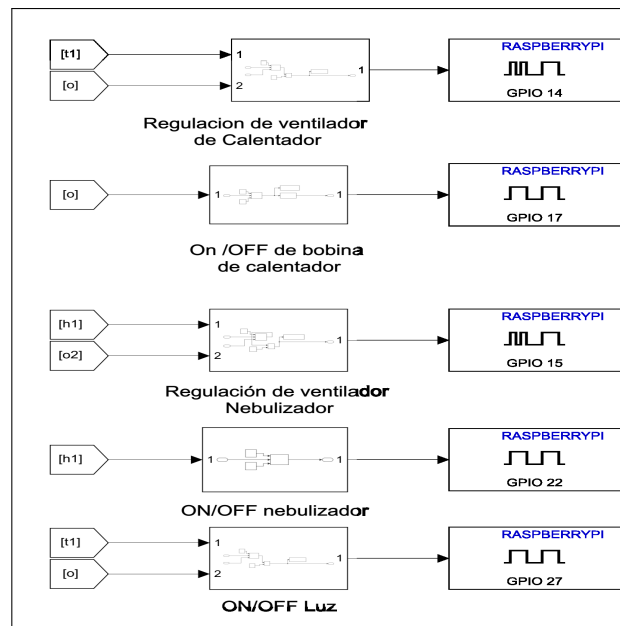


Figura 3.13: Umbral de eventos para acción de actuadores

Para calcular los eventos dentro del diagrama, se han establecido 5 umbrales. Estos umbrales determinarán cuándo se activarán los actuadores. Dos de estos umbrales están relacionados con la señal de control: uno para controlar el ventilador del calentador en función de la temperatura, y otro para regular el ventilador destinado a la nebulización.

El umbral de eventos de la temperatura se ha estimado con un rango de $\pm 1^\circ\text{C}$ en relación con el valor de referencia de 25°C . Esto significa que cuando la temperatura sobrepase los 26°C o descienda por debajo de los 24°C , se activará la ley de control establecida en el controlador proporcional-integral (PI) para los actuadores responsables de aumentar o disminuir la temperatura, como se muestra en la Figura 3.13. Además, en la Figura 3.14 se presentan los subsistemas internos del ventilador del calefactor y el control de encendido/apagado de la bobina del calefactor.

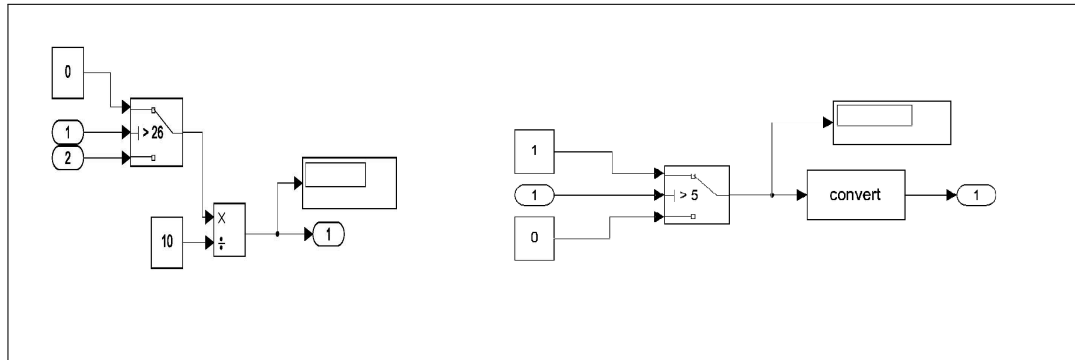


Figura 3.14: Comparadores para establecer umbral

Asimismo, para la humedad relativa, se ha establecido un umbral de $\pm 1\%$ en relación con el valor de referencia de 70% de humedad relativa (H_R). Esto implica que cuando la humedad relativa exceda el 71% o caiga por debajo del 69% , se activará la ley de control establecida en el controlador proporcional-integral (PI) para los actuadores responsables de ajustar la humedad, como se muestra en la Figura 3.13.

3.2.3. Diseño de diagrama de control completo

En la Figura 3.15 se presenta el diagrama de bloques para programar la Raspberry desde Matlab Simulink. Para controlar la temperatura, se adquiere información con un intervalo de muestreo de 14 a 20 segundos desde Thingspeak. Esta información proviene del sensor DHT11, el cual es leído por una ESP8266 y luego transmitido a través de Wi-Fi.

Esta señal se envía al comparador (punto de suma) y luego al controlador. Finalmente, se dirige al bloque de regulación y a las salidas (GPIO), donde se verifica si está dentro del umbral establecido. En caso afirmativo, se aplica un evento para enviar una señal PWM y regular la velocidad del calefactor y el nebulizador.

El sistema de monitoreo se hace en tiempo real desde ThinkgSpeak donde se puede observar el estado en que se encuentra el invernadero, ver sección 2.5 en el apartado monitoreo en ThingSpeak.

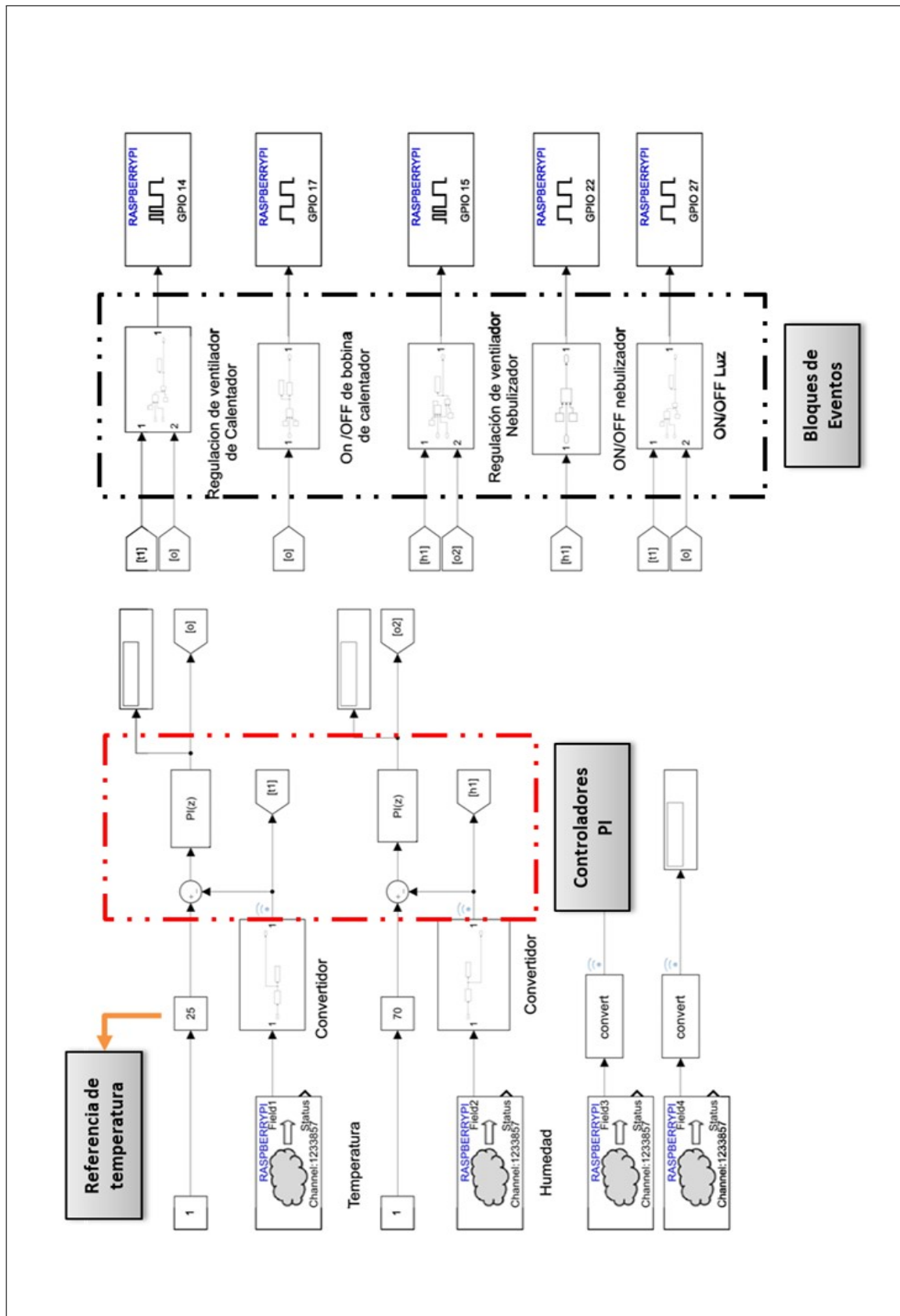


Figura 3.15: Diseño de controladores PI por eventos.

Capítulo 4

Resultados

En este capítulo se presentarán los resultados obtenidos a lo largo de este trabajo, abarcando desde la simulación y validación del modelo matemático hasta los resultados obtenidos durante la implementación del invernadero, donde se aplicaron diversas metodologías con el objetivo de favorecer el crecimiento del hongo seta mediante el uso del controlador PI por eventos.

4.1. Resultados de simulación modelo matemático con invernadero real

Después de llevar a cabo los pasos mencionados, se procede a realizar la simulación en tiempo real del sistema. Esto se hace con el propósito de monitorear ambos sistemas durante un período prolongado y así poder verificar su comportamiento.

Al ejecutar el programa, se obtienen los siguientes resultados de temperatura, como se muestra en la Figura 4.1. Es notable que la respuesta del modelo matemático presenta una variación de aproximadamente 0.2 a 0 °C en un lapso de aproximadamente 30 minutos, es decir, 1800 segundos. Estos resultados validan que ambos comportamientos de temperatura se asemejan en términos de tiempo.

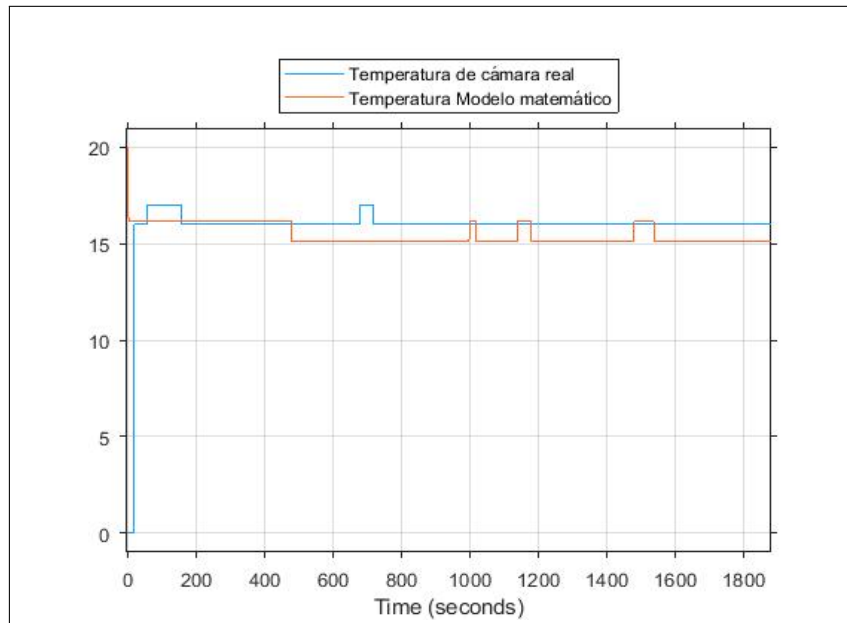


Figura 4.1: Comparación de temperatura de molelo matemático con invernadero.

En el caso de la humedad, como se muestra en la Figura 4.2, se realiza otra conversión de la humedad relativa (H_R) a humedad absoluta (H_{abs}) para comparar la respuesta del modelo matemático con la respuesta real. Se observa una diferencia de alrededor de 3.0 entre ambos resultados. Esta discrepancia se debe a que en la conversión de humedad relativa a humedad absoluta se considera la variación en la presión atmosférica, la cual cambia a lo largo del día. Además, los sensores de humedad relativa tienen un margen de error de aproximadamente $\pm 2\%$. Sin embargo, se puede apreciar que la humedad real se mantiene estable en comparación con el modelo matemático.

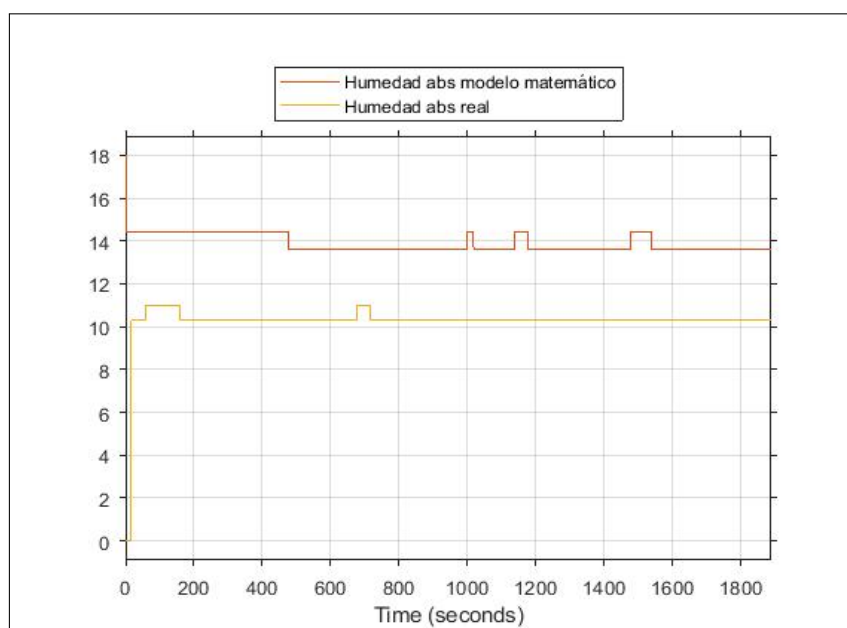


Figura 4.2: Comparación de temperatura de molelo matemático con invernadero real

4.2. Resultados de Controlador PI por eventos y monitoreo en interfaz

Al aplicar la metodología de control basado en eventos/red propuesta por Arzen, que divide el controlador en dos partes (lógica de control y lógica de detección de eventos), se utilizó el método de Ziegler-Nichols. Tras realizar los cálculos correspondientes, se obtuvo como resultado un controlador proporcional-integral (PI) para la humedad con ganancias de $P = 4$ y $I = 0$, mientras que para el controlador PI de temperatura se determinaron ganancias de $P = 1$ y $I = 0.2$.

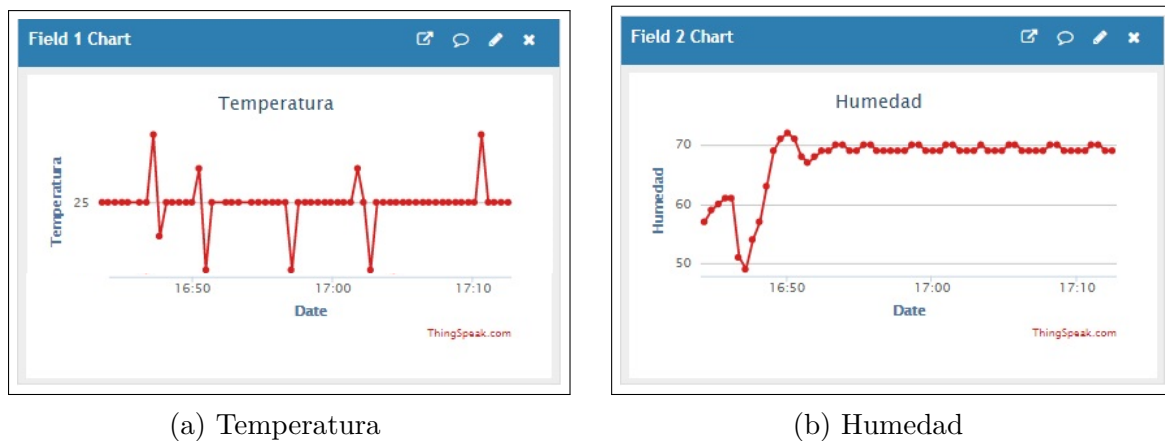
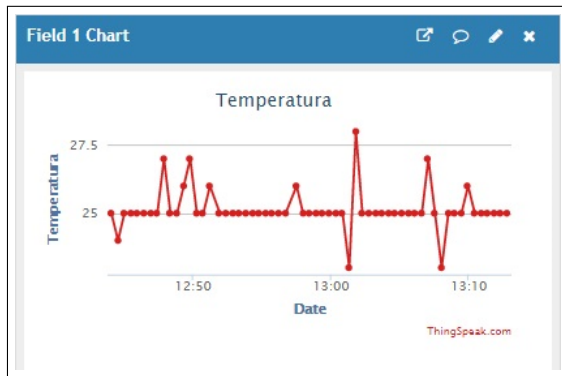


Figura 4.3: Monitoreo de micro clima del invernadero

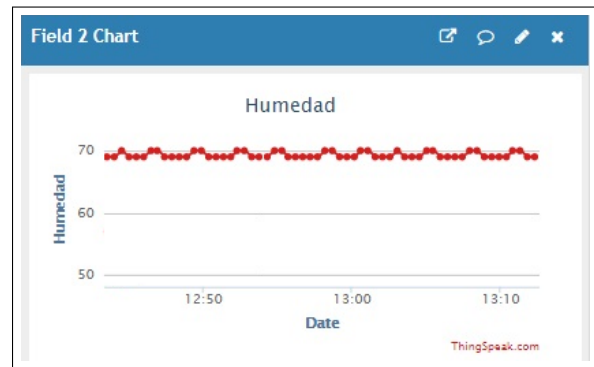
En las graficas Figura 4.3 se puede apreciar el comportamiento de ambas señales del microclima dentro de invernadero. La señal de temperatura esta recibiendo una señal cada 14 segundos al igual que la humedad.

En la Figura 4.3(a) se muestra como la temperatura es mas rápida en su respuesta en estado estable en comparación con la humedad Figura 4.3(b). Las variaciones o picos que muestra la grafica es cuando se genera un evento y se aplica la acción de control que permite bajar o aumentar la temperatura dentro de los umbrales ya mencionados en el capitulo anterior.

Durante el proceso de crecimiento el sistema se mantuvo encendido, en la Figura 4.4 se puede apreciar el comportamiento del microclima del invernadero después de 6 días, para la temperatura Figura 4.4 (a) se presentan 10 eventos y para la humedad 11 eventos en 30min, es decir el sistema se mantiene en un 8.5% de tiempo encendido por los cambios que existen.



(c)



(d)

Figura 4.4: Monitoreo de micro clima del invernadero

La grafica presenta 7 eventos en un lapso de 30min eso quiere decir que el sistema de calefacción enciende un 5.4% del tiempo estimado.

La respuesta que muestra la grafica de Humedad es mas lenta para llegar al estado estable Figura 4.4 (b). La humedad presenta 9 eventos en el lapso de 30min, lo que quiere decir que el sistema de nebulización requiere encender en un 7% del tiempo estimado.

4.3. Resultados de cultivo de hongo seta.

La temperatura se mantuvo constante a $25^{\circ}C$, con una humedad relativa de 70% por medio de nebulización y con una iluminación de 100 luxes así como una ventilación continua para mantener la concentración de CO_2 por debajo de los niveles inhibitorios de la fructificación. La Figura 4.5 muestra el primer día en el que el hongo seta entra en su segunda etapa de crecimiento.



(a)



(b)

Figura 4.5: Día 1 en condiciones ideales

El segundo día de observación reveló un crecimiento notable del hongo seta, como se ilustra en la Figura 4.6, donde se observa un incremento significativo de hasta cuatro veces el tamaño del sombrero del hongo.

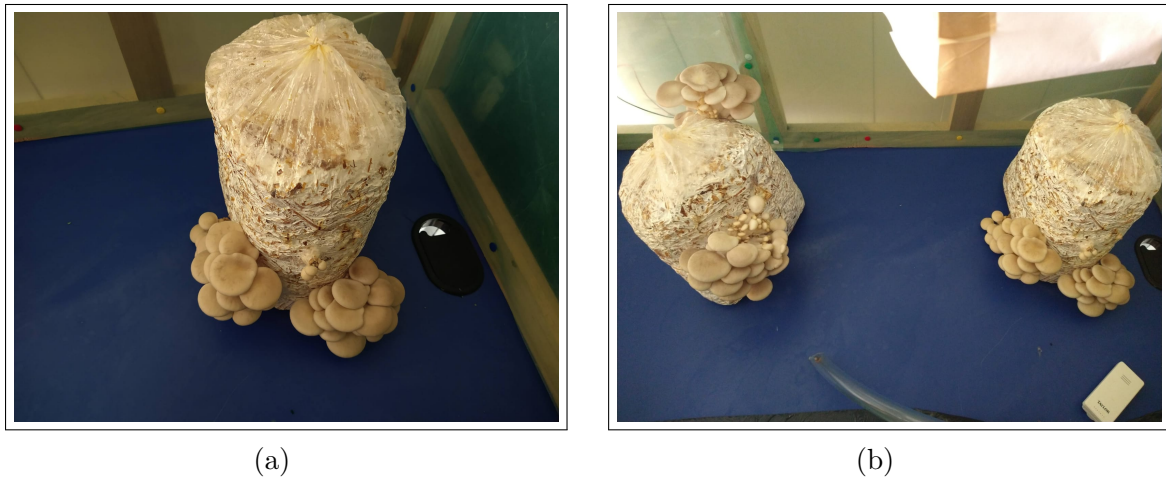


Figura 4.6: Día 2 en condiciones ideales

En el tercer día de observación, como se muestra en la Figura 4.6, el hongo seta exhibió un crecimiento notable al duplicar su tamaño desde su colocación inicial en el invernadero. Este incremento sustancial en el desarrollo del hongo es una clara indicación del impacto positivo que las condiciones controladas del invernadero tienen en su crecimiento.

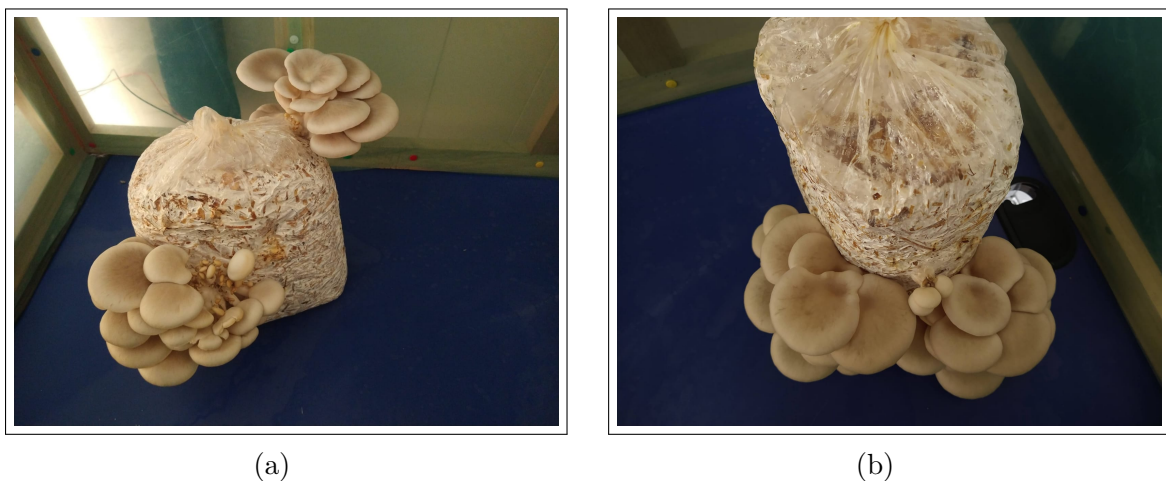


Figura 4.7: Día 3 en condiciones ideales

En los días 4 y 5, como se muestra en las Figuras 4.8 y 4.9 respectivamente, el hongo seta continuó su impresionante ritmo de crecimiento, duplicando su tamaño inicial. Este comportamiento del hongo seta indica una adaptación favorable a las condiciones del invernadero. La estabilidad térmica, la humedad controlada y la ventilación adecuada proporcionadas en este entorno han contribuido de manera significativa a su crecimiento continuo.



Figura 4.8: Día 4 en condiciones ideales



Figura 4.9: Día 5 en condiciones ideales

En el cultivo se obtuvieron producciones con una eficiencia biológica de 75%, en condiciones controladas dentro de la cámara de fructificación, se observó la formación de primordios a los 7 días, la aparición de fructificaciones se observaron a los 12 días con un pie pequeño, bien desarrollado el sombrero con un tamaño de la colonia entre 5 y 10 individuos, con sombreros entre 5 y 10 centímetros Figura 4.10, se cosecharon las fructificaciones a los 15 días de haber sido inoculado el sustrato.

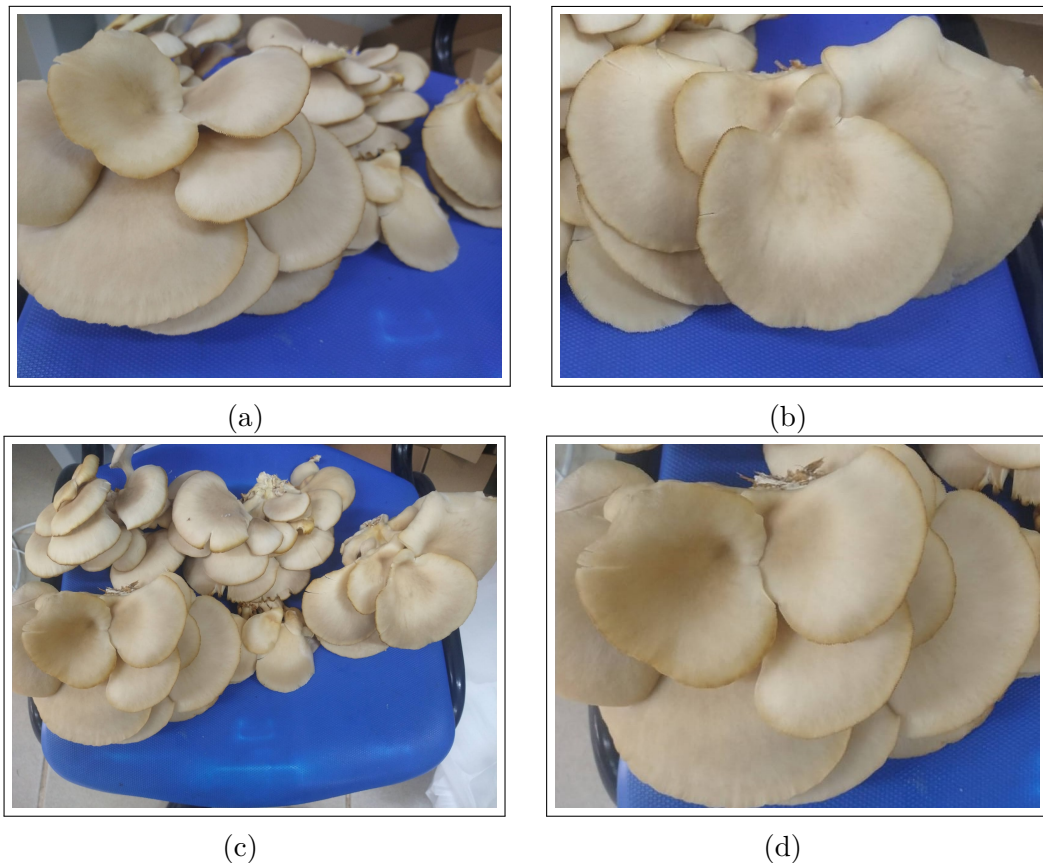


Figura 4.10: Cosecha de hongo seta

La segunda oleada de fructificaciones se registro a los 22 días, con un periodo de latencia de solo 5 días se observaron los primordios a los 20 días. Se obtuvieron un número menor de hongos, pero de buena calidad. El color y aroma de las fructificaciones es el característico. No se observaron presencia de plagas o enfermedades. Los bordes de las fructificaciones no presentaron cortes o resequedad. El sabor y la calidad no se vieron afectados. Durante el periodo de 43 días se mantuvieron las condiciones de luz, temperatura y humedad constantes.

Conclusiones

Se logró validar el modelo matemático [39] ante las condiciones climáticas de Chilchotla, se integró dentro del modelo un calefactor externo expresado por la siguiente ecuación, $\frac{1}{\rho C_p V_T} v_4(t)$, teniendo como resultado en la humedad relativa una variación del 2% por la conversión de H_{abs} a H_R y por el grado de error del sensor que esta entre $\pm 2\%$, estos resultados se encuentra dentro del rangos establecidos. La temperatura mantiene su estado estable en el modelo matemático y físico.

Con la implementación una red de sensores se garantiza un mayor control en la lectura de variables (temperatura, humedad) de forma inalámbrica, La tarjeta ESP8262 tiene una ventaja porque cuenta con Wi-Fi y con un microcontrolador que tiene 2 funciones, controlar actuadores, o dar lectura a sensores digitales. Esta función permite realizar una adecuada distribución de sensores con un rango de hasta 30m alejado de un módem, en este caso se colocan a 5m de radio una ESP de otra para la colocación de sensores.

Los PI basado en eventos [33] presentan un mayor ahorro de energía y de agua al implementarlo en un invernadero, en esta caso se logró tener una eficiencia en consumo de agua y de luz porque al implementar el controlador en un rango de 30min se estima que pasan 128 muestras de señal que se reciben de los sensores y solo de 7 a 10 veces se presenta un evento, es decir, el sistema funciona de 5.4 a 8% teniendo a los actuadores apagados hasta un 90% del tiempo, en comparación un PID analógico convencional que mantienen en su mayoría de tiempo encendidos a los actuadores en climas muy variados.

Contar con un sistema de monitoreo permite tener una estadística de como se encuentra el microclima del invernadero desde cualquier lugar, teniendo dispositivo móvil (laptop, celular, tablet) que contenga acceso a internet, Esto garantiza que no es necesario tener personal que este cuidando del invernadero todo el tiempo.

Controlar la humedad por nebulización también permitió hacer un manejo más eficiente del agua y hacer que los hongos y el sustrato retengan la humedad correcta para su optimo desarrollo.

Se facilitó la salida del aire bajando las concentraciones de CO_2 , que afecta el creci-

miento del hongo, el control de estos parámetros también ayudo a impedir el desarrollo de contaminantes o se humedeciera en exceso impidiendo la fructificación.

De acuerdo con [8], las bolsas deben ser incubadas aproximadamente por 2 a 3 semanas a una temperatura de 25 a 28°C y posteriormente se observarán la aparición de primordios, aproximadamente se requiere de una semana para que se desarrollen los primordios en hongos maduros. Nuestros resultados muestran una reducción en el tiempo de desarrollo de primordios y fructificaciones, desarrollándose los primordios a los 12 días, lo que representaría una disminución de 14.28 y 42.85 % [36].

La eficiencia biológica y la estimación de la productividad de acuerdo con [8],[44], se encuentra dentro de los parámetros reportados para este tipo de cultivos. Ya que adelantamos "el tiempo transcurrido a partir de que se coloco en producción hasta el primer corte de hongos en estado maduro". Recalcando que este periodo debe ser el más corto posible. Al adelantar la fase de producción esto implica un provecho económico mayor y recuperación de la inversión. Por lo que en el cultivo de hongos el periodo de producción se debe tener mucho énfasis en el número de cosechas y bajo que condiciones se desarrollaron y el control de estos parámetros como son la luz, temperatura, humedad y plagas.

Bibliografía

- [1] Raspberry Pi. Raspberry pi 4 model b datasheet. *Raspberry Pi, Pencoed, England*, 2019.
- [2] Alec Jahnke, Director de Producto - Soluciones OEM, Digi International. <https://es.digi.com/blog/post/the-4-stages-of-iot-architectureurl>, 31 de Julio de 2020.
- [3] VLC Components s.l. <https://solectroshop.com/es/blog/que-es-mqtt-el-protocolo-de-comunicacion-para-iot-n117>, 31 de Agosto de 2020.
- [4] S. Durand. Event-based stabilization of linear system with communication delays in the measurements. Proceedings of the American Control Conference, 2013.
- [5] Fernando Morilla, Juan Garrido, and Francisco Vázquez. Control multivariable por desacoplo. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 10(1):3–17, 2013.
- [6] Yesica Mayett and Daniel Martínez-Carrera. El consumo de hongos comestibles y su relevancia en la seguridad alimentaria de mexico. *Los hongos comestibles, funcionales y medicinales: aportacion a la dieta, la salud, la cultura y al sistema agroalimentario de Mexico*, pages 293–329, 2019.
- [7] D Martínez-Carrera, A Aguilar, W Martínez, P Morales, M Sobal, M Bonilla, and A Larqué-Saavedra. A sustainable model for rural production of edible mushrooms in mexico. *Micología Neotropical Aplicada*, 11:77–96, 2004.
- [8] R Gaitán-Hernández. Transferencia de tecnología de cultivo de pleurotus spp. como alternativa de beneficio social y económico en el estado de veracruz. *El cultivo de setas Pleurotus spp. en México. ECOSUR, Tapachula*, pages 101–112, 2007.
- [9] SP Wasser. Medicinal mushrooms as a source of antitumor and immunomodulating polysaccharides. *Applied microbiology and biotechnology*, 60(3):258–274, 2002.
- [10] VM Mora and D Martínez-Carrera. Investigaciones básicas, aplicadas y socioeconómicas sobre el cultivo de setas (pleurotus) en méxico. *El cultivo de setas Pleurotus spp. en México*, pages 69–110, 2007.

- [11] José Antonio Aquino-Robles, Corona R Leonel, and Fernández N Cecilia. La otra mecatrónica verde? la de los invernaderos.
- [12] C Rojas and J Humberto. La cuarta revolución industrial o industria 4.0 y su impacto en la educación superior en ingeniería en latinoamérica y el caribe. *Universidad Antonio Nariño, Colombia*, 2017.
- [13] Andrzej Pawlowski, Jose Luis Guzman, Francisco Rodríguez, Manuel Berenguel, José Sánchez, and Sebastián Dormido. Simulation of greenhouse climate monitoring and control with wireless sensor network and event-based control. *Sensors*, 9(1):232–252, 2009.
- [14] JA Sánchez, F Rodríguez, JL Guzmán, M Berenguel, and MD Fernández. Modelado de la transpiración de un cultivo de tomate bajo invernadero para el diseño de sistemas de control de riego. *XXIX Jornadas de Automática. Tarragona, España*, 2008.
- [15] Manuel Muñoz, Juan D Gil, Lidia Roca, Francisco Rodríguez, and Manuel Berenguel. An iot architecture for water resource management in agroindustrial environments: A case study in almería (spain). *Sensors*, 20(3):596, 2020.
- [16] Abdul Latif, Hendro Agus Widodo, Rachmad Andri Atmoko, Thanh Nguyen Phong, and Elsayed T Helmy. Temperature and humidity controlling system for baby incubator. *Journal of Robotics and Control (JRC)*, 2(3):190–193, 2020.
- [17] Jacques Wu. *Sistema de tiempo real para control de un invernadero*. PhD thesis, E.T.S.I. de Sistemas Informáticos (UPM), 2016.
- [18] Eduardo Antonio Amaya García, Walter Yobani Ramírez Artiga, et al. Diseño de automatización de sistema de riego de invernadero para el desarrollo de la agricultura familiar en el marco de la seguridad alimentaria: en vínculo con la ena. 2017.
- [19] Pedro F Martínez, Dolors Roca, Ricardo Suay, M Martínez, X Blasco, JM Herrero, Carlos Ramos, et al. Avances en el control de los factores del clima para el cultivo en invernadero. *Comunitat Valenciana Agrària-Revista d'Informació Tècnica*, 20:29–47, 2002.
- [20] Alvaro Domingo Gordo Ruíz. Desarrollo e implementación de un invernadero automatizado con cultivo hidropónico y aplicación móvil para el seguimiento de datos. 2017.
- [21] Manuel Alejandro and Palomeque Moran. *Control de un microinvernadero de plantas micropropagadas con labview*. PhD thesis, 2011.

- [22] José Aguado da Costa et al. Desarrollo de un sistema automatizado para un invernadero. 2012.
- [23] Carlos Colombini, Ernesto Forgan, et al. Invernadero automatizado. editorial: Ministerio de educación. *Ciencia y Tecnología de la Nación–Instituto Nacional de Educación Tecnológica. Argentina*, 2005.
- [24] Pere Muñoz, Assumpció Antón, and Juan Ignacio Montero. Tendencias en la construcción de invernaderos: Normas cen y une. sistemas de control ambiental y posibilidades de mecanización de operaciones de cultivo y riego.
- [25] Judith Arlette Villasana Rojas. *Efecto del injerto en la producción de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) bajo condiciones de invernadero en Nuevo León*. PhD thesis, Universidad Autónoma de Nuevo León, 2010.
- [26] Alec Jahnke, Director de Producto - Soluciones OEM, Digi International. <https://solectroshop.com/es/blog/que-es-mqtt-el-protocolo-de-comunicacion-para-iot-n117>, 31 de Julio de 2020.
- [27] Constantine John Alexopoulos, Charles W Mims, Meredith Blackwell, et al. *Introductory mycology*. Number Ed. 4. John Wiley and Sons, 1996.
- [28] Philip G Miles and Shu-Ting Chang. *Mushrooms: cultivation, nutritional value, medicinal effect, and environmental impact*. CRC press, 2004.
- [29] CARLENE A Raper. Sexuality and breeding. *The biology and cultivation of edible mushrooms*, pages 83–117, 1978.
- [30] D Martínez-Carrera, A Aguilar, W Martínez, P Morales, M Sobal, M Bonilla, and A Larqué-Saavedra. A sustainable model for rural production of edible mushrooms in Mexico. *Micología Neotropical Aplicada*, 11:77–96, 2004.
- [31] Solomon P Wasser and Alexander L Weis. Medicinal properties of substances occurring in higher basidiomycetes mushrooms: current perspectives. *International Journal of medicinal mushrooms*, 1(1), 1999.
- [32] SJAMB Wasser. Medicinal mushrooms as a source of antitumor and immunomodulating polysaccharides. *Applied microbiology and biotechnology*, 60:258–274, 2002.
- [33] K-E Årzén. A simple event-based PID controller. In *Preprints of the 14th World Congress of IFAC*, Beijing, P.R. China, 1999.
- [34] S. Durand and N. Marchand. Further results on event-based PID controller. In *Proc. of the European Control Conference (ECC)*, 2009.

- [35] Josué Alberto Pérez Zavala, Leonel Eduardo López Guevara, René David Romero Vásquez, et al. Automatización de invernadero para cultivos hidropónicos en el salvador. *Reproducción del documento original*, 2017.
- [36] A Flores-Montes de Oca and M Contreras-Trujano. Manual de cultivo de hongo seta (pleurotus ostreatus) de forma artesanal. UNAM. Available online at: http://www.huertofenologicounam.com/articulos/Cultivo_de_hongo_seta.pdf, 2012.
- [37] JW Deacon. Introducción a la micología moderna. Technical report, 1988.
- [38] Dulce Salmones, Gerardo Mata, and Rigoberto Gaitán Hernández. 2.2 aportaciones del sector académico en la producción del inóculo de pleurotus spp. *El cultivo de setas Pleurotus spp en México*, pages 143–151, 2007.
- [39] Louis D Albright, KG Arvanitis, and AE Drysdale. Environmental control for plants on earth and in space. *IEEE Control Systems Magazine*, 21(5):28–47, 2001.
- [40] Richard G Allen, Luis S Pereira, Dirk Raes, Martin Smith, et al. Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. *Roma: FAO*, 298(0), 2006.
- [41] Haigen Hu, Lihong Xu, and Ruihua Wei. Nonlinear adaptive neuro-pid controller design for greenhouse environment based on rbf network. In *The 2010 international joint conference on neural networks (IJCNN)*, pages 1–7. IEEE, 2010.
- [42] Juan Sandoval. Balances de materia y energía aplicados a la investigación. 2021.
- [43] Regina M Murphy and José Clemente Reza. Introducción a los procesos químicos: principios, análisis y síntesis. *Serie: Ingeniería química (México)*, 2007.
- [44] Mariano García Rollan. Nuevas técnicas de cultivo del pleurotus ostreatus. 1985.

Apéndices

Apéndice A

Discusión de autores

A.1. Discusión sobre desarrollo vegetativo del hongo seta

De acuerdo con Gaitan, 2007, las bolsas deben ser incubadas aproximadamente por 2 a 3 semanas a una temperatura de 25 a 28°C y posteriormente se observarán la aparición de primordios, aproximadamente se requiere de una semana para que se desarrollen los primordios en hongos maduros. Nuestros resultados muestran una reducción en el tiempo de desarrollo de primordios y fructificaciones, desarrollándose los primordios a los 12 días, lo que representaría una disminución de 14.28 y 42.85 % [8].

Otro autor sugiere que la producción en temperaturas de 12 a 18°C y una humedad del ambiente de 85 a 95 % e iluminación diurna de 60 a 200 lux, con ventilación de 150 m³ reciclando el aire de 5 a 10 veces por hora en su totalidad, en el cultivo industrial o 15°C y humedad grande (rociar) en cultivo domestico, con iluminación diurna y mucha ventilación. Pero con estos parámetros la producción se alarga a 60 días con tandas 3 a 8 días con latencia de 10 a 20 días [44]. Con los parámetros constantes de temperatura, luz y humedad nos permitió acelerar el proceso y obtener hongos de buena calidad con un buen índice biológico.

Controlar la humedad por nebulización también nos permitió hacer un manejo más eficiente del agua y hacer que los hongos y el sustrato retengan la humedad. Se facilito la salida del aire bajando las concentraciones de CO₂ , que afecta el crecimiento del hongo, el control de estos parámetros también ayudo a impedir el desarrollo de contaminantes o se humedeciera en exceso impidiendo la fructificación.

La eficiencia biológica y la estimación de la productividad de acuerdo con Gaitan, 1985, se encuentra dentro de los parámetros reportados para este tipo de cultivos. Ya que adelantamos el tiempo transcurrido a partir de que se coloco en producción hasta el primer corte de hongos en estado maduro. Recalcando que este periodo debe ser el más corto posible.

Al adelantar la fase de producción esto implica un provecho económico mayor y recuperación de la inversión. Por lo que en el cultivo de hongos el periodo de producción se debe tener mucho énfasis en el número de cosechas y bajo que condiciones se desarrollaron y el control de estos parámetros como son la luz, temperatura, humedad y plagas.

Apéndice B

Pruebas de cultivo ante diferentes condiciones climáticas

B.1. Experimento 1

En el primer experimento de cultivo, se observaron los primeros primordios del hongo seta después de dos semanas de incubación en un entorno oscuro a una temperatura constante de 25°C.

Posteriormente, se llevaron a cabo pruebas para evaluar el crecimiento del hongo sin controlar la temperatura, dependiendo únicamente de la luz solar y aplicando riegos con atomizador tres veces al día, como se muestra en la Figura B.1. Sin embargo, surgieron algunos desafíos durante este proceso. Los cambios en los niveles de humedad y los días en los que la luz solar directa no estaba disponible en Chilchotla afectaron negativamente al crecimiento del hongo, resultando en un crecimiento no uniforme.



(a) Recipiente 1



(a) Recipiente 2

Figura B.1: Fructificación de sin ambiente controlado

B.2. Experimento 2

En el segundo experimento, se activaron los ventiladores de entrada de aire y se programó la nebulización para funcionar en intervalos específicos dentro del invernadero, como se muestra en la Figura B.2. En las imágenes (c) de la Figura B.2 y (d) de la Figura B.2, se pueden apreciar los primeros brotes del hongo seta.



(a) Primordios en bolsas



(b) Primordios a explorar bolsa



(c) Primordios primera bolsa



(d) Primordios segunda bolsa

Figura B.2: Fructificación con ambiente cerrado en invernadero

Del día 2 al 3, se observa un crecimiento del tallo pero no del sombrero del hongo, como se puede ver en la Figura B.3(a) y Figura B.3(b). Esto se debe a la falta de un control adecuado del aire y la circulación dentro del invernadero. Aunque se cuenta con una entrada de oxígeno, esta no es suficiente para proporcionar las condiciones ideales para el crecimiento completo del hongo.

Como se puede observar en las Figuras B.3(c) y B.3(d), los hongos comienzan a mostrar signos de sequedad entre el día 4 y 5 del experimento. Esto se debe a que la humedad presente en el ambiente no alcanza los niveles óptimos necesarios para hidratar adecuadamente tanto los sombreros como los tallos de los hongos. Además, los factores mencionados anteriormente, como la falta de control del aire y la circulación insuficiente, contribuyen a este fenómeno.

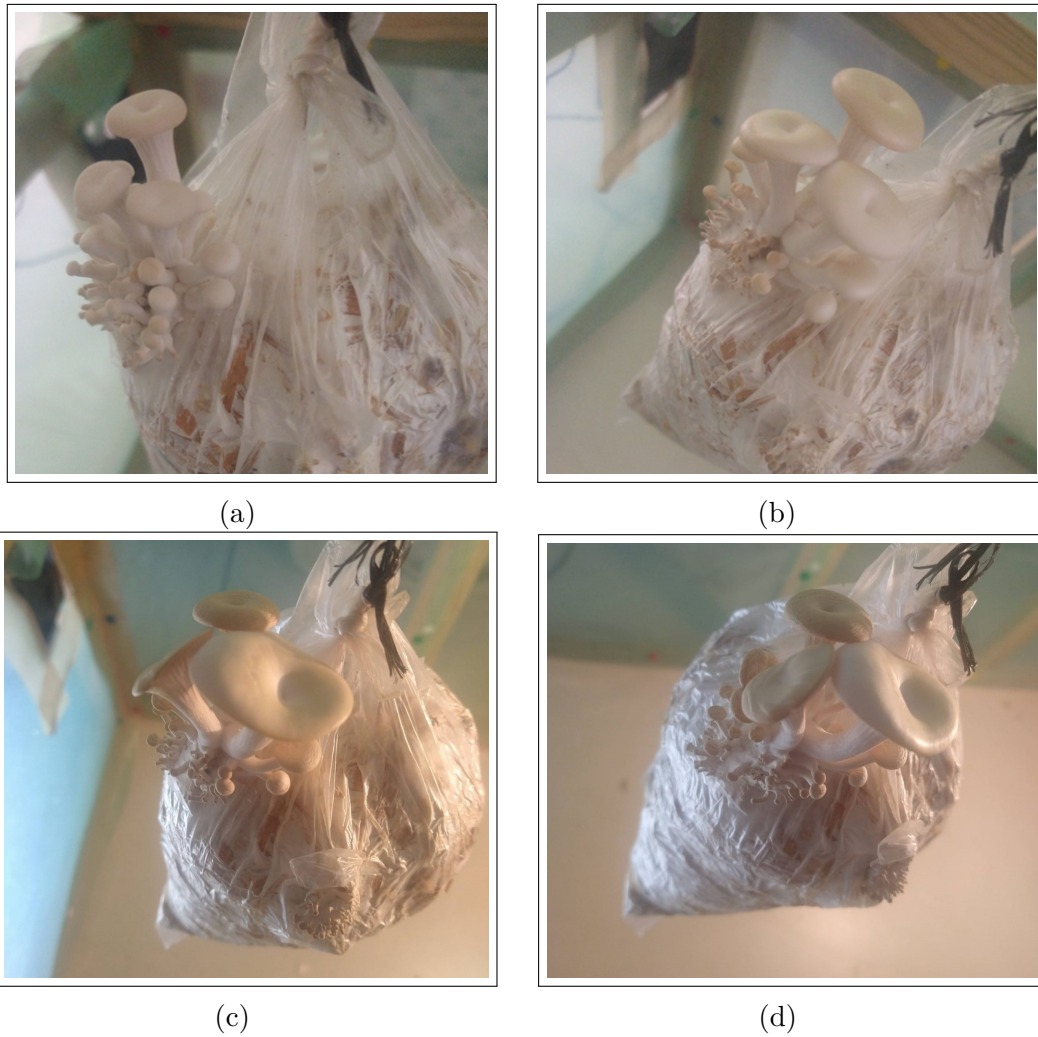


Figura B.3: Hongo momificado

Esta falta de humedad y otros factores ambientales desfavorables provocan que los hongos se momifiquen, es decir, que endurezcan y adquieran un color amarillento, lo que eventualmente conduce a su muerte. Es importante destacar que el correcto manejo de la humedad ambiental es esencial para el crecimiento saludable de los hongos, ya que ayuda a mantener su turgencia y textura adecuadas.