DESARROLLO DE PROTOTIPO DE SISTEMA ELECTRÓNICO AUTOMATIZADO PARA LA MONITORIZACIÓN Y CONTROL DEL CULTIVO DE CHAMPIÑÓN PORTOBELLO EN LA CIUDAD DE TULUÁ VALLE DEL CAUCA

Miguel Alejandro Corrales Mendoza y Luis Andrés Ruiz Ruiz

Unidad Central del Valle del Cauca

Facultad de Ingenierías

Ingeniería Electrónica

Tuluá, Colombia

2025

DESARROLLO DE PROTOTIPO DE SISTEMA ELECTRÓNICO AUTOMATIZADO PARA LA MONITORIZACIÓN Y CONTROL DEL CULTIVO DE CHAMPIÑÓN PORTOBELLO EN LA CIUDAD DE TULUÁ VALLE DEL CAUCA

Miguel Alejandro Corrales Mendoza y Luis Andrés Ruiz Ruiz

Trabajo de grado presentado para optar el título de Ingeniero Electrónico

Director de Tesis: Jhon Mauricio Noguera Jimenez

Co-director de Tesis: Andres Rey Piedrahita

Unidad Central del Valle del Cauca

Facultad de Ingenierías

Ingeniería Electrónica

Tuluá, Colombia

2025

Agradecimientos

Agradecemos, en primer lugar, a Dios por brindarnos la salud, la fortaleza y la perseverancia necesarias para culminar exitosamente este proceso académico y personal.

Queremos expresar nuestra sincera gratitud al ingeniero Jhon Mauricio Noguera Jimenez, director de esta tesis, por su acompañamiento, orientación constante, paciencia y valiosos aportes durante todas las etapas de este trabajo. Su experiencia y compromiso han sido fundamentales para nuestro desarrollo profesional y la calidad de este proyecto.

A nuestros padres y familias, quienes con su amor, apoyo incondicional y comprensión han sido la base que sostuvo nuestros esfuerzos, motivándonos a cada paso y enseñándonos el valor de la disciplina y la dedicación. Su ejemplo y confianza nos impulsaron a superar cada desafío.

Reconocemos también el valioso respaldo de la Unidad Central del Valle del Cauca y de la Facultad de Ingenierías, así como de los profesores que nos formaron a lo largo de la carrera, por generar un ambiente de aprendizaje y crecimiento personal y profesional.

Queremos destacar el apoyo fundamental de Jorge Suárez, fundador y gerente general de Funglus S.A.S., por su asesoría técnica experta y la donación del compost patentado utilizado en el experimento, así como su compromiso con la innovación agrícola en Colombia. De igual manera, agradecemos a Ricardo Jeske de la empresa Champis, por su valiosa colaboración en la entrega del material y la tierra de cobertura necesarios para la producción, facilitando el avance del prototipo.

Agradecemos especialmente a los compañeros que compartieron este camino, por su colaboración, amistad y apoyo inquebrantable. El intercambio de conocimientos, las ideas y el trabajo en equipo han enriquecido esta experiencia de manera significativa.

Finalmente, extendemos nuestro agradecimiento a todas las entidades, empresas y personas que aportaron materiales, conocimientos, asesoría técnica o recursos para la realización del prototipo y la validación experimental de este trabajo. Su generosidad y disposición hicieron posible concretar este proyecto.

A todos, muchísimas gracias por hacer parte de esta meta alcanzada y por confiar en nuestro potencial como nuevos profesionales de la ingeniería.

Tabla de Contenido

Contenido

Abstract 9
Resumen 10
1. Introducción 11
2. Justificación 13
3. Antecedentes 16
3.1. Estado del arte 16
3.2. Evolución del Cultivo de Agaricus bisporus 16
3.2.1. Orígenes y Métodos Tradicionales 16
3.2.2. Desarrollo de Técnicas Científicas 16
3.2.3. Cultivo Moderno y Automatización 17
3.3. Proyectos Relacionados con Sistemas de Invernaderos Automatizados 17
3.3.1. Monitoreo Ambiental para Cultivo de Hongos 17
3.3.2. Invernadero Automatizado para Agricultura Urbana 17
3.3.3. Prototipo para la Producción de Hongos en Climas Tropicales 18
3.4. Avances Tecnológicos en la Producción de Agaricus bisporus 18
3.4.1. Sensores Ambientales 18
3.4.2. Celdas Peltier y Sistemas de Refrigeración 18
3.4.3. Plataformas IoT y Análisis de Datos 19
3.4.4. Desafíos y Limitaciones 19
3.5. Antecedentes del Cultivo de Agaricus bisporus en Colombia 19
3.6. Situación Actual del Uso de Tecnologías para el Cultivo de Agaricus bisporus en Colombia 21
3.6.1. Grandes Productores 21
3.6.2. Pequeños y Medianos Productores 22
3.6.3. Proyectos e Innovaciones en Colombia 23
3.6.4. Desafíos y Perspectivas 23
4. Planteamiento del Problema 27
5. Objetivos 29
5.1. Objetivo General 29
5.2. Objetivos Específicos 29
6. Marco de Referencia 30

6.1. Agricultura de precisión 30
6.2. Variables Ambientales Críticas en el Cultivo de Champiñón Portobello 30
6.3. Microcontroladores 31
6.3.1. Ventajas de los Microcontroladores en Agricultura de Precisión 32
6.4. Transmisión de datos 34
6.5. Sensores 38
6.5.1. Importancia de los Sensores en Agricultura de Precisión 39
6.5.2. Sensores para Medir Variables Ambientales 40
6.5.3. Sensores para Medir la Humedad del Suelo 42
6.6. Celdas de Peltier 44
6.7. Plataforma en la nube 44
6.8. Diseño Estructural del Invernadero 45
6.9. Automatización del Riego 45
7. Metodología 47
8. Desarrollo del Proyecto 49
8.1. Etapa 1: Diagnóstico inicial 49
8.1.1. Objetivo de la etapa 49
8.1.2. Etapa de incubación (fase vegetativa) 49
8.1.3. Etapa de fructificación (fase reproductiva) 50
8.2. Etapa 2: Diseño del sistema 52
8.2.1. Objetivo de la etapa 52
8.2.2. Especificaciones del sistema 52
8.3. Etapa 3: Implementación del sistema 59
8.3.1. Objetivo de la etapa 59
8.3.2. diseño y ensamblaje de la estructura 59
8.4. Etapa 4: Verificación y análisis 71
8.4.1. Objetivo de la etapa 71
8.4.2. Verificacion y análisis del prototipo 71
9. Análisis de Resultados 84
10. Conclusiones 99
11. Recomendaciones 100
12. Referencias Bibliográficas 101

Tabla de Figuras

Figura 1. Imagen del Microcontrolador ESP32 Utilizado para el Sistema de Monitoreo 53
Figura 2. Imagen del Módulo Xbee Utilizado para el Sistema de Monitoreo 53
Figura 3. Imagen del Sensor SCD-40 Utilizado para el Sistema de Monitoreo 54
Figura 4. Imagen del Sensor HD-38 Utilizado para el Sistema de Monitoreo 55
Figura 5. Imagen de la Celda de Peltier Utilizada para el Sistema de Monitoreo 56
Figura 6. Esquema general del diseño del prototipo automatizado para el cultivo de champiñón portobello 58
Figura 7. fragmento de código que envía manualmente una trama de comunicación en modo API para módulos XBee 63
Figura 8. Estructura Hermética de Tipo Cubico Utilizada en el Proyecto..... 68
Figura 9. Bandejas de Cultivo en Laminas de Zinc Galvanizadas 69
Figura 10. Sistema de Refrigeración Utilizando Celdas de Peltier..... 71
Figura 11. Puerta Corrediza Mediante un Servomotor 76
Figura 12. Compost con Semilla Inoculada del Hongo Agaricus Bisporus 80
Figura 13. Relación entre el peso total de producción y la producción en mal estado de champiñón portobello durante el ciclo de cultivo 83
Figura 14. Grafica de Valores Obtenidos del Sensor de Temperatura 85
Figura 15. Grafica de Valores Obtenidos del Sensor de Humedad Relativa 86
Figura 16. Grafica de Valores Obtenidos del Sensor de Humedad del Sustrato 87
Figura 17. Producción Evidenciada Antes de Realizar una Recolección 89
Figura 18. Champiñón Portobello Recolectado de un Ciclo..... 90
Figura 19. Champiñón Recolectado Durante una Determinada Colecta 90
Figura 20. comportamiento y la estabilidad de las variables de temperatura, humedad relativa y humedad 97

Tabla de Tablas

Tabla 1. Perfil Alimenticio de Agaricus bisporus (Champiñón Portobello)..... 14
Tabla 2. Avances Tecnológicos en la Producción de Agaricus bisporus (Champiñón Portobello 24
Tabla 3. Características Comparativas de Microcontroladores 33
Tabla 4. Características Comparativas de Tecnologías de Transmisión de Datos 36
Tabla 5. Características de Sensores Ambientales..... 41
Tabla 6. Características de Sensores de Humedad del Suelo..... 43
Tabla 7. Primera Prueba de Control de Temperatura..... 76
Tabla 8. Segunda Prueba de Control de Temperatura 77
Tabla 9. Tercera Prueba de Control de Temperatura 77
Tabla 10. Cantidad en Gramos de Champiñón Portobello Durante la Producción..... 81
Tabla 11. Tabla comparativa entre champiñón del prototipo y referencias comerciales..... 91
Tabla 12. Costo Operativo de Consumo de Energía Eléctrica y Agua. 92
Tabla 13. Costo en pesos colombianos del Prototipo 93

Abstract

The increasing global population and the challenges related to food security, particularly in climates unfavorable for certain crops, highlight the need for innovative agricultural solutions. In Colombia, mushroom cultivation, specifically *Agaricus bisporus* (Portobello), presents a high nutritional value and economic potential but requires precise environmental conditions that are difficult to maintain in tropical regions. This thesis presents the design, implementation, and evaluation of an automated electronic system for monitoring and controlling temperature, humidity, CO_2 concentration, and substrate quality in Portobello mushroom cultivation in Tuluá, Valle del Cauca. The system integrates IoT technology (ESP32 microcontrollers, ZigBee, SCD-40 and HD-38 sensors) with ThingSpeak for real-time monitoring and data analysis. Controlled experiments demonstrated that the prototype maintained optimal fruiting conditions (13-18 °C, 75-80% relative humidity) with stability and rapid recovery after disturbances. Production trials over multiple cycles resulted in 21.2 kg of mushrooms with minimal losses (5.6%). The system proved viable for enabling sustainable mushroom production in non-traditional regions, reducing energy and water consumption, and offering a replicable alternative for small-scale farmers.

Keywords: Precision agriculture, *Agaricus bisporus*, IoT, automated control, environmental monitoring, sustainable agriculture.

Resumen

El aumento poblacional y las limitaciones para producir alimentos en determinadas condiciones climáticas demandan soluciones innovadoras en el sector agrícola. En Colombia, el cultivo de champiñón Portobello (*Agaricus bisporus*) destaca por su alto valor nutricional y su potencial económico; sin embargo, requiere un control preciso de variables ambientales que dificulta su producción en regiones tropicales. Esta tesis presenta el diseño, desarrollo e implementación de un prototipo de sistema electrónico automatizado para la monitorización y control de temperatura, humedad relativa, concentración de CO_2 y calidad del sustrato, aplicado al cultivo de champiñón en Tuluá, Valle del Cauca. El sistema integra tecnologías IoT (microcontroladores ESP32, comunicación ZigBee, sensores SCD-40 y HD-38) y la plataforma ThingSpeak para visualización y análisis de datos en tiempo real. Las pruebas demostraron que el prototipo mantiene de manera estable las condiciones óptimas de fructificación (13-18 °C, 75-80% HR) y recupera rápidamente los parámetros ante variaciones externas. En los ciclos de producción realizados se obtuvieron 21,2 kg de champiñones con solo un 5,6% de pérdidas, reduciendo también el consumo de energía y agua. Los resultados validan la viabilidad de esta solución como alternativa sostenible y replicable para pequeños productores.

Palabras clave: Agricultura de precisión, *Agaricus bisporus*, IoT, control automatizado, monitoreo ambiental, producción sostenible.

1. Introducción

El aumento poblacional y las dificultades vinculadas a la nutrición representan retos significativos para la humanidad, particularmente en regiones donde el clima obstaculiza la producción de determinados alimentos. En Colombia, la seguridad alimentaria se encuentra con desafíos considerables a causa de factores como la pobreza, la inequidad y la ausencia de acceso a alimentos saludables. El Agaricus bisporus, comúnmente conocido como champiñón de París, surge como una opción atractiva para tratar estas demandas. Este hongo se distingue por su considerable contribución nutricional: está abundante en proteínas, vitaminas B y D, y minerales vitales como el selenio, el fósforo y el potasio. Adicionalmente, su ingesta ofrece numerosas ventajas para la salud, tales como potenciar la salud de los huesos, robustecer el sistema inmunológico y contribuir a controlar los niveles de glucosa en la sangre, su producción se puede hacer en espacios relativamente pequeños en comparación con otro tipo de cultivos.

El Agaricus bisporus requiere temperaturas reguladas que pueden oscilar entre los 8°C y los 20°C, así como una humedad relativa que varía entre el 75% y 90%, además de la falta de luz solar directa. De acuerdo con Van Griensven, L. J. L. D. (1988), las etapas de cultivo comprenden una fase crucial de fructificación, en la que la temperatura debe ser casi exacta para fomentar un crecimiento constante y saludable. Estas circunstancias también son afectadas por la estructura del sustrato, que demanda elevados grados de nitrógeno y un pH balanceado. Estos requisitos complican su cultivo en la mayoría de la región colombiana, particularmente en zonas con climas tropicales como Tuluá, Valle del Cauca. Además, este mercado está dominado por escasas compañías en Colombia, lo que restringe el acceso de los pequeños agricultores y restringe la diversificación de su cultivo y comercialización.

El propósito de este proyecto es ofrecer una solución a la situación previamente citada, utilizando los saberes adquiridos a lo largo de la carrera de ingeniería electrónica así como tecnologías existentes, para desarrollar e implementar un prototipo de invernadero automatizado que permita la producción de este champiñón en una zona tropical que no cuenta con las condiciones óptimas para su cultivo, supervisando y controlando factores esenciales como la temperatura, la humedad y el dióxido de carbono, dado que, como se menciona en Van Den Munckhof-Vedder, M. (2020), el monitoreo preciso de estas variables es esencial no sólo para garantizar altos rendimientos, sino también para evitar plagas y enfermedades comunes que afectan el cultivo en condiciones no controladas.

2. Justificación

La automatización implica el uso de la tecnología para llevar a cabo labores prácticamente sin la intervención de personal. Es posible aplicarlo en cualquier sector, incluso el agro, donde se realicen actividades repetitivas. No obstante, es más habitual en aquellos vinculados con la producción, la robótica y los vehículos, así como en el ámbito tecnológico: en el software de decisiones empresariales y los sistemas de TI (Red Hat, 2018).

Colombia es un país geográficamente privilegiado, ya que cuenta con todo tipo de condiciones climáticas y tierras idóneas para la producción de diversos alimentos. No obstante, en los últimos años, el campo se ha visto muy abandonado, lo que ha generado un estancamiento en cuanto a innovación tecnológica en comparación con otras áreas industriales del país. Expertos han afirmado que el sector agrícola es el más rezagado en cuanto a procesos de automatización en Colombia (Pedreros, 2023). Diversos estudios y publicaciones recientes destacan la automatización agrícola como una estrategia clave para impulsar la productividad de los campos. Investigaciones científicas demuestran que la automatización, mediante inteligencia artificial y sistemas robotizados, ha incrementado la eficiencia y el rendimiento en la producción agrícola, facilitando la gestión precisa de recursos y mejorando la sostenibilidad del sector (Jha et al., 2019; Gutierrez-Li et al., 2024). Además, organismos internacionales como la FAO y publicaciones especializadas resaltan que la automatización permite reducir el uso de insumos, optimizar procesos y enfrentar los desafíos del cambio climático, aunque advierten que el acceso a estas tecnologías sigue siendo desigual, especialmente para pequeños productores (FAO, 2022; IGrowNews, 2025; Intellias, 2025).

En este trabajo se propone abordar esta problemática aplicando la automatización a la agricultura de precisión, específicamente al cultivo del Agaricus bisporus. Este champiñón apto

para el consumo es muy apreciado en la gastronomía global por su perfil nutricional y ventajas para la salud, tales como su reducido contenido calórico, gran cantidad de proteínas y abundante contenido en vitaminas y minerales (Tabla 1). Adicionalmente, su producción puede transformarse en una actividad económica sustentable y viable para las comunidades de agricultores.

Tabla 1.

Perfil Alimenticio de Agaricus bisporus (Champiñón Portobello)

Valor Nutricional por Cada 100 gr	
Calorías	22
Grasas Totales	0,3
Ácidos Grasos Saturados	0,1
Colesterol	0
Sodio	0,005
Potasio	0,318
Hidrato de Carbono	3,3
Fibra Alimentaria	1
Azúcares	2
Proteínas	3,1

Nota. Esta tabla muestra el contenido de macronutrientes y otros componentes relevantes presentes en 100 gramos de champiñón, proporcionando una visión general de su valor como alimento funcional y saludable. **Autor:** Datos tomados de “Champiñón portobello (kg) - Delahuertacasa” (s.f.).

El cultivo del Agaricus bisporus demanda relativamente escasos recursos y puede llevarse a cabo en áreas limitadas, lo que lo hace una alternativa atractiva para los agricultores de pequeña escala. Su elevada demanda en el mercado y su costo competitivo constituyen una considerable oportunidad económica para atenuar el conflicto alimentario, potenciando la economía de las comunidades agrícolas.

Dado que este hongo necesita condiciones climáticas específicas para su producción, su cultivo está restringido a ciertas zonas geográficas de Colombia. Para superar esta limitación, este proyecto propone la creación de un prototipo de sistema automatizado que genere las condiciones necesarias para la producción del Agaricus bisporus. Además, se busca automatizar el riego y censar variables importantes como la humedad relativa, la humedad del suelo y el CO2, mejorando así la calidad y cantidad del cultivo.

La implementación de tecnologías inalámbricas, microcontroladores y plataformas de computación en la nube facilitará la recopilación y estudio de datos en tiempo real, optimizando la representación de resultados y facilitando la toma de decisiones basadas en información. Este proyecto no solo promueve la innovación en la industria agrícola, sino que también aporta al avance de soluciones tecnológicas sustentables y de fácil acceso.

3. Antecedentes

3.1. Estado del arte

El cultivo del Agaricus bisporus, comúnmente conocido como champiñón de París, ha evolucionado de métodos rudimentarios a sistemas tecnificados que integran herramientas digitales y soluciones automatizadas. Este avance responde tanto a la creciente demanda de productos agrícolas sostenibles como a los retos asociados al control preciso de las condiciones necesarias para su cultivo. A continuación, se presenta una revisión histórica, tecnológica y conceptual de los desarrollos relacionados con este cultivo y su monitorización.

3.2. Evolución del Cultivo de Agaricus bisporus

3.2.1. Orígenes y Métodos Tradicionales

El cultivo del Agaricus bisporus comenzó en el siglo XVII en Francia, cuando los agricultores observaron que estos hongos prosperan en cuevas debido a las condiciones naturales de temperatura y humedad controladas. Según Van Griensven (1988), estos métodos iniciales dependían de sustratos naturales no tratados y carecían de técnicas específicas para evitar contaminaciones. Sin embargo, el uso de estiércol de caballo como sustrato principal marcó un hito, ya que proporciona los nutrientes necesarios para un cultivo básico.

3.2.2. Desarrollo de Técnicas Científicas

A mediados del siglo XIX, los avances en microbiología permitieron identificar el ciclo de vida del Agaricus bisporus, facilitando la introducción de métodos de pasteurización y selección de esporas. Esto mejoró la productividad y redujo el riesgo de contaminación. Van Den Munckhof-Vedder (2020) señala que el control de la calidad del sustrato y la identificación de

parámetros ideales de crecimiento, como una humedad relativa del 75%-80% y temperaturas entre 12°C y 18°C, fueron esenciales para transformar el cultivo en una actividad predecible y rentable.

3.2.3. Cultivo Moderno y Automatización

En las últimas décadas, el cultivo del Agaricus bisporus ha pasado de ser una práctica artesanal a una industria altamente tecnificada. Esto incluye el uso de sistemas cerrados de invernaderos que permiten controlar la temperatura, humedad, concentración de CO2 y luz. Según Van Den Munckhof-Vedder (2020), la adopción de sensores avanzados, actuadores automatizados y plataformas de análisis de datos ha optimizado significativamente la producción, reduciendo pérdidas y aumentando la calidad del producto final.

3.3. Proyectos Relacionados con Sistemas de Invernaderos Automatizados

3.3.1. Monitoreo Ambiental para Cultivo de Hongos

El proyecto de Quiñones-Cuenca et al. (2020), que implementa redes inalámbricas de sensores (RSI) e IoT, ha demostrado la eficacia de tecnologías como ZigBee y LoRaWAN en la monitorización ambiental. Este sistema, desarrollado para cultivos en Ecuador, integra sensores de temperatura, humedad y CO2 con plataformas de visualización en línea como Grafana. Aunque no está específicamente diseñado para el Agaricus bisporus, establece un precedente importante para el uso de tecnologías de bajo costo en la agricultura de precisión.

3.3.2. Invernadero Automatizado para Agricultura Urbana

El proyecto de Singh et al. (2022) combina IoT con inteligencia artificial (IA) para desarrollar un sistema de monitoreo de microclimas en la agricultura urbana de la India. Este

sistema utiliza sensores conectados a través de LoRaWAN para recopilar datos sobre temperatura, humedad y calidad del suelo, ajustando automáticamente las condiciones internas del invernadero. Aunque se centra en cultivos de hortalizas, los principios y tecnologías son aplicables al cultivo de hongos, especialmente en entornos urbanos.

3.3.3. Prototipo para la Producción de Hongos en Climas Tropicales

En el caso colombiano, Herrera Rubio y Ortiz (2022) desarrollaron un sistema de monitoreo para avicultura que comparte similitudes con los requisitos del cultivo de Agaricus bisporus. Este proyecto utiliza tecnologías IoT para controlar parámetros ambientales y evitar fluctuaciones que afectan la productividad. Aunque el enfoque es distinto, sirve como referencia para la implementación de sistemas que requieran precisión y escalabilidad.

3.4. Avances Tecnológicos en la Producción de Agaricus bisporus

3.4.1. Sensores Ambientales

Los sensores juegan un papel crucial en la producción moderna del Agaricus bisporus. Van Griensven (1988) destaca que sensores de temperatura, humedad y CO2 son esenciales para garantizar el equilibrio en las condiciones del invernadero. En proyectos más recientes, como los descritos por Quiñones-Cuenca et al., el uso de sensores conectados a microcontroladores ESP32 permite una monitorización y control en tiempo real, maximizando el rendimiento del cultivo.

3.4.2. Celdas Peltier y Sistemas de Refrigeración

Las celdas Peltier, o módulos termoeléctricos, se utilizan en sistemas de refrigeración para aplicaciones de tamaño reducido, ofreciendo una solución ecológica y limpia sin emisiones nocivas (PDF), estas celdas, combinadas con aislantes térmicos como el poliestireno extruido,

son ideales para mantener las temperaturas entre 12°C y 18°C, evitando variaciones bruscas que podrían dañar el crecimiento del micelio, además en el contexto de invernaderos pequeños, estos dispositivos pueden integrarse en sistemas de climatización para mantener condiciones óptimas, esenciales para el crecimiento adecuado de cultivos sensibles, debido a su capacidad para controlar la temperatura de forma casi precisa y su tamaño compacto que las hacen adecuadas para espacios reducidos donde el control ambiental es crucial.

3.4.3. Plataformas IoT y Análisis de Datos

El uso de plataformas IoT para el monitoreo y análisis de datos es un avance clave en la agricultura de precisión. En este proyecto, se emplea ThingSpeak, una plataforma en la nube diseñada para la recopilación, análisis y visualización de datos en tiempo real. ThingSpeak permite la integración sencilla con microcontroladores como el ESP32, facilitando el monitoreo continuo de variables críticas del cultivo. Además, su capacidad para almacenar datos históricos permite optimizar las condiciones ambientales y mejorar la productividad en futuras cosechas, al generar tendencias y alertas automatizadas basadas en los valores registrados.

3.4.4. Desafíos y Limitaciones

A pesar de los avances tecnológicos, persisten desafíos importantes. El costo inicial de los sistemas automatizados y la falta de acceso a estas tecnologías en países en desarrollo limitan su adopción. Van Griensven (1988) subraya que el éxito en la expansión del cultivo de Agaricus bisporus dependerá de la accesibilidad de estas soluciones para pequeños agricultores, así como del diseño de sistemas de bajo costo y fácil implementación.

3.5. Antecedentes del Cultivo de Agaricus bisporus en Colombia

El cultivo del Agaricus bisporus en Colombia comenzó a mediados del siglo XX como una alternativa a la agricultura tradicional. Inicialmente, los métodos empleados eran rudimentarios, basados en prácticas desarrolladas en Europa, como el uso de estiércol de caballo como sustrato y el aprovechamiento de cuevas o espacios con condiciones similares. Sin embargo, estas técnicas resultaron ineficientes en el contexto climático colombiano, donde las altas temperaturas y la humedad relativa variable dificultaban el manejo adecuado del cultivo.

En las décadas de 1980 y 1990, el sector experimentó un crecimiento impulsado por la demanda interna de champiñones, especialmente en las principales ciudades como Bogotá, Medellín y Cali. Durante este periodo, empresas especializadas comenzaron a importar tecnologías y adaptar invernaderos cerrados que permitieran un mejor control de las condiciones climáticas. Sin embargo, el costo elevado de estas tecnologías restringió su uso a grandes productores.

A finales del siglo XX y principios del XXI, el auge de la agricultura de precisión a nivel global también influyó en el cultivo de hongos en Colombia. Se introdujeron métodos para pasteurizar sustratos y controlar la humedad y temperatura mediante sistemas básicos automatizados. A pesar de estos avances, la tecnología disponible seguía siendo limitada en alcance y accesibilidad para pequeños y medianos agricultores.

Según Colfungi, la Asociación Colombiana de Productores de Hongos, el mercado del champiñón en Colombia está dominado por aproximadamente 10 empresas, la mayoría ubicadas en el altiplano cundiboyacense. Esta región ofrece condiciones climáticas más cercanas a las óptimas para el cultivo, pero aun así requiere el uso de invernaderos para mantener temperaturas entre 12°C y 18°C y humedad relativa de 75%-80%.

3.6. Situación Actual del Uso de Tecnologías para el Cultivo de Agaricus bisporus en Colombia

En Colombia, el cultivo de *Agaricus bisporus* ha alcanzado un nivel de tecnificación que permite competir en el mercado interno, pero aún enfrenta desafíos significativos. Las grandes empresas utilizan tecnologías avanzadas, mientras que los pequeños agricultores recurren a métodos tradicionales o híbridos debido a la falta de recursos económicos y acceso a herramientas tecnológicas.

Un ejemplo destacado de innovación en este sector es Funglus S.A.S., una empresa colombiana dedicada a la producción de champiñones y compost de alta calidad. Funglus produce aproximadamente 385 toneladas de compost sembrado por mes, lo que resulta en 100 toneladas de hongos en diferentes regiones del país. Además, la empresa ha implementado procesos innovadores protegidos a través de patentes, lo que les permite transformar los cultivos de los champicultores colombianos y mejorar la eficiencia en la producción.

Esta empresa no solo ha logrado estandarizar el compostaje con materias primas locales, sino que también ha introducido métodos que garantizan una menor incidencia de contaminantes en el sustrato, mejorando así la calidad del cultivo. Este modelo ha sido reconocido como una estrategia clave para impulsar la producción sostenible y aumentar la competitividad del sector. Según reportes de la industria, Funglus también brinda capacitación y asesoramiento técnico a pequeños productores, facilitando la integración de tecnologías innovadoras en sus operaciones.

3.6.1. Grandes Productores

Los grandes productores han adoptado sistemas cerrados de invernaderos que incorporan tecnologías como:

- Sensores de temperatura y humedad para garantizar condiciones óptimas.
- Sistemas de ventilación automatizados que controlan el flujo de aire y reducen la concentración de CO2.
- Pasteurización de sustratos, lo que minimiza la presencia de contaminantes y asegura un ambiente limpio para el cultivo.
- Uso de plataformas IoT para monitorear variables críticas en tiempo real, generando alertas en caso de desviaciones.

A pesar de estas herramientas, el costo inicial de implementación es elevado. Según Colfungi, un sistema de invernadero completamente automatizado puede costar entre 50 y 100 millones de pesos colombianos (alrededor de 12,000 a 25,000 dólares), lo que limita su adopción.

3.6.2. Pequeños y Medianos Productores

Los pequeños productores, que representan una fracción significativa de los agricultores en Colombia, enfrentan barreras económicas y técnicas para acceder a estas tecnologías. Muchos de ellos utilizan estructuras simples como túneles plásticos o espacios cerrados adaptados, pero carecen de herramientas avanzadas para el control de variables.

- Control manual: En la mayoría de los casos, la temperatura y la humedad se controlan mediante métodos manuales, lo que resulta ineficiente y poco preciso.
- Sustratos locales: Aunque económicos, los sustratos utilizados por pequeños productores suelen estar menos procesados, aumentando el riesgo de contaminación.

- Limitado acceso a financiamiento: Los créditos para la implementación de tecnologías avanzadas en la agricultura no siempre están disponibles para estos agricultores.

3.6.3. Proyectos e Innovaciones en Colombia

Existen iniciativas recientes que buscan democratizar el acceso a tecnologías para el cultivo de hongos:

- Proyecto de Agricultura Urbana (Bogotá): Implementado por una universidad local, este proyecto combina sensores básicos y celdas Peltier para mantener condiciones estables en espacios urbanos reducidos, promoviendo el cultivo de hongos en entornos no tradicionales.

- Red de Invernaderos Experimentales (Cundinamarca): Con el apoyo del gobierno regional, algunos productores medianos han recibido subvenciones para instalar sistemas de monitoreo básicos, integrando sensores de temperatura y humedad conectados a microcontroladores como Arduino o ESP32.

- Programas de Capacitación: Organizaciones como Colfungi han lanzado talleres para enseñar a pequeños agricultores sobre el manejo adecuado del cultivo, incluyendo el uso de tecnologías de bajo costo.

3.6.4. Desafíos y Perspectivas

- Accesibilidad y Costo: El principal desafío radica en reducir los costos de implementación de tecnologías avanzadas, permitiendo que más agricultores puedan adoptarlas.

- Adaptación Climática: A pesar de los avances, la variabilidad climática sigue siendo un problema en regiones como el Valle del Cauca, donde las temperaturas suelen ser más altas de lo recomendado.
- Innovación en Tecnologías Locales: Existe una oportunidad para desarrollar soluciones tecnológicas adaptadas a las necesidades y capacidades económicas de los pequeños productores colombianos.

En conclusión, el cultivo del Agaricus bisporus en Colombia ha avanzado significativamente gracias a la tecnificación, pero sigue siendo una actividad dominada por grandes productores. Este proyecto busca contribuir a democratizar el acceso a tecnologías para pequeños agricultores, promoviendo la sostenibilidad y la autonomía alimentaria en el país.

Tabla 2.

Avances Tecnológicos en la Producción de Agaricus bisporus (Champiñón Portobello)

TITULO	TEMA PRINCIPAL	APORTES RELEVANTES	FUENTE
Sustainable Use of CO2 and Wastewater from Mushroom Farm for Chlorella vulgaris Cultivation	Uso sostenible de CO2 y aguas residuales para cultivo de microalgas.	Uso de microcontroladores para captura y mezcla de CO2; mejora de biomasa en aguas tratadas; sinergia entre desechos agrícolas y biotecnología sostenible.	MDPI
Current Development of Mushroom Biotechnology in Latin America	Avances en biotecnología de hongos en América Latina.	Sistemas de monitoreo ambiental, nuevos sustratos, y producción sostenible.	Redalyc

Eco-Efficiency in Mushroom Production	Reducción de consumo energético y emisiones de CO2 en cultivo de hongos.	Uso de sistemas HVAC para optimización energética y sostenibilidad ambiental.	MDPI
Sustainability of Mushroom Cultivation Systems	Sistemas sostenibles en cultivo de hongos.	Reutilización de residuos; reducción de impacto ambiental; mejora en eficiencia hídrica y energética.	MDPI
Comparative Assessment of Treatment of Mushroom Farm Wastewater Using Plant and Algae	Tratamiento de aguas residuales de granjas de hongos.	Optimización del uso de agua con plantas y algas; remoción de contaminantes.	MDPI
IoT-Based Mushroom Cultivation System	Sistemas IoT para cultivo de hongos.	Monitoreo en tiempo real de temperatura y humedad; reducción de intervención manual.	MDPI
Diseño y control de sistema automatizado modular para el cultivo de hongos comestibles	Diseño de sistema automatizado modular para cultivos.	Optimización de condiciones ambientales para producción de hongos.	CIATEQ
Colonización miceliar de Flammulina mexicana a partir de inóculo líquido	Cultivo de micelio con inóculo líquido.	Crecimiento miceliar y velocidad de producción optimizada.	Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas
Diseño y adaptación de un invernadero para la producción de hongos comestibles	Invernadero adaptado para cultivos.	Uso de residuos agrícolas como sustrato; enfoque ecológico.	UAM
Aislamiento in vitro de Agaricus bisporus a partir de diferentes medios de cultivo	Aislamiento in vitro de Agaricus bisporus.	Optimización de medios de cultivo y condiciones de luminosidad.	CENIDA

Nota. Esta tabla presenta los avances tecnológicos clave que han impactado la producción de champiñones Agaricus bisporus, incluyendo el uso de sensores avanzados y la implementación de plataformas IoT para el monitoreo de variables críticas. **Autor**: elaboración propia.

4. Planteamiento del Problema

La problemática alimentaria es una inquietud global debido al aumento de la población y los retos a los que se enfrenta la producción de alimentos. La seguridad en la alimentación, la nutrición y la disponibilidad de alimentos sanos son aspectos cruciales que necesitamos tratar para incrementar la calidad de vida. En Colombia, los problemas de alimentación tienen una relación más íntima con la pobreza, la inequidad y la ausencia de acceso a alimentos adecuados y nutritivos.

Una alternativa para aliviar esta circunstancia podría ser fomentar el desarrollo de la automatización en el campo y la agricultura de precisión, proyectos enfocados a la producción de alimentos saludables que no necesiten de grandes extensiones de tierra para producir un volumen considerable como el cultivo del champiñón Agaricus bisporus, que se distingue por su reducido aporte calórico y su elevado valor nutricional (Tabla 1). Este hongo proporciona un valioso suministro de proteínas, fundamental en alimentación vegetariana, además de albergar vitaminas de las clases B y D, además de minerales como el selenio, el fósforo y el potasio. En general, estos nutrientes contribuyen a la absorción energética de los alimentos y ayudan a evitar la osteoporosis, una enfermedad que deteriora los huesos y los hace más susceptibles a fracturas.

El consumo de Agaricus bisporus puede contribuir a disminuir los niveles de glucosa en la sangre y, debido a su aporte de cobre, resulta beneficioso para preservar la salud de los vasos sanguíneos y nervios. Una de sus características más destacadas es su habilidad antioxidante, gracias a su riqueza en selenio, que fortalece el sistema inmunológico al impulsar la generación de células que robustecen las defensas corporales.

Sin embargo, el cultivo de este hongo requiere condiciones climáticas específicas. Para su siembra, la temperatura debe estar entre 22°C y 25°C, mientras que en su etapa de fructificación se necesita un rango de 8°C a 20°C, siendo de 14°C a 18°C el intervalo más recomendado según diversos estudios, ya que de acuerdo con Van Den Munckhof-Vedder (2020), estas condiciones deben mantenerse con estricta precisión, ya que pequeñas variaciones pueden generar retrasos en el crecimiento o una baja calidad del producto final. Por otro lado, se requiere un alto índice de humedad relativa en el ambiente, entre el 75% y el 80%, lo que dificulta su producción en la mayor parte del territorio colombiano debido al clima tropical predominante. Las fluctuaciones en temperatura, humedad y calidad del sustrato pueden afectar directamente su crecimiento, limitando su cultivo a ciertas regiones específicas.

Otro punto crucial es que el cultivo de Agaricus bisporus necesita resguardarse de la luz solar directa, la cual podría deshidratar o perjudicar al hongo. Esto significa ofrecer una sombra parcial para prevenir estos inconvenientes. De acuerdo con Colfungi, en Colombia, la fabricación de este champiñón está monopolizada por aproximadamente 10 compañías, situadas principalmente en el eje cafetero y Cundinamarca.

El objetivo de este proyecto es crear y poner en marcha un prototipo de sistema electrónico automatizado que facilite la generación y conservación de las condiciones ideales para el cultivo del champiñón Agaricus bisporus en la ciudad de Tuluá, superando las restricciones climáticas de la zona.

¿De qué manera podemos desarrollar un prototipo de sistema electrónico automatizado para la monitorización y control del cultivo de champiñón portobello en la ciudad de Tuluá valle del cauca?

5. Objetivos

5.1. Objetivo General

Implementar un prototipo de sistema electrónico automatizado para la monitorización y control del cultivo del champiñón Agaricus bisporus en la ciudad de Tuluá, Valle del Cauca.

5.2. Objetivos Específicos

- Describir las condiciones requeridas para el cultivo del champiñón Agaricus bisporus en términos de variables como temperatura, humedad, concentración de CO2 y calidad del sustrato.
- Diseñar el sistema electrónico para la monitorización y control de las variables temperatura, humedad y CO2.
- Implementar el sistema electrónico bajo los parámetros de diseño establecidos.
- Integrar el prototipo con una plataforma IoT para el control del sistema, procesamiento y análisis de los datos.

6. Marco de Referencia

El marco de referencia se establece los conceptos, teorías y fundamentos científicos que sustentan el diseño e implementación del sistema automatizado para el cultivo de champiñón Portobello. En este caso, se aborda la automatización agrícola, el uso de tecnologías específicas como sensores avanzados, celdas de Peltier y plataformas IoT, y los principios de diseño estructural en sistemas de invernadero.

6.1. Agricultura de precisión

La agricultura de precisión se refiere al uso de tecnologías avanzadas para optimizar procesos agrícolas, reducir costos y mejorar la productividad. Según Naciones Unidas (2022), la automatización en la agricultura puede incluir desde tractores inteligentes hasta sistemas de monitoreo en tiempo real basados en IoT. Estas tecnologías son especialmente relevantes en entornos rurales donde las condiciones climáticas y los recursos limitados presentan desafíos para el cultivo eficiente.

En este proyecto, el sistema automatizado combina sensores y actuadores para mantener condiciones controladas de temperatura, humedad relativa, humedad del suelo y concentración de CO_2, variables críticas para el cultivo del champiñón Portobello.

6.2. Variables Ambientales Críticas en el Cultivo de Champiñón Portobello

El cultivo del champiñón Portobello requiere un control riguroso de variables ambientales, que varían según la etapa del cultivo:

- Temperatura: Durante la fase de incubación, debe mantenerse entre 22°C y 25°C, mientras que en la etapa de fructificación oscila entre 12°C y 18°C para promover la formación de cuerpos fructíferos (Van den Munckhof, 2020).
- Humedad relativa: Entre 90%-95% en la incubación y 85%-90% durante la fructificación, garantizando un desarrollo adecuado sin fomentar enfermedades que puedan acarrear malformaciones o un mal crecimiento.
- Concentración de CO_2: Niveles altos de CO_2 (hasta 5000 ppm) son beneficiosos en la incubación, pero deben reducirse a menos de 1000 ppm en la fructificación para evitar deformidades en los sombreros (Van den Munckhof, 2020).
- Humedad del sustrato: Mantener un nivel de humedad entre 65%-75% es esencial para un crecimiento micelar óptimo y la formación de setas.

6.3. Microcontroladores

Un microcontrolador es un sistema computacional integrado en un solo chip, que incluye un procesador, memoria y periféricos necesarios para llevar a cabo tareas específicas de procesamiento de datos, control de dispositivos electrónicos y automatización. Estos dispositivos tienen una gran ventaja en aplicaciones donde el costo, el tamaño y la eficiencia energética son factores críticos (Jackson & Marsh, 2018).

En el contexto de la agricultura de precisión, los microcontroladores son fundamentales para manejar sensores de monitoreo, controlar sistemas de riego, y procesar los datos recolectados en tiempo real. Esta capacidad permite que los agricultores optimicen el uso de

recursos como agua, fertilizantes, y energía, a la vez que mejoran la calidad de sus cultivos mediante el análisis detallado de condiciones ambientales y de crecimiento (Basso et al., 2017).

6.3.1. Ventajas de los Microcontroladores en Agricultura de Precisión

- Bajo consumo energético: Los microcontroladores están diseñados para ser energéticamente eficientes, lo cual es crucial en aplicaciones de campo donde la fuente de energía puede ser limitada (Patel et al., 2020).
- Costo reducido: Permiten la creación de sistemas económicos para la recolección y análisis de datos, optimizando costos sin comprometer el rendimiento (Basso et al., 2017).
- Flexibilidad: Ofrecen la posibilidad de integrar diversos sensores y actuadores, adaptándose a una amplia gama de aplicaciones.
- Conectividad inalámbrica: Muchos modelos, como el ESP32, cuentan con capacidades de conectividad Wi-Fi y Bluetooth, lo que facilita el monitoreo remoto y la integración en redes de datos (Jackson & Marsh, 2018).
- Procesamiento local de datos: Permiten realizar análisis en tiempo real sin la necesidad de estar continuamente conectados a servidores externos, lo que mejora la eficiencia y la velocidad de respuesta (Basso et al., 2017).

Para obtener una mejor perspectiva, presentamos un cuadro comparativo con las características principales de los microcontroladores más relevantes. (Tabla 3).

Tabla 3.

Características Comparativas de Microcontroladores

CARACTERÍSTICA	RASPBERRY PI	ESP32	ARDUINO (UNO)	STM32
Arquitectura	ARM Cortex-A53	Xtensa 32-bit (Dual-core)	AVR (8-bit)	ARM Cortex-M (32-bit)
Frecuencia de CPU	1.2 GHz	160-240 MHz	16 MHz	72 MHz - 200 MHz
Memoria RAM	1 GB LPDDR2	520 KB SRAM	2 KB	20 KB - 512 KB SRAM
Almacenamiento	MicroSD	4 MB Flash	32 KB Flash	64 KB - 2 MB Flash
Entradas/Salidas (GPIO)	40 pines GPIO	34 pines GPIO	14 pines GPIO	37 pines GPIO (dependiendo del modelo)
Conectividad	Ethernet, Wi-Fi, Bluetooth	Wi-Fi, Bluetooth	Ninguna (requiere módulos externos)	Ethernet, Wi-Fi, Bluetooth (según modelo)
Puertos de Comunicación	HDMI, USB, GPIO, I2C, SPI, UART	I2C, SPI, UART, PWM, ADC, DAC, CAN	I2C, SPI, UART, PWM, ADC	I2C, SPI, UART, PWM, ADC, CAN, USB
Consumo de energía	Alto (hasta 5V 2.5A)	Bajo (hasta 3.3V 160mA)	Muy bajo (hasta 5V 50mA)	Bajo (dependiendo del modelo)
Costo Aproximado	35 - 60 USD	5 - 10 USD	5 - 10 USD	5 - 20 USD
Facilidad de uso	Moderada (requiere configuración de sistema)	Alta (fácil de programar con Arduino IDE)	Alta (fácil de programar con Arduino IDE)	Moderada (requiere conocimiento de STM32Cube)

Nota. Esta tabla muestra las principales características de los microcontroladores más relevantes para el proyecto, destacando aspectos como arquitectura, consumo energético y capacidades de conectividad, lo cual es crucial para la elección del hardware en el sistema de monitoreo y control. **Autor**: elaboración propia.

Los datos consignados en la Tabla 3 fueron cuidadosamente recopilados a partir de las hojas de datos oficiales y documentación técnica proporcionada por los fabricantes de cada microcontrolador, como Arduino (UNO), ESP32 (Espressif), Raspberry Pi Foundation y STMicroelectronics (serie STM32). Para garantizar la exactitud y actualidad de la información, se consultaron manuales de usuario y especificaciones disponibles en los sitios web oficiales, contrastando aspectos clave como arquitectura, frecuencia de CPU, cantidad de memoria RAM, almacenamiento, cantidad de entradas/salidas (GPIO), capacidades de conectividad, consumo energético aproximado, precio en el mercado internacional y facilidad de empleo para desarrollo de prototipos. Además, para fortalecer la contextualización, se revisaron artículos científicos y revisiones técnicas recientes (Jackson & Marsh, 2018; Patel et al., 2020; Zhang et al., 2021) que hacen comparativas prácticas de estos microcontroladores en proyectos de automatización agrícola. Esta triangulación de fuentes permitió seleccionar los parámetros más relevantes, priorizando aquellos que inciden directamente en el desempeño y la adaptabilidad de los dispositivos para el entorno agrícola, asegurando así una base robusta para la toma de decisiones en el diseño del sistema propuesto.

6.4. Transmisión de datos

La transmisión de datos se refiere al proceso mediante el cual la información es enviada de un punto a otro, generalmente entre dispositivos electrónicos. En sistemas de agricultura de precisión, la transmisión de datos permite que los sensores (como los que monitorean temperatura, humedad, o el pH del suelo) envíen sus mediciones a una unidad central de procesamiento o a un servidor en la nube para análisis y toma de decisiones. Esta capacidad de transmitir datos de manera eficiente es esencial para optimizar los procesos agrícolas, garantizando el uso adecuado de recursos como agua y fertilizantes, y mejorando la productividad de los cultivos.

En proyectos como el de agricultura de precisión, la transmisión de datos juega un papel crucial en varios aspectos:

- Monitoreo en tiempo real: Permite la recolección continua de datos de campo y su envío a sistemas de análisis en tiempo real, lo que facilita la toma de decisiones inmediatas para el control de variables críticas.
- Automatización de procesos: Los datos enviados pueden activar sistemas automáticos de riego, control de temperatura o iluminación sin intervención humana.
- Conectividad remota: Especialmente en áreas rurales o en lugares con acceso limitado a infraestructura de telecomunicaciones, las tecnologías de transmisión de datos inalámbricas ofrecen una alternativa eficiente y de bajo costo para mantener la conectividad entre los dispositivos.

- Optimización del uso de recursos: Mediante la transmisión y análisis de datos, se pueden crear modelos predictivos que optimicen el uso de insumos agrícolas y mejoren la sostenibilidad del proyecto.

Tabla 4.

Características Comparativas de Tecnologías de Transmisión de Datos

CARACTERÍSTICA	LORA	ZIGBEE	WI-FI	BLUETOOTH
Rango de transmisión	Hasta 15 km (en campo abierto)	de 100 m a 1.6 km (en campo abierto dependiendo del modelo)	Hasta 100 m (dependiendo de la red y entorno)	Hasta 100 m (dependiendo de la clase de dispositivo)
Frecuencia de operación	433 MHz, 868 MHz, 915 MHz	2.4 GHz, 900 MHz	2.4 GHz	2.4 GHz
Consumo de energía	Muy bajo (ideal para aplicaciones de larga duración sin mucha intervención)	Bajo (ideal para redes de sensores con bajo consumo)	Alto (requiere más energía debido a la transmisión continua)	Bajo (aunque depende de la versión, como BLE)
Velocidad de transmisión	Baja (0.3 kbps a 27 kbps)	Moderada (hasta 250 kbps)	Alta (hasta 150 Mbps en Wi-Fi 5)	Moderada (hasta 3 Mbps en Bluetooth 4.0)
Costo aproximado	Bajo (alrededor de 10-20 USD por módulo)	Bajo a moderado (alrededor de 10-25 USD por módulo)	Bajo a moderado (dependiendo del módulo y entorno)	Bajo (alrededor de 5-15 USD por módulo)
Conectividad remota	Excelente para áreas remotas con poca infraestructura	Buena, especialmente para redes de sensores locales	Requiere infraestructura de red Wi-Fi	Ideal para conexiones cercanas, no siempre adecuado para largo alcance

Protocolos de comunicación	LoRaWAN (WAN)	ZigBee (punto a punto o en malla)	TCP/IP, UDP	Bluetooth Classic, BLE
Facilidad de uso	Moderada (requiere configuración de red LoRaWAN)	Alta (con módulos ZigBee preconfigurados)	Alta (facilidad de integración con redes Wi-Fi existentes)	Alta (fácil integración en dispositivos móviles y

Nota. Esta tabla compara las principales tecnologías de transmisión de datos utilizadas en el proyecto de automatización, incluyendo el rango de transmisión, el consumo de energía y la facilidad de uso. **Autor**: elaboración propia.

De acuerdo con la tabla anterior, podemos destacar los siguientes aspectos:

- LoRa es adecuado para proyectos de agricultura de precisión en zonas rurales o de difícil acceso debido a su largo alcance y bajo consumo de energía.
- ZigBee es ideal para redes de sensores en áreas más pequeñas o medianas, donde la comunicación punto a punto o en malla es importante. Su bajo consumo de energía y la capacidad de crear redes de sensores autosuficientes lo hace muy útil en aplicaciones agrícolas de mediana distancia (Huang et al., 2020).
- Wi-Fi es más apropiado cuando hay infraestructura disponible, y es especialmente útil para aplicaciones que requieren transmitir grandes volúmenes de datos rápidamente.

- Bluetooth, en su versión BLE (Low Energy), es adecuado para aplicaciones de proximidad, como el control local de dispositivos o el monitoreo de condiciones inmediatas con un bajo consumo de energía, pero limitado alcance.

La información presentada en la Tabla 4 acerca de las tecnologías inalámbricas de transmisión de datos (LoRa, Zigbee, Wi-Fi y Bluetooth) se obtuvo a partir de la combinación de fuentes directas y literatura especializada. Inicialmente, se revisaron detenidamente las fichas técnicas, manuales del desarrollador y white papers provistos por los desarrolladores y organizaciones responsables de cada protocolo (LoRa Alliance para LoRa, IEEE para Zigbee, Wi-Fi Alliance y Bluetooth SIG). Estos documentos oficiales permitieron extraer parámetros técnicos como alcance real de transmisión, frecuencia de operación, consumo de energía, velocidad de transferencia de datos, costos asociados y compatibilidad con diferentes estructuras de red. Paralelamente, se consultaron estudios comparativos publicados en revistas de ingeniería electrónica y agricultura de precisión, donde se muestran resultados experimentales del uso de estas tecnologías en contextos rurales y sistemas IoT agrícolas (por ejemplo, implementaciones para monitoreo de invernaderos o fincas). La integración de información empírica y referencial permitió matizar los datos teóricos con observaciones de campo y buenas prácticas, otorgando así una visión realista, fundamentada y aterrizada sobre el rendimiento de cada tecnología en escenarios similares al propuesto en este proyecto.

6.5. Sensores

Los sensores son dispositivos que detectan cambios físicos, químicos o biológicos en su entorno y convierten estos cambios en señales eléctricas o digitales que pueden ser procesadas, analizadas o monitoreadas. En agricultura de precisión, los sensores son cruciales para obtener

datos en tiempo real sobre las condiciones del ambiente y del suelo, lo que permite tomar decisiones informadas para mejorar el rendimiento de los cultivos y optimizar el uso de recursos.

6.5.1. Importancia de los Sensores en Agricultura de Precisión

Los sensores juegan un papel fundamental en la agricultura de precisión, ya que permiten la recopilación de datos continuos y detallados sobre las condiciones ambientales y edáficas (del suelo). Estos datos son esenciales para tomar decisiones informadas que mejoren el rendimiento de los cultivos y optimicen el uso de recursos. A continuación, se detallan algunas de las razones clave de su importancia:

- Mejorar la productividad mediante el monitoreo de variables clave: Los sensores permiten monitorear variables como la humedad del suelo, la temperatura, la luz y el CO_2, lo que facilita la adaptación de los cultivos a las condiciones del entorno. Mediante el monitoreo en tiempo real, los agricultores pueden hacer ajustes rápidos para optimizar la producción (Chhetri et al., 2020).

- Reducir el uso de recursos como agua, fertilizantes y pesticidas, evitando su aplicación excesiva: Los sensores de humedad del suelo, por ejemplo, permiten medir con precisión la cantidad de agua disponible en el suelo, lo que ayuda a reducir el consumo de agua y prevenir el riego excesivo. Además, el monitoreo de variables como el contenido de nutrientes en el suelo puede reducir la aplicación innecesaria de fertilizantes y pesticidas, lo que contribuye a un uso más sostenible de los recursos (Mulla, 2013; Zhang et al., 2021).

- Optimizar el rendimiento de los cultivos, mediante la identificación temprana de problemas como estrés hídrico o deficiencias nutricionales: La recopilación

continua de datos sobre el clima y las condiciones del suelo permite identificar problemas de manera temprana, como el estrés hídrico o las deficiencias de nutrientes, y tomar medidas correctivas antes de que afecten gravemente el rendimiento de los cultivos. Esta intervención temprana puede mejorar significativamente la eficiencia de los cultivos y minimizar las pérdidas (Ge et al., 2022).

- Minimizar el impacto ambiental al permitir el uso más eficiente de los insumos: La aplicación precisa de insumos como agua, fertilizantes y pesticidas no solo mejora la eficiencia de los cultivos, sino que también reduce el impacto ambiental al disminuir la escorrentía de productos químicos al medio ambiente. Esto es fundamental para la sostenibilidad de la agricultura moderna y la protección de los ecosistemas circundantes (Rodríguez et al., 2020).

6.5.2. Sensores para Medir Variables Ambientales

Los sensores que miden las variables ambientales son esenciales para monitorear el entorno donde los cultivos crecen. Estas variables incluyen la temperatura, la humedad relativa y la concentración de CO_2, que son fundamentales para asegurar condiciones óptimas para el crecimiento vegetal.

Tabla 5.

Características de Sensores Ambientales

CARACTERÍSTICA	SCD-40 (CO_2, TEMPERATURA, HUMEDAD)	DHT22 (TEMPERATURA Y HUMEDAD)	MH-Z19 (CO_2)
Medición	Temperatura, Humedad Relativa, CO_2	Temperatura, Humedad Relativa	CO_2
Rango de Temperatura	-40°C a 80°C	-40°C a 80°C	-10°C a 50°C
Rango de Humedad	0% a 100% RH	0% a 100% RH	No disponible
Rango de CO_2	400 ppm a 10,000 ppm	No disponible	0 a 5,000 ppm
Precisión	±0.3°C (Temperatura), ±3% (Humedad), ±50 ppm (CO_2)	±0.5°C, ±2-5% RH	±50 ppm
Consumo de Energía	Bajo	Bajo	Bajo
Comunicación	I2C	Digital (DHT)	PWM o UART
Aplicaciones	Agricultura de precisión, invernaderos, control de clima	Climas, monitoreo de ambientes interiores	Medición de CO_2 en ambientes cerrados

Nota. Esta tabla resume las características de los sensores utilizados en el monitoreo ambiental del cultivo de champiñones, detallando sus capacidades de medición, precisión y aplicaciones en el sistema automatizado. **Autor**: elaboración propia.

Para la elaboración de la Tabla 5, se recopilaron las características técnicas de los sensores ambientales seleccionados —SCD-40, DHT22 y MH-Z19— a partir de la revisión exhaustiva de hojas de datos y manuales de usuario proporcionados por los fabricantes (Sensirion, Aosong Electronics, Winsen, respectivamente). Se extrajeron parámetros relevantes

tales como rangos y tipos de medición (temperatura, humedad relativa, concentración de CO_2), precisión y resolución del sensor, voltajes y consumos energéticos, tipo de comunicación, así como sus principales aplicaciones recomendadas por el fabricante en sectores agrícolas y de monitoreo ambiental. Para validar la aplicabilidad de estos sensores específicamente en el monitoreo del cultivo de champiñón, se complementó la investigación con artículos científicos y reportes técnicos sobre la implementación de sensores similares en invernaderos y ambientes controlados agrícolas, seleccionando aquellos que describen desafíos ambientales, calibraciones y desempeños observados en condiciones reales de operación. Adicionalmente, se realizaron pruebas internas durante el desarrollo del prototipo para confirmar la compatibilidad y adecuación de los dispositivos, y los resultados de estas pruebas también nutren y confirman los valores reportados en la tabla.

6.5.3. Sensores para Medir la Humedad del Suelo

El monitoreo de la humedad del suelo es crucial para un riego eficiente y para asegurar que los cultivos reciban la cantidad adecuada de agua. Los sensores de humedad del suelo permiten medir la cantidad de agua disponible en el suelo, lo que ayuda a evitar el riego excesivo o insuficiente.

Tabla 6.

Características de Sensores de Humedad del Suelo

CARACTERÍSTICA	HD-38 (HUMEDAD DEL SUELO)	FC-28 (HUMEDAD DEL SUELO)	CAPACITIVE SOIL MOISTURE SENSOR (SENSOR CAPACITIVO)
Medición	Humedad del Suelo	Humedad del Suelo	Humedad del Suelo
Rango de Humedad	0% a 100%	0% a 100%	0% a 100%
Precisión	Alta precisión	Moderada	Alta precisión
Tipo de Medición	Resistencia (analogico)	Resistencia (analogico)	Capacitiva
Voltaje de operación	3.3V - 5V	3.3V - 5V	3.3V - 5V
Durabilidad	Alta	Moderada	Alta
Comunicación	Analógica	Analógica	Analógica
Aplicaciones	Riego automático, agricultura de precisión	Riego automático, jardinería	Medición precisa de humedad en diferentes tipos de suelos

Nota. Esta tabla presenta los tipos de sensores de humedad del suelo utilizados para monitorear la humedad en el compost, destacando sus métodos de medición, precisión y aplicaciones en la automatización del riego. **Autor**: elaboración propia.

La información incluida en la Tabla 6 procede principalmente de la consulta a las hojas de datos oficiales y guías técnicas suministradas por los propios fabricantes de los sensores HD-38, FC-28 y el sensor capacitivo de humedad de suelo. Se recopilaron aspectos clave como tipo

de medición realizada (por resistencia o capacitiva), rango de humedad soportado, precisión, voltaje de operación, durabilidad y tipo de salida de datos (analógica), así como las recomendaciones del fabricante para el uso en diferentes tipos de suelos y en sistemas automatizados de riego. La búsqueda se complementó con literatura científica que evalúa el desempeño de estos sensores en escenarios agrícolas reales y describe sus ventajas y limitaciones en la monitorización de cultivos especializados, como el champiñón. Finalmente, los datos fueron validados mediante pruebas experimentales realizadas durante el desarrollo del sistema automatizado del proyecto, las cuales permitieron evaluar directamente la respuesta de los sensores bajo las condiciones ambientales y de sustrato específicas del caso de estudio. De esta manera, la información recogida integra tanto las especificaciones formales como la experiencia práctica, asegurando que los valores reflejen el comportamiento real de los dispositivos dentro del contexto del cultivo de champiñón automatizado.

6.6. Celdas de Peltier

Las celdas de Peltier funcionan mediante el efecto termoeléctrico, transfiriendo calor de un lado a otro al pasar corriente eléctrica. Estas celdas se utilizan para controlar la temperatura del invernadero, en combinación con disipadores de aluminio y ventiladores (coolers) que optimizan la transferencia de calor. Este enfoque es ideal para entornos cerrados y de escala pequeña, como invernaderos a nivel experimental (Delgado, 2020)

6.7. Plataforma en la nube

ThingSpeak es una plataforma basada en la nube para el análisis y la visualización de datos IoT. En este sistema, los datos capturados por los sensores se transmiten a ThingSpeak para su almacenamiento, análisis y generación de gráficos. Esto permite monitorear las

condiciones del cultivo de manera remota y en tiempo real, facilitando la toma de decisiones informadas.

6.8. Diseño Estructural del Invernadero

El invernadero está diseñado para optimizar la regulación térmica y minimizar el consumo energético, utilizando materiales específicos:

- Madera aglomerada RH: Proporciona resistencia estructural y durabilidad.
- Capa de icopor (1 cm): Aislante térmico que reduce la transferencia de calor.
- Capa de jumbolom (1.8 cm): Mejora el aislamiento térmico y la impermeabilidad.
- Cubierta metalizada: Protege contra la humedad externa y mejora la conservación de energía.

Este diseño modular facilita su implementación y adaptación a otras ubicaciones con condiciones similares.

6.9. Automatización del Riego

El sistema de riego utiliza una electrobomba y un sistema de aspersión para invernaderos, diseñado para distribuir agua de manera uniforme. La activación de la bomba se basa en las lecturas del sensor HD-38, asegurando que el riego solo se realice cuando la humedad del suelo esté por debajo de los niveles óptimos. Esto reduce el desperdicio de agua y garantiza condiciones ideales para el cultivo.

La integración de tecnologías avanzadas como microcontroladores ESP32, módulos XBee, sensores SCD-40 y HD-38, junto con un diseño estructural eficiente y sistemas de control automatizado, proporciona un marco robusto para el cultivo de champiñón Portobello. Este enfoque combina agricultura de precisión con IoT, contribuyendo a la sostenibilidad y la optimización de recursos en entornos rurales.

7. Metodología

Según Hernández, Fernández y Baptista (2014), la investigación experimental de enfoque cuantitativo "es un proceso sistemático y empírico que busca establecer relaciones de causa-efecto entre variables, manipulando una o más de ellas en condiciones controladas y midiendo, de forma objetiva y numérica, los efectos producidos sobre otras variables" (p.4). Este enfoque se caracteriza por la rigurosidad metodológica, el control de variables y el uso de técnicas estadísticas para analizar los datos recolectados.

Este concepto se ajusta plenamente al desarrollo de este proyecto, ya que en la tesis se implementó un prototipo tecnológico cuyas variables ambientales (como temperatura, humedad y concentración de CO_2) fueron manipuladas y monitoreadas a través de instrumentos precisos, bajo condiciones controladas y replicables. Asimismo, los resultados obtenidos fueron medidas numéricas, permitiendo comprobar cómo la intervención tecnológica impactó de manera cuantificable en el ambiente controlado del cultivo de champiñón. De este modo, el estudio sigue exactamente el enfoque experimental cuantitativo descrito por los autores, validando tanto el proceso como la aplicabilidad de los resultados obtenidos.

El proceso se estructuró en cuatro etapas principales:

- **Diagnóstico inicial**: Analizar las condiciones actuales del cultivo de champiñones Portobello (Agaricus bisporus) en Tuluá, Valle del Cauca, identificando variables ambientales críticas y requerimientos técnicos para la producción exitosa en la región.
- **Diseño conceptual del sistema**: Plantear el diseño de un sistema automatizado capaz de monitorear y controlar variables ambientales esenciales como

temperatura, humedad relativa, humedad del sustrato y concentración de CO_2. Se seleccionaron tecnologías apropiadas para áreas rurales con conectividad limitada, priorizando soluciones de bajo costo y fácil implementación.

- **Implementación y ensamblaje**: Construir e implementar el prototipo del sistema automatizado, integrando sensores, actuadores y microcontroladores en una estructura física diseñada para mantener condiciones ambientales controladas. El software fue desarrollado para la adquisición de datos, control de dispositivos y envío de información a una plataforma IoT.

- **Verificación y análisis**: Realizar pruebas de funcionamiento bajo condiciones simuladas y reales, evaluando la capacidad del sistema para mantener las condiciones óptimas de cultivo y recolectando datos para el análisis de desempeño. Los resultados permitieron validar el cumplimiento de los objetivos técnicos y proponer mejoras.

8. Desarrollo del Proyecto

8.1. Etapa 1: Diagnóstico inicial

8.1.1. Objetivo de la etapa

Analizar las condiciones actuales del cultivo de champiñones Portobello (Agaricus Bisporus), identificando las variables ambientales críticas y los requerimientos técnicos necesarios para producirlo exitosamente en la ciudad de Tuluá, Valle del Cauca.

El cultivo de champiñones Portobello requiere condiciones ambientales específicas que garantizan su óptimo desarrollo en cada etapa del ciclo de vida del hongo. Según Van den Munckhof (2020), estas condiciones incluyen:

En el cultivo de champiñones, especialmente para el Portobello, las condiciones óptimas de temperatura, humedad relativa, humedad del sustrato, y concentración de CO_2 varían significativamente entre la etapa de incubación (fase vegetativa) y la etapa de fructificación (fase reproductiva). Esto se menciona de forma explícita en el libro Modern Mushroom Growing 2020 de M. Van den Munckhof, donde se hace hincapié en la necesidad de ajustar las variables ambientales según la etapa de desarrollo del cultivo.

8.1.2. Etapa de incubación (fase vegetativa)

En esta etapa, el objetivo principal es permitir el crecimiento y la expansión del micelio dentro del sustrato. Las condiciones son las siguientes:

Temperatura del ambiente:

Es crucial mantener una temperatura constante para maximizar el crecimiento del micelio y evitar la aparición de contaminantes.

- Rango óptimo: 22°C a 25°C.

Humedad relativa:

Altos niveles de humedad son necesarios para evitar la desecación del micelio, ya que este aún no ha formado cuerpos fructíferos.

- Rango óptimo: 90% a 95%.

Humedad del sustrato:

Mantener el sustrato uniformemente húmedo, pero sin exceso de agua libre.

- Niveles óptimos de 60%-70% de humedad del sustrato, según su capacidad de retención de agua.

Concentración de CO_2:

En esta fase, niveles altos de CO_2 favorecen el crecimiento rápido del micelio, siempre que no haya deficiencia de oxígeno.

- Tolerancia elevada, hasta 5000 ppm o más.

Cantidad de Luz:

Oscuridad total o muy baja intensidad lumínica, la luz no es necesaria durante esta fase.

8.1.3. Etapa de fructificación (fase reproductiva)

En esta etapa, el objetivo es inducir y optimizar la formación de los cuerpos fructíferos (setas). Las condiciones ideales cambian notablemente:

Temperatura del ambiente:

Temperaturas más bajas estimulan la formación de cuerpos fructíferos y la calidad del sombrero. Oscila entre 12°C y 18°C, aunque en teoría el cultivo resiste temperaturas mayores, para el correcto desarrollo y que este se encuentre en condiciones de calidad óptimas para uso comercial es importante no permitir oscilaciones mayores a estas.

- Rango óptimo: 12°C a 18°C.

Humedad relativa:

Una ligera disminución de la humedad evita la formación de gotas de agua en el sombrero, que podrían generar enfermedades.

- Rango óptimo: 75% a 90%.

Humedad del sustrato:

Mantener entre 65%-75%, evitando la desecación para soportar el desarrollo de los cuerpos fructíferos.

Concentración de CO_2:

La reducción del CO_2 es crucial para evitar cuerpos fructíferos deformes y favorecer un sombrero bien desarrollado.

- Valores menores a 1200 ppm.

Cantidad de Luz:

La luz indirecta es esencial para el desarrollo uniforme del sombrero y para marcar el inicio de la fructificación.

- Intensidad moderada, aproximadamente 500-1000 lux.

Calidad del sustrato:

Utilizar un sustrato basado en compostaje optimizado con un balance adecuado de nitrógeno y carbono.

8.2. Etapa 2: Diseño del sistema

8.2.1. Objetivo de la etapa

Crear un diseño técnico y funcional que permita el monitoreo y control automático de las variables críticas del cultivo de champiñón Portobello, considerando las limitaciones del entorno y utilizando tecnologías adecuadas para áreas rurales con conectividad limitada.

8.2.2. Especificaciones del sistema

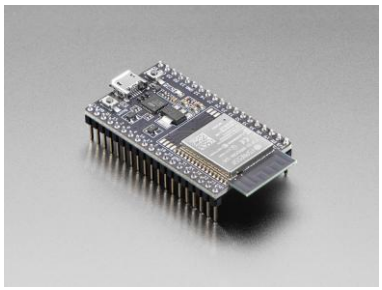
Hardware:

- Microcontroladores y Conexión Inalámbrica:

De acuerdo con la Tabla 3, que compara las características técnicas de los microcontroladores, se optó por utilizar dos módulos ESP32 junto con módulos XBee para la transmisión de datos debido a su alto rendimiento, bajo consumo energético y conectividad integrada (Wi-Fi y Bluetooth). Además, la incorporación de los módulos XBee permite una comunicación inalámbrica estable y de largo alcance mediante tecnología Zigbee, fundamental para garantizar una transmisión eficiente y confiable de los datos en el sistema de monitoreo automatizado del cultivo de champiñón.

Figura 1.

Imagen del Microcontrolador ESP32 Utilizado para el Sistema de Monitoreo



Nota. Fuente: Adaptado de "Espressif ESP32 Development Board - Developer Edition" (n.d.), Adafruit. Recuperado de https://www.adafruit.com/product/3269.

Figura 2.

Imagen del Módulo Xbee Utilizado para el Sistema de Monitoreo

Nota. Fuente: Instructables. (n.d.). *How to Use XBee Modules As Transmitter & Receiver - Arduino Tutorial*. Retrieved April 17, 2025, from https://www.instructables.com/How-to-Use-XBee-Modules-As-Transmitter-Receiver-Ar/

El ESP32 fue seleccionado por su balance entre capacidad de procesamiento y conectividad. Comparado con alternativas como el Arduino Uno y el Raspberry Pi, el ESP32 ofrece conectividad Wi-Fi y Bluetooth integrada, con un consumo energético bajo (160 mA). Además, su capacidad para manejar múltiples periféricos y sensores lo hace ideal para aplicaciones de agricultura de precisión que requieren monitoreo y automatización en tiempo

real. Su costo (5-10 USD) es significativamente menor al de Raspberry Pi, haciéndolo más adecuado para sistemas económicos.

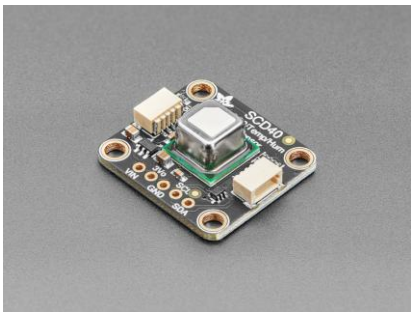
Los módulos XBee fueron elegidos para establecer una comunicación inalámbrica confiable en áreas con baja conectividad a internet. Comparados con tecnologías como LoRaWAN, los módulos XBee proporcionan una configuración más sencilla para redes de corto a mediano alcance, además de ser eficientes en el consumo de energía.

- Sensores:

SCD-40: Para medir temperatura, humedad relativa y CO_2.

Figura 3.

Imagen del Sensor SCD-40 Utilizado para el Sistema de Monitoreo



Nota. Fuente: Adafruit. (n.d.). *Adafruit SCD-40 - True CO_2, Temperature and Humidity Sensor*. Retrieved April 17, 2025, from https://www.adafruit.com/product/5187

HD-38: Sensor capacitivo para monitorear la humedad del suelo.

Figura 4.

Imagen del Sensor HD-38 Utilizado para el Sistema de Monitoreo

Nota. Fuente: ElectroPeak. (n.d.). *HD-38 Soil Humidity Sensor Module*. Retrieved April 17, 2025, from https://electropeak.com/hd-38-soil-humidity-sensor-module

Sensor SCD-sensor se utiliza para medir temperatura, humedad relativa y concentración de CO_2 con alta precisión. En comparación con sensores más genéricos como el DHT22, el SCD-40 tiene un rango de medición más amplio y precisión superior en la detección de CO_2, lo que es crucial para evitar deformidades en los cuerpos fructíferos

El Sensor HD-38 se utiliza para medir la humedad del sustrato debido a su precisión, capacidad y durabilidad superior en comparación con sensores resistivos. Esta elección asegura lecturas más confiables en un rango de humedad crítico (65%-75%) para el desarrollo del micelio.

- Actuadores:

Control de temperatura por medio de celdas de Peltier instaladas con disipadores de aluminio y pequeños ventiladores (coolers) para mejorar la eficiencia térmica.

Figura 5.

Imagen de la Celda de Peltier Utilizada para el Sistema de Monitoreo

Nota. Fuente: HnHCart. (n.d.). *TEC1-12706 Peltier Module*. Retrieved April 17, 2025, from https://www.hnhcart.com/products/tec1-12706-peltier-module

Las celdas de Peltier se utilizan en invernaderos pequeños debido a su capacidad de enfriamiento y calentamiento mediante el efecto termoeléctrico. Comparadas con sistemas HVAC tradicionales, las celdas Peltier son más compactas, económicas y eficientes para espacios reducidos. Este componente fue preferido porque puede mantener temperaturas entre 12°C y 18°C, rango crítico para la fructificación de los champiñones.

- Riego automatizado con una electrobomba que alimenta un sistema de aspersión, diseñado específicamente para invernaderos.

La elección de una electrobomba y boquillas de aspersión radica en su capacidad para distribuir agua de manera uniforme en forma de lluvia suave. Comparadas con sistemas de riego por goteo, las boquillas son más adecuadas para mantener una humedad relativa alta sin encharcar el sustrato, evitando enfermedades fúngicas y promoviendo el desarrollo saludable de los cuerpos fructíferos.

Estructura:

Materiales utilizados:

- Madera aglomerada RH como base estructural.
- Capa interna de icopor de 1 cm para aislamiento térmico.
- Capa de jumbolom de 1.8 cm de espesor con propiedades aislantes avanzadas.
- Cubierta metalizada impermeable: Protección adicional contra humedad y desgaste externo.
- Diseño modular para facilitar el ensamblaje y ajustes posteriores.

Software:

Programación en Arduino IDE para capturar datos de los sensores y controlar celdas de Peltier, la electrobomba y el sistema de riego, además de poseer una configuración de ThingSpeak para análisis remoto y generación de gráficos en tiempo real.

Para el procesamiento y control se poseen los siguientes nodos:

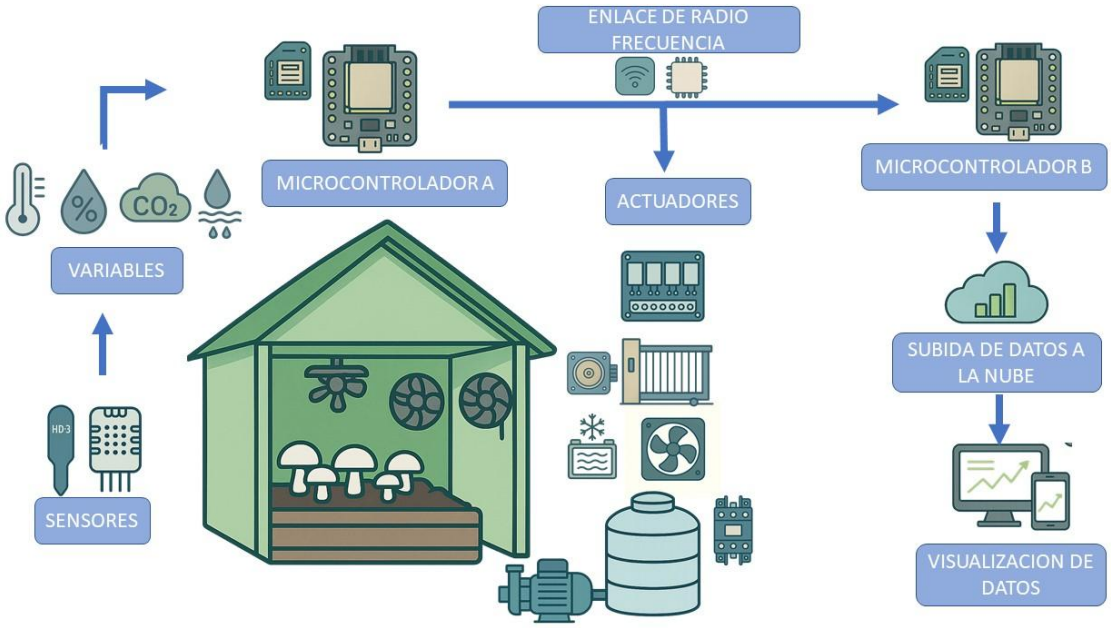
- Nodo 1 (ESP32-A): Captura datos de temperatura, humedad relativa, CO_2 y humedad del suelo y controla las celdas de Peltier y el sistema de riego en función de los parámetros establecidos.
- Nodo 2 (ESP32-B): Recibe los datos del Nodo 1 y los transmite a ThingSpeak para análisis y monitoreo remoto.

Concepto de estructura

El esquema presentado en la Figura 6 representa el concepto de diseño general del prototipo propuesto, integrando en un solo diagrama los componentes físicos y lógicos que conforman el sistema. En él se observa la disposición del invernadero como entorno de cultivo, las variables críticas de monitoreo —temperatura, humedad relativa y humedad del sustrato— y la arquitectura tecnológica utilizada para su control, que combina sensores especializados, módulos de comunicación y una unidad central de procesamiento basada en microcontroladores ESP32. Asimismo, el diagrama incluye el flujo de datos desde la adquisición hasta la visualización en plataforma IoT, evidenciando la interacción entre hardware y software.

Figura 6.

Esquema general del diseño del prototipo automatizado para el cultivo de champiñón portobello



Nota. La figura ilustra el diseño conceptual general del prototipo desarrollado, en el que se integran de manera gráfica el invernadero, las variables ambientales a controlar (temperatura, humedad relativa y humedad del sustrato), así como los elementos de hardware y software que intervienen en la adquisición, procesamiento y visualización de datos. **Autor:** elaboración propia.

8.3. Etapa 3: Implementación del sistema

8.3.1. Objetivo de la etapa

Ensamblar el prototipo y ponerlo en funcionamiento en condiciones reales.

8.3.2. diseño y ensamblaje de la estructura

Para el diseño del prototipo del sistema automatizado destinado al cultivo de champiñón portobello, se optó por la construcción de una estructura física que sirviera como soporte para los diferentes componentes electrónicos y mecánicos del sistema, de esta forma se obtiene una estructura idónea para mantener las condiciones ambientales necesarias.

Se seleccionó madera tipo RH (aglomerado resistente al agua) como material principal para la estructura, debido a sus características físicas y mecánicas favorables, tales como:

- **Costo accesible**: lo que permite mantener el presupuesto del proyecto dentro de los márgenes razonables.
- **Facilidad de corte y perforación**: lo cual facilita su adaptación a las dimensiones requeridas por el prototipo.

- **Buena resistencia:** suficiente para soportar tanto el peso de los componentes como las condiciones del entorno de cultivo.
- **Facilidad de ensamblaje**: permite realizar ajustes o modificaciones sin necesidad de herramientas especializadas.

La estructura fue diseñada en forma de caja cerrada tipo invernadero, con dimensiones aproximadas de 150 cm de alto X 120 cm de ancho X 70 cm de profundidad, permitiendo mantener un ambiente controlado para el desarrollo del cultivo. Se incorporaron:

- **Puertas abatibles**, para facilitar el acceso al interior durante las labores de mantenimiento o monitoreo, adecuación y recolección.
- **Exclusa tipo puerta corrediza para**, para permitir la circulación del aire cuando sea necesario, sin comprometer el control de temperatura y humedad, liberando así la sobrecompensación de aire.
- **Aislantes térmicos tipo Yumbolon** instaladas en la parte interior de la madera para mantener la temperatura necesaria por más tiempo evitando el intercambio térmico entre el interior y el exterior, también ayuda a evitar el deterioro por exposición constante a la humedad.

Se añadieron accesorios como rodachines a fin de facilitar la movilidad, pasadores tipo aldaba para garantizar que la puerta quede sellada entre otros elementos que no cumples in papel técnico en el prototipo, pero ayudan a hacer las labores de recolección adecuación y mantenimiento de manera más sencilla.

Programación y calibración

Se utilizó un microcontrolador Esp32 como unidad central de procesamiento. Este dispositivo fue programado mediante el entorno de desarrollo Arduino IDE. El código implementado permite:

- **Realizar lecturas periódicas** de los sensores ambientales, como temperatura, humedad relativa, humedad del sustrato y CO2.
- **Activar actuadores** tales como ventiladores, sistemas de riego, en función de los valores obtenidos de los sensores e intervalos definidos previamente.
- **Transmitir y almacenar datos**: utilizando tecnología Zigbee logramos tener una comunicación inalámbrica, teniendo un centro de control remoto, en donde se podrán procesar, analizar y visualizar datos.

En el fragmento de código presentado se construye y envía manualmente una trama de comunicación en modo API para módulos XBee, con el fin de transmitir de forma inalámbrica los datos obtenidos de los sensores de temperatura, humedad relativa, concentración de CO_2 y humedad del compost. El modo API permite estructurar la información en un formato binario específico, garantizando mayor robustez, control y capacidad de direccionamiento en la comunicación que el modo AT.

- La trama se compone de diferentes campos que cumplen funciones específicas:
- Delimitador de inicio (0x7E): indica el comienzo de la trama.
- Longitud (MSB, LSB): define el número de bytes que componen el bloque de datos del frame (sin incluir el delimitador y el checksum).

- Tipo de trama (0x10): corresponde a una “Petición de Transmisión” (Transmit Request), utilizada para enviar datos a otro módulo XBee.
- Identificador de trama (Frame ID): permite que el transmisor reciba una confirmación de entrega.
- Dirección de destino de 64 bits: especifica la dirección MAC del módulo XBee receptor.
- Dirección de destino de 16 bits: identifica el destino dentro de la red ZigBee.
- Parámetros de transmisión: incluyen el radio de broadcast y opciones adicionales de envío.
- Datos de usuario (Payload): sección en la que se insertan las variables medidas por los sensores, en este caso temperatura, humedad relativa, concentración de CO_2 y porcentaje de humedad del compost.
- Checksum: valor calculado como 0xFF - (suma de todos los bytes del bloque de datos & 0xFF), utilizado por el receptor para verificar la integridad de la trama.

En la implementación, cada byte se envía secuencialmente utilizando Serialport.write(). Los valores de los sensores se insertan directamente en la sección de datos del frame, asegurando una transmisión eficiente en formato binario. El cálculo del checksum se realiza sumando todos los bytes que conforman el bloque de datos y aplicando la fórmula indicada, garantizando que el receptor pueda validar la trama y descartar posibles datos corruptos.

Figura 7.

fragmento de código que envía manualmente una trama de comunicación en modo API para módulos XBee

```
Serialport.write(0X7E);
Serialport.write(0X00);
Serialport.write(0X12);

Serialport.write(0X10);
Serialport.write(0X01);
Serialport.write(0X00);
Serialport.write(0X13);
Serialport.write(0XA2);
Serialport.write(0X00);
Serialport.write(0X41);
Serialport.write(0X57);

Serialport.write(0X2C);
Serialport.write(0X71);
Serialport.write(0XFF);
Serialport.write(0XFE);
Serialport.write(0X00);
Serialport.write(0X00);

Serialport.write(t);
Serialport.write(h);
Serialport.write(co);
Serialport.write(lecporcentaje_hd38);
```

```
long suma = (0X10)+(0X01)+(0X13)+(0XA2)+(0X41)+(0X57)+(0X2C)+(0X71)+(0XFF)+(0XFE)+t+h+co+lecporcentaje_hd38;
Serialport.write(0XFF-(suma & 0XFF));
Serial.println ("se envio trama");
delay(2000);
```

Nota. La figura ilustra un fragmento del código que se encarga de transmitir de forma inalámbrica los datos obtenidos de los sensores de temperatura, humedad relativa, concentración de CO_2 y humedad del compost. **Autor:** elaboración propia.

Este método de comunicación permite que el sistema transmita información de manera fiable, tolerante a errores y con capacidad de direccionamiento directo entre nodos, lo cual es esencial para la correcta operación del sistema automatizado de monitoreo y control del cultivo.

La calibración de los sensores fue un proceso clave para garantizar lecturas confiables y precisas dentro del sistema automatizado, permitiendo así una correcta toma de decisiones en tiempo real. Los sensores utilizados en el prototipo fueron:

- Sensor SCD40: especializado en la medición de CO_2, temperatura y humedad relativa.

Para su calibración la temperatura y la humedad reportadas por el SCD40 también se contrastaron con termómetro digital de precisión para validar su correcto funcionamiento.

- Sensor HD_38: encargado de medir la humedad del compost. Este sensor fue calibrado empíricamente.

Se realizaron pruebas con un compost similar al utilizado en la producción de los champiñones, seco, ligeramente húmedo y saturado, registrando los valores analógicos o digitales correspondientes a cada condición.

Con base en estos datos, se establecieron umbrales que permiten activar la **electrobomba** de riego cuando la humedad desciende por debajo del nivel óptimo, asegurando el ambiente ideal para el crecimiento del champiñón portobello.

El proceso de calibración incluyó múltiples mediciones en diferentes momentos del día para observar posibles desviaciones por temperatura ambiente o interferencias externas, ajustando el software para filtrar lecturas anómalas y estabilizar los datos.

Además de los sensores, se verificó el **comportamiento de los actuadores** en función de las lecturas calibradas:

- **Relés para celdas Peltier y sistema de refrigeración interno**: se activan cuando la temperatura interna supera los valores máximos establecidos, permitiendo el control térmico interno.
- **Servomotor del sistema de refrigeración externo**: calibrado para activarse cuando las celdas Peltier no logran compensar el calor.
- **Motor a pasos para esclusa de ventilación**: configurado para abrir totalmente la compuerta corrediza cuando el sistema de refrigeración externo este encendido, garantizando el intercambio de oxígeno y liberando la sobrecompensación de aire en el interior del sistema

Pruebas iniciales

Una vez completadas la programación, calibración e integración de todos los componentes del prototipo, se procedió a realizar pruebas iniciales con el fin de validar el comportamiento funcional del sistema automatizado bajo condiciones simuladas, exponiendo al sistema a niveles específicos de humedad, temperatura y humedad relativa. Estas pruebas permitieron identificar errores, afinar la lógica de control y ajustar parámetros operativos para alcanzar un desempeño óptimo.

Validación de la interacción entre sensores y actuadores

Se ejecutaron pruebas controladas para comprobar que cada sensor respondiera adecuadamente a cambios en el entorno, y que las señales generadas por el microcontrolador activaran correctamente los actuadores correspondientes:

- **Sensor SCD40**: se evaluó su respuesta frente a variaciones en la concentración de dióxido de carbono, humedad relativa y temperatura. Se simuló un aumento de la temperatura dentro del sistema, lo que permitió verificar que el sistema activara automáticamente los diferentes actuadores del sistema de refrigeración, así como el **motor a pasos**, abriendo la **esclusa corrediza** para ventilar y estabilizar los niveles de CO_2.

- **Sensor HD_38**: se introdujeron distintas cantidades de agua en el sustrato para observar la activación de la **electrobomba** de riego cuando los niveles de humedad caían por debajo del umbral mínimo. Se verificó que la bomba se apagara automáticamente una vez alcanzado el nivel deseado.

Ajustes posteriores a las pruebas

Durante estas pruebas, se observaron ciertos comportamientos que requirieron ajustes de software y parámetros, entre ellos:

- Modificación de los umbrales de activación para evitar ciclos de encendido y apagado frecuentes en la bomba y los sistemas de enfriamiento.

- Inclusión de retardos y condiciones de histéresis en el código para estabilizar el comportamiento del sistema frente a pequeñas fluctuaciones ambientales.

- Optimización de los tiempos de apertura y cierre de la esclusa de ventilación para mejorar la eficiencia en la regulación del CO_2 sin perder control de temperatura o humedad.

Teniendo los parámetros establecidos, se inicia con el montaje de la estructura, la cual debe cumplir requerimientos físicos y mecánicos específicos, se debe crear una estructura lo más hermética posible, con la intención de evitar el intercambio técnico entre el interior y el exterior, así como impedir la contaminación del aire, que el compost que albergara en su interior es idóneo para la proliferación de hongos, los cuales se reproducen por medio de esporas que están en al aire en todo momento y se necesita que la semilla inoculada con la espora del Agaricus bisporus no tenga competidores ya que esto puede afectar de manera significativa la producción. Al mismo tiempo la estructura debe contar con un mecanismo que permita el intercambio de aire entre el interior y el exterior, debido a que el compost es un material vivo que genera reacciones químicas y tiene una liberación considerable de CO2, si el CO2 llega a concentraciones altas puede afectar el desarrollo del cultivo.

Se decide realizar una estructura tipo cubica con puertas abatibles, tipo cajón, con el fin de que sea fácil ingresar y retirar las bandejas o camas de producción, además de facilitar el acceso para realizar adecuaciones en caso de necesitarlas. El material escogido para la estructura es madera tipo RH (aglomerado resistente al agua) como material principal para la estructura ya que es resistente relativamente fácil de cortar permitiendo modificaciones de ser necesarias, fácil de ensamblar y tiene un costo razonable. Se añaden demás elementos necesarios como bisagras, manijas, rodachines etc. (Figura 8).

Figura 8.

Estructura Hermética de Tipo Cubico Utilizada en el Proyecto

Nota. Esta imagen muestra dos perspectivas de la estructura hermética utilizada en la producción del champiñón Portobello, una con las puertas cerradas y la otra con ellas abiertas. **Autor:** elaboración propia.

Una vez creado el caparazón de la estructura, se hacen 3 bandejas o camas de cultivo, en láminas de zinc galvanizadas calibre 18, las cuales son resistentes y fáciles de moldear, además de ser resistentes al agua y la corrosión. Se usan ángulos reforzados fijos a las paredes de la estructura para sostener el peso de las bandejas, las dimensiones de las bandejas son 50 cm de ancho por 110 cm de largo. (Figura 9).

Figura 9.

Bandejas de Cultivo en Laminas de Zinc Galvanizadas

Nota. **Autor:** elaboración propia.

Para cumplir con ese requisito de hermeticidad y evitar el intercambio térmico entre el interior y el exterior, se recubre el interior de la estructura con 2 materiales aislantes diferentes, el primero son placas de icopor de 1,5 cm de grosor y el segundo es un aislante térmico tipo Yumbolon que es ampliamente usado en el aislamiento térmico de casas en especial techos de esta manera logramos una capa aislante de 3cm de grosor en cada pared de la estructura, al momento de cerrarse se cierra a presión ya que las espumas se comprimen y no permite el flujo de aire, cumpliendo así en teoría con los 2 requerimientos.

Una vez se consigue esto ya tenemos la estructura base sobre la cual montaremos todos los componentes necesarios para la automatización.

Se sigue con el sistema de refrigeración, ya que es la parte más importante de este sistema, sin conseguir la temperatura necesaria para los champiñones ellos no crecerán, se inicia con el montaje de un sistema de refrigeración basado en celdas Peltier.

Las celdas Peltier, también conocidas como módulos termoeléctricos, son dispositivos de estado sólido que operan bajo el efecto Peltier, un fenómeno termoeléctrico en el que se genera una diferencia de temperatura cuando una corriente eléctrica continua atraviesa la unión de dos materiales conductores distintos (normalmente semiconductores tipo N y tipo P). Al polarizar el módulo, un lado absorbe calor (efecto refrigerante) y el otro lo disipa (efecto calefactor), permitiendo su uso en sistemas de refrigeración electrónica, control térmico de sensores, y disipación localizada de calor. Su principal ventaja es que no contienen partes móviles, lo que los hace silenciosos, compactos y de alta confiabilidad en aplicaciones de precisión térmica. Rowe, D. M. (2006). Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano. CRC Press.ISBN: 9780849322648

Este sistema de refrigeración consta de 4 celdas de peltier TEC 1-12706 las cuales fueron ensambladas de 2 en 2, cada uno de los lados con disipadores de aluminio, lo importante es lograr disipar el calor que genera la cara externa, para que la interna logre bajar su temperatura a los niveles requeridos para generar un clima adecuado en el interior de la estructura. Se cuenta también con 4 coolers (extractores), 2 a 110 volts AC para las caras exteriores ya que son las más críticas y 2 de 12 volt DC para las caras interiores, de esta forma el frio que recojan los disipadores de aluminio enfriará el aire que será expulsado por los extractores, logrado bajar la temperatura al interior de la estructura. (Figura 10).

Figura 10.

Sistema de Refrigeración Utilizando Celdas de Peltier

Nota. Esta imagen muestra el sistema de refrigeración mediante el uso de 4 celdas de Peltier y 4 Coolers utilizado en el proyecto. **Autor:** elaboración propia.

8.4. Etapa 4: Verificación y análisis

8.4.1. Objetivo de la etapa

Evaluar el desempeño del prototipo frente a los objetivos definidos. Que esté cumpliendo con los requerimientos técnicos previamente definidos

8.4.2. Verificacion y análisis del prototipo

Se ponen las celdas de Peltier y los Coolers a mediana altura en la parte trasera de la estructura, y se procede a realizar las pruebas iniciales, se logra bajar su temperatura alrededor de

los 11 °C en la cara que va al interior, el control de la temperatura se hace con un sensor SCD-40 conectado a un Esp32 que está programado para activar las celdas de peltier cuando la temperatura super los 26 °C y para apagarla cuando la temperatura este por debajo de los 23 °C, de esta manera mantener la temperatura del interior oscilando en ese rango, las primeras pruebas no tuvieron un resultado positivo, al no alcanzar la temperatura más baja planeada, lo que se debió principalmente a 2 factores, uno era la fuente de 12 volts a 10 Amps que estábamos usando para alimentar las celdas, las cuales consumen 6 Amps cada una, además de tener los extractores de 12 volts conectados a esta misma fuente. La otra era que la forma es que estamos disipando el calor de la cara caliente era insuficiente para lograr conseguir la temperatura más baja en la cara fría.

Lo primero fue cambiar la fuente de 10 amp a una de 20 amp para que cada celda tenga la corriente necesaria, de esta manera las celdas podrán sacar el máximo provecho, lo siguiente fue usar disipadores más grades en la cara exterior a fin de que se disipe mejor el calor, luego de algunas pruebas en cambio a pesar de ser notorio no era suficiente por lo que nos vimos en la necesidad de implementar disipadores líquidos, los cuales estas hechos de aluminio pero con huecos en el centro, contestándolos a una manguera y una pequeña electrobomba de pecera, que bombee agua constantemente para disipar ele calor de forma efectiva logramos alcanzar una temperatura aceptable, llegando a las 23°c en el interior de la estructura cuando en el exterior estábamos en 36°c, una vez implementado el riego esta temperatura podría bajar incluso 2 grados más ya que es sistema de aspersores genera una lluvia suave que se dispersa en el interior de la estructura, aumentado la humedad y favoreciendo las bajas temperaturas en el interior.

Continuamos con la calibración del sensor de humedad hd-38 el cual es un sensor de humedad de suelo que mide el contenido volumétrico de agua en el en el compost. Funciona

generalmente midiendo cambios en propiedades eléctricas del suelo, como la capacitancia o resistencia, para estimar la humedad. Se utiliza ampliamente en agricultura de precisión, automatización de riego y monitoreo ambiental para optimizar el uso del agua y mejorar el rendimiento de los cultivos. Una vez ajustada la sensibilidad del mismo pasamos a desarrollar el algoritmo de control, de acuerdo con los datos obtenidos por el sensor, la Esp32 enviará la señal para activar o desactivar el riego, que se hare por medio de una electrobomba de 0,5 hp controlada por un contactor que será activado por un relé.

Ya que se hicieron las respectivas pruebas de funcionamiento del sistema de refrigeración y del sistema de riego procedemos a integrarlos en un solo código y someterlos a prueba controladas evaluando su funcionamiento y realizando adecuaciones de ser necesario.

Es importante la visualización de los datos en tiempo real, para esto usaremos tecnología Zigbee para enviar datos inalámbricamente hasta un punto en donde podamos subir todo esto a la nube, creamos una trama de datos en la cual se encriptaran los valores obtenidos de las distintas variables de interés, esta trama se envía desde el puerto Serial port 2 del Esp32 y la recibe el Xbee coordinador, en cual la tenia de forma inalámbrica hasta el nodo receptor que se encuentra conectado a un segundo Esp32 que leerla trama y se encargara de enviar los datos a thingespeak que es una plataforma en línea de Internet de las Cosas (IoT) que permite recopilar, visualizar y analizar datos enviados por sensores o dispositivos conectados a Internet. Es ampliamente utilizada para proyectos de monitoreo remoto, ya que permite almacenar datos en la nube y generar gráficos en tiempo real. También ofrece integración con MATLAB para análisis avanzados y procesamiento de datos.

Una vez logramos la visualización de datos en tiempo real con un intervalo de tiempo de aproximadamente 40 segundos entre cada señal, estamos cerca de traer la producción, para esto

recibimos asesoría de Jorge Enrique Suárez Quiceno es el fundador y gerente general de Funglus S.A., una empresa colombiana especializada en la producción de champiñones y compost de alta calidad. Con más de 30 años de experiencia en el sector champiñonero, Suárez ha sido pionero en la innovación de procesos productivos sostenibles y eficientes.

Desde 1986, Suárez ha liderado la transformación de Funglus, implementando tecnologías avanzadas como túneles de pasteurización y estructuras tipo iglú para el cultivo de champiñones, lo que ha permitido optimizar el uso de espacio y energía. Además, ha desarrollado un compost elaborado sin estiércol, utilizando pasto de corte fresco, lo que reduce significativamente los olores ofensivos y el impacto ambiental.

Una vez habiéndole presentado nuestro desarrollo, se nos indican algunas correcciones necesarias para garantizar un correcto avance del proyecto y un cultivo más eficiente. Se identifican oportunidades de mejora que nos orientan de manera más precisa hacia el objetivo que queremos alcanzar. El principal ajuste recomendado es la implementación de un sistema de refrigeración externo que permita el intercambio controlado de aire entre el interior y el exterior de la estructura, logrando así mantener temperaturas más bajas y controlar los niveles de dióxido de carbono (CO_2). Esto es crucial, ya que, al momento de ingresar el compost, se libera una cantidad significativa de calor debido a la intensa actividad microbiana que ocurre durante su descomposición. En este proceso, los microorganismos, como bacterias y hongos, descomponen la materia orgánica presente en el compost (como paja, estiércol y restos vegetales), generando calor como subproducto metabólico y liberando grandes volúmenes de CO_2. Esto puede resultar en una concentración excesiva de este gas, lo que, si no se controla adecuadamente, podría inhibir el crecimiento del micelio, comprometer la formación de primordios y afectar negativamente la calidad de los cuerpos fructíferos del Agaricus bisporus.

Además, el calor resultante de las actividades microbianas mencionadas puede impedir que el sistema de refrigeración previamente desarrollado con celdas de Peltier logre alcanzar y mantener las temperaturas óptimas para el desarrollo del cultivo. Por esta razón, se ha añadido un aire acondicionado marca Recco de 110 volt y una potencia de 1300 W que, trabajando de manera simultánea con el sistema de celdas de Peltier, será el encargado de generar las condiciones internas óptimas para el correcto desarrollo del cultivo. Dado que este aire acondicionado se enciende y apaga manualmente, se ha incorporado un servomotor para accionar el botón de encendido y apagado de manera automatizada, en función de la temperatura interna. Se ha establecido que esta temperatura debe oscilar entre 13°C y 18.5°C, para proporcionar un ambiente ideal para el crecimiento del micelio y la formación de cuerpos fructíferos.

Adicionalmente, se ha implementado una puerta corrediza controlada por un motor a pasos, diseñada para liberar la sobrepresión generada cuando el aire acondicionado introduce aire fresco del exterior hacia el interior de la estructura. (Figura 11). Esto es necesario para evitar una sobrecompensación de aire y mantener los niveles de CO_2 en rangos óptimos, permitiendo así un intercambio eficiente de gases. Una vez alcanzada la temperatura deseada, tanto el aire acondicionado como el sistema de celdas de Peltier se apagan, y la puerta corrediza se cierra automáticamente para restaurar las condiciones de hermeticidad dentro de la estructura, asegurando así un ambiente controlado y estable para el cultivo.

Figura 11.

Puerta Corrediza Mediante un Servomotor

Nota. Esta imagen muestra la puerta corrediza empleada en el intercambio de aire entre el interior y exterior de la estructura para mantener los niveles óptimos de CO_2. **Autor:** elaboración propia.

Una vez implementado este sistema, se realizaron pruebas para determinar cuánto tiempo la estructura es capaz de mantener la temperatura interna dentro del rango óptimo (13°C a 18.5°C) después de que el sistema de refrigeración se apaga, y cuánto tiempo tarda en alcanzar nuevamente la temperatura mínima permitida una vez encendido el aire acondicionado.

Tabla 7.

Primera Prueba de Control de Temperatura

TIEMPO (minutos)	TEMPERATURA (grados centígrados)
0	28
2	26
4	19
8	15,5
10	13,33

Nota. Esta tabla muestra el tiempo que tarda el sistema para llegar al rango de temperatura óptimo por primera vez, partiendo desde la temperatura ambiente. **Autor:** elaboración propia.

Tabla 8.

Segunda Prueba de Control de Temperatura

TIEMPO (minutos)	TEMPERATURA (grados centígrados)
0	13,3
2	14
4	15
8	15,8
10	16,5
12	17,6
14	18,5

Nota. Esta tabla muestra el tiempo que tarda el sistema en mantener el rango de temperatura óptimo después de la primera prueba. **Autor:** elaboración propia.

Tabla 9.

Tercera Prueba de Control de Temperatura

TIEMPO (minutos)	TEMPERATURA (grados centígrados)
0	18,6
1	18
2	17,3
3	16
4	15
5	14,6

Nota. Esta tabla muestra el tiempo que tarda el sistema en volver a retomar el rango de temperatura óptimo después de la segunda prueba. **Autor:** elaboración propia.

De estos datos se puede observar que, en promedio, la estructura mantiene la temperatura dentro del rango permitido durante aproximadamente 15 minutos después de que se apaga el aire acondicionado. Por otro lado, el tiempo necesario para que el sistema de refrigeración restablezca la temperatura mínima (15°C) es de aproximadamente 5 minutos, tras lo cual se apaga nuevamente para evitar un sobreenfriamiento.

Este ciclo relativamente corto de encendido y apagado sugiere que el sistema estará en funcionamiento constante, generando un intercambio de aire frecuente y, por tanto, permitiendo una renovación continua del mismo. Esto contribuye a mantener los niveles de dióxido de carbono (CO_2) dentro de los límites adecuados para el desarrollo del cultivo, lo que podría hacer innecesario el uso de un sistema adicional de sensores para monitorear el CO_2, dado que las concentraciones difícilmente alcanzarían niveles críticos bajo estas condiciones de ventilación constante.

Una vez realizado esto, se procede a desarrollar el sistema de riego, en cual cuenta con una electrobomba de 125 volts a 3 Amp-60hz con una potencia de ½ Hp; Un relé que activara un contactor, que permitirá el encendido de la electrobomba que estará conectada a un tanque de 80 litros, se usara una manguera con boquillas de aspersión que permite regar emulando una lluvia suave de manera uniforme, en el diámetro de la bolsa se compost, evitando así tener zonas de empozamiento de agua o de resequedad, esto no solo sirve para la humedad del compost sino también para bajar su temperatura y elevar la humedad relativa en el ambiente, contamos con un sensor de humedad hd38, con el cual realizamos pruebas previamente y su respectiva calibración, lo que conseguimos con esto es definir un intervalo ideal en el cual puede oscilar la humedad de suelo, teniendo un valor ideal para el desarrollo del cultivo, evitando así problemas relacionados con niveles de riego inadecuados como lo pueden ser :

- **Encharcamiento y asfixia radicular:** El riego excesivo provoca saturación de la capa de caseo y del sustrato, interfiriendo en el intercambio de gases (O_2/CO_2) y lo que puede llevar a pudrición de raíces y desarrollo de moho sobre la superficie (USDA, 1990).
- **Falta de humedad (subirrigación):** La deficiencia de riego puede generar gorros dorados, secos o arrugados y tallos frágiles, con un desarrollo pobre de los cuerpos fructíferos (Rankel, 2024).
- **Mayor incidencia de enfermedades y contaminaciones:** Tanto el exceso como la falta de agua crean condiciones ideales para patógenos (moho, bacterias o contaminantes). Las condiciones erráticas de humedad favorecen mohos competidores sobre el micelio (Terrashroom, 2024; USDA, 1990).
- **Disminución del rendimiento y calidad:** El agua insuficiente lleva a menor producción de cuerpos fructíferos, mientras que el exceso puede estancar el desarrollo y causar manchas, deformaciones o decoloración en los hongos (Rankel, 2024; USDA, 1990).

Teniendo todos los requerimientos estructurales y técnicos cubiertos, traemos el compost, el cual fue donado por el señor Jorge Suarez de funglus, a través de Ricardo Jeske de la empresa champis que tiene su centro de producción en el kilómetro 18 del valle del cauca, fueron 6 bolsas de compost patentado echo a base de pasto de corte, ya inoculado con la semilla del hongo agaricos bisporus, en su etapa final de inoculación del compost, casi listo para cubrir con una capa de tierra enriquecida, conocida como tierra de cubrimiento, la cual también fue donada por ellos. (Figura 12).

Figura 12.

Compost con Semilla Inoculada del Hongo Agaricus Bisporus

Nota. Esta imagen muestra el compost inoculado en su etapa final listo para la producción, así como la tierra de cubrimiento. **Autor:** elaboración propia.

Iniciamos las mediciones el día 27 de febrero del 2025, ya que era la primera vez que teníamos material vivo dentro del sistema. Estuvimos atentos a cualquier imprevisto, los cuales fueron mínimos y se corrigieron de inmediato. Un ejemplo fue la necesidad de calibrar el sensor de humedad del suelo, así como ajustar el tiempo de activación del sistema de riego.

Rápidamente nos dimos cuenta de que la concentración de CO_2 no alcanzaba niveles críticos en ningún momento. Esto se debía al constante intercambio de aire entre el interior y el exterior, proporcionado por el sistema de refrigeración externo, lo cual hizo que esta medición resultara, en la mayoría de los casos, innecesaria.

Sin embargo, comenzaron a presentarse problemas con el sensor SCD-40, el cual entraba en ciclos de reinicio y no lograba recuperarse, incluso al intentar forzar su reinicio por medio de

código. Observamos que funcionaba correctamente de forma aislada, pero al integrarlo al sistema presentaba múltiples fallos, volviéndose poco confiable. Podía estar inactivo durante lapsos de hasta 40 minutos, lo cual impedía al sistema evaluar datos críticos, afectando directamente las condiciones óptimas para el cultivo.

Dado que el sensor había sido importado y el sustrato ya se encontraba dentro del sistema, decidimos ajustar el código y sustituirlo por un sensor DHT22, el cual proporciona lecturas precisas de temperatura y humedad relativa del ambiente. En esta etapa, la medición de CO_2 dejó de ser prioritaria, ya que la temperatura, al ser controlada por el sistema de refrigeración, actuaba indirectamente sobre los niveles de esta variable.

Una vez solucionado este inconveniente, los problemas restantes fueron menores, como pequeñas fugas en el tanque de almacenamiento de agua para el riego, las cuales fueron fácilmente reparadas, y continuamos con normalidad el correcto desarrollo del cultivo logrando de esta forma tres ciclos de recolección. (Tabla 10).

Tabla 10.

Cantidad en Gramos de Champiñón Portobello Durante la Producción

Producción	Fecha de recolección	Días de siembra (desde el 27/02)	Peso total (g)	Tamaño promedio (cm)	Producción perdida o en mal estado (g)
1	18/03/2025	19	866	7	0
2	20/03/2025	21	650	6	0
3	21/03/2025	22	1912	7	0
4	23/03/2025	24	920	8	0
5	24/03/2025	25	551	8	0
6	25/03/2025	26	150	6	0
7	26/03/2025	27	876	9	0
8	27/03/2025	28	1489	8	0
9	30/03/2025	31	2905	9,5	200
10	2/04/2025	34	3398	8	142

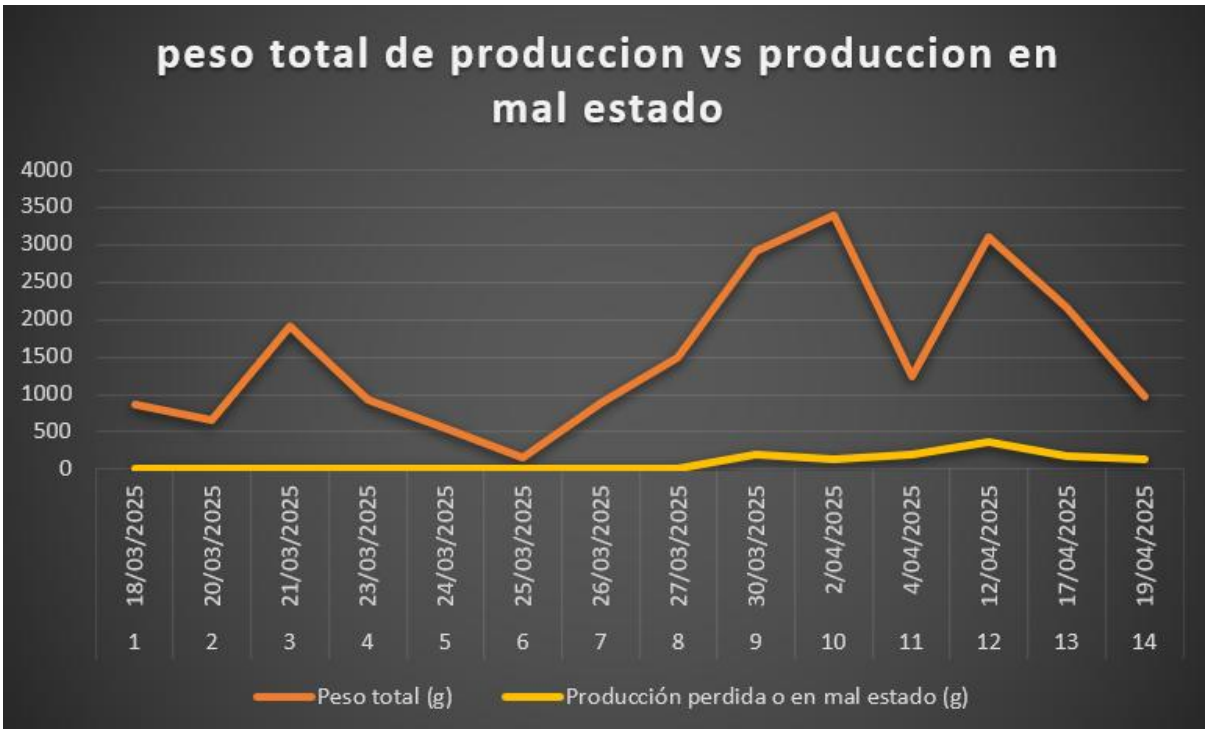
Producción	Fecha de recolección	Días de siembra (desde el 27/02)	Peso total (g)	Tamaño promedio (cm)	Producción perdida o en mal estado (g)
11	4/04/2025	36	1250	6	188
12	12/04/2025	44	3101	7	357
13	17/04/2025	49	2149	5	166
14	19/04/2025	51	979	5	133
Totales			**21.196**		**1.186**

Nota. Esta tabla muestra el total de la producción en gramos de manera general y las pérdidas durante el proceso de recolección. **Autor:** elaboración propia.

La Figura 13 evidencia el comportamiento comparativo entre la producción total y la producción en mal estado a lo largo del ciclo de recolección. Se observa que, aunque el peso total presenta picos notables en varias fechas, la cantidad de producción en mal estado es considerablemente menor y se mantiene controlada en la mayor parte del periodo. Los incrementos en la pérdida coinciden con momentos de mayor producción, lo que sugiere que el volumen cosechado puede influir en una ligera elevación de producto no comercializable, posiblemente por factores como sobre maduración, daños físicos o condiciones ambientales específicas. En general, la relación muestra que el sistema automatizado implementado logró minimizar el porcentaje de pérdidas frente al total producido, manteniendo una alta eficiencia en la calidad del cultivo.

Figura 13.

Relación entre el peso total de producción y la producción en mal estado de champiñón portobello durante el ciclo de cultivo



Nota. La figura representa la comparación gráfica entre el peso total recolectado de champiñón portobello en cada jornada de cosecha y la cantidad correspondiente de producto en mal estado o pérdida. **Autor:** elaboración propia.

9. Análisis de Resultados

Para evaluar el desempeño del prototipo automatizado en el control térmico del sistema de cultivo de Agaricus bisporus, se realizaron tres pruebas, cuyos resultados se presentan en las tablas 7, 8 y 9. Estas pruebas se enfocaron exclusivamente en la variable de temperatura, dado que esta representa uno de los factores más críticos para el desarrollo exitoso del champiñón durante sus diferentes fases.

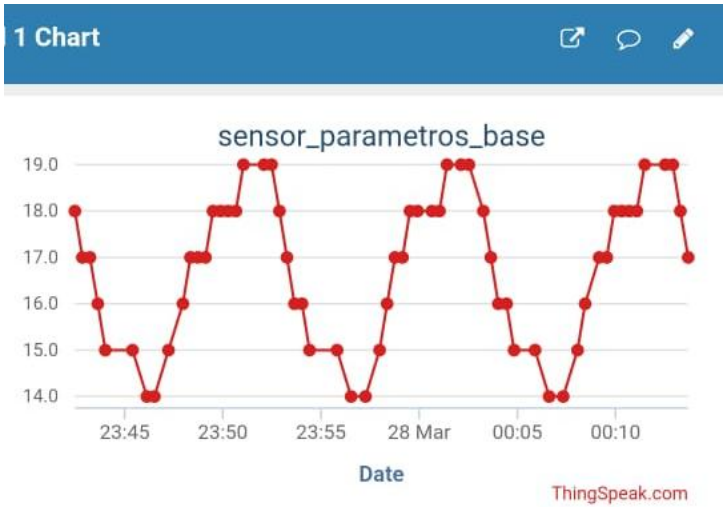
El comportamiento térmico durante la primera prueba (Tabla 7), cuyo objetivo fue verificar la capacidad del sistema para reducir la temperatura inicial del prototipo, partiendo desde 28 °C hasta alcanzar los 13 °C, umbral necesario para inducir la fase de fructificación. Los resultados demuestran que el sistema de enfriamiento mixto, basado en un aire acondicionado externo y las celdas peltier internas, fue capaz de reducir gradualmente la temperatura en un entorno controlado, cumpliendo con el objetivo establecido. Este descenso valida el diseño del sistema en cuanto a su capacidad para ajustar las condiciones internas del cultivo de manera eficiente.

Los resultados de la segunda prueba (Tabla 8), la cual se enfocó en evaluar la estabilidad térmica del sistema. Se registró el comportamiento de la temperatura una vez alcanzado el rango de fructificación (13 °C–18 °C), con el fin de determinar cuánto tiempo el sistema era capaz de mantener dichas condiciones sin intervención externa. Los datos muestran que el sistema logró conservar una temperatura dentro del rango deseado durante un periodo prolongado aproximadamente de 15 minutos, lo cual demuestra su viabilidad para sostener un ambiente apto para la producción de Agaricus bisporus en regiones tropicales.

Por último, la tercera prueba (Tabla 9), que midió el tiempo requerido por el sistema para volver a enfriar el prototipo una vez que la temperatura interna había aumentado, simulando un escenario real de calentamiento ambiental. Esta prueba permitió identificar la capacidad de recuperación térmica del sistema y su tiempo de respuesta. Se comprobó que el sistema puede volver a alcanzar el rango de fructificación en tiempos razonables, manteniendo la eficiencia del control térmico incluso frente a perturbaciones.

Figura 14.

Grafica de Valores Obtenidos del Sensor de Temperatura



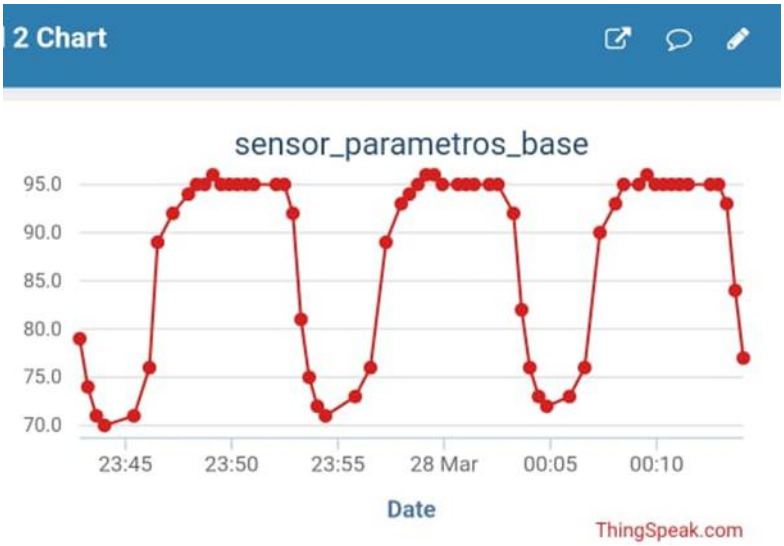
Nota. Esta grafica muestra la visualización de los datos de temperatura en ThingSpeak durante un determinado periodo de tiempo. **Autor:** elaboración propia.

Se presenta un comportamiento que se asemeja a una onda sinusoidal debido a las variaciones periódicas y cíclicas de la temperatura dentro del rango controlado del cultivo. Esta fluctuación refleja cómo el sistema automatizado responde continuamente a los cambios

ambientales y ajustes de control para mantener la temperatura óptima necesaria para el champiñón portobello, generando un patrón repetitivo y suave a lo largo del tiempo.

Figura 15.

Grafica de Valores Obtenidos del Sensor de Humedad Relativa

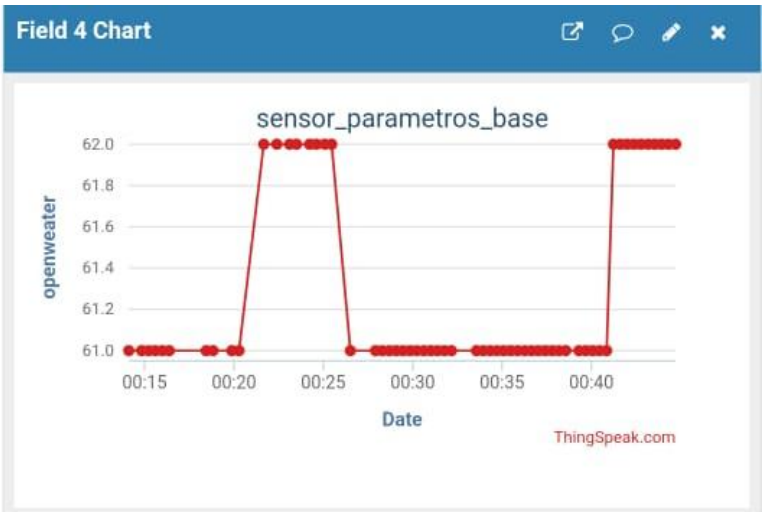


Nota. Esta grafica muestra la visualización de los datos de humedad relativa en ThingSpeak durante un determinado periodo de tiempo. **Autor:** elaboración propia.

Se muestra un comportamiento también sinusoidal en la humedad relativa del sustrato, consecuencia directa del ciclo de riego automatizado y la evaporación natural del compost. Este patrón refleja los aumentos y disminuciones periódicas de la humedad que resultan de la aplicación del agua mediante el sistema y su posterior absorción y pérdida, evidenciando un control dinámico que se adapta a las necesidades del cultivo.

Figura 16.

Grafica de Valores Obtenidos del Sensor de Humedad del Sustrato



Nota. Esta grafica muestra la visualización de los datos de humedad del sustrato en ThingSpeak durante un determinado periodo de tiempo. **Autor:** elaboración propia.

A diferencia de las Ilustraciones 14 y 15, que muestran comportamientos sinusoidales típicos debido a las variaciones cíclicas y controladas de temperatura y humedad relativa respectivamente, la Figura 16 refleja la dinámica específica de la humedad en el sustrato, que puede presentar variaciones debidas a la absorción del agua, el riego automático y la evaporación, manifestando un patrón propio más ligado a estos ciclos de humedad-absorción-regulación. Este comportamiento es fundamental para garantizar que el cultivo reciba la cantidad adecuada de agua, evitando tanto el exceso como la deficiencia hídrica, y se traduce en el mantenimiento de condiciones óptimas para el crecimiento del champiñón en el prototipo automatizado.

A partir de la recolección de datos obtenidos por los sensores integrados en el sistema, los cuales miden parámetros críticos como la temperatura, la humedad relativa en el ambiente y la

humedad del sustrato, se logró establecer un flujo de datos confiable mediante la comunicación Zigbee entre un módulo ESP32 emisor y un receptor. Esta información fue procesada y posteriormente enviada a la plataforma ThingSpeak, permitiendo su visualización en tiempo real. En las gráficas generadas se evidencian patrones cíclicos y variaciones que reflejan el comportamiento ambiental dentro del módulo de cultivo.

Por ejemplo, en la gráfica correspondiente a la humedad relativa se observa un ciclo de incremento y descenso pronunciado, lo cual está asociada al sistema de riego y al sistema de refrigeración del prototipo. Este comportamiento es esencial para imitar las condiciones que el champiñón agaricus bisporus requiere en su etapa de desarrollo. La gráfica de temperatura muestra fluctuaciones moderadas, con valores que oscilan entre los 14 °C y los 19 °C, alineándose con las condiciones ideales para la fase vegetativa del hongo. Por otro lado, los datos de humedad del suelo se mantienen en un rango constante alrededor del 65 %, lo cual refleja una adecuada regulación del sistema de riego automatizado, garantizando un ambiente óptimo para el micelio.

El uso de ThingSpeak como herramienta de análisis permitió no solo validar el correcto funcionamiento de los sensores y el sistema de adquisición de datos, sino también facilitar el monitoreo remoto y la toma de decisiones en tiempo real. Esta integración de hardware y software refleja el potencial de la ingeniería electrónica aplicada a la agricultura de precisión, permitiendo optimizar recursos y replicar condiciones ambientales complejas en entornos urbanos como el municipio de Tuluá.

Finalmente, la evidencia de la fase culminante del proyecto (Tabla 10), muestra la fructificación exitosa de Agaricus bisporus dentro del prototipo automatizado. Se registró el crecimiento de cuerpos fructíferos con características morfológicas adecuadas, lo que confirma

que las condiciones ambientales generadas durante las pruebas fueron apropiadas para completar el ciclo de cultivo. Este resultado valida funcionalmente el sistema desarrollado, confirmando que cumple con su propósito central: permitir el cultivo del champiñón en un entorno controlado, accesible y replicable para pequeños productores. (Figura 17,18 y 19).

Figura 17.

Producción Evidenciada Antes de Realizar una Recolección

Nota. Esta imagen muestra un ciclo de producción obtenida previa a una recolección. **Autor:** elaboración propia.

Figura 18.

Champiñón Portobello Recolectado de un Ciclo

Nota. Esta imagen muestra la evidencia del buen crecimiento, forma y condición de un champiñón obtenido de un ciclo de recolección. **Autor:** elaboración propia.

Figura 19.

Champiñón Recolectado Durante una Determinada Colecta

Nota. Esta imagen muestra como fue el proceso de pesaje posterior a una recolección. **Autor:** elaboración propia.

Tabla 11

Tabla comparativa entre champiñón del prototipo y referencias comerciales

Fuente/Producto	Rango de diámetro (cm)	Promedio reportado (cm)	Notas relevantes
Prototipo	5,0 – 9,5	6,0 – 8,0	Basado en 14 sucesivas recolecciones, detallado en Tabla 10
Setas Doradas/Comercial Colombia	7,0 – 10,0	7,0 – 10,0	Estándar empacado, ficha técnica industria alimentaria
Eurochamp (España/EU)	1,0 – 5,0	3,0 – 5,0	producto de exportación con certificación UE; textura firme, color oscuro y sabor intenso
Mercado Gourmet (Otros)	Hasta 15,0	No Aplica	Corte especial gourmet, no estándar medio

Nota. Esta tabla muestra la comparativa de diámetros con base en datos del documento de tesis, ficha técnica de Setas Doradas y ficha de producto Eurochamp. **Autor:** datos tomados de la tabla 10, “Setas Doradas. (2018). Ficha técnica champiñón blanco” y “Eurochamp. (2021). Portobello, el secreto está en el sabor”.

De acuerdo con la Tabla 11, se puede apreciar que el champiñón obtenido con el prototipo presenta características intermedias frente a las referencias comerciales evaluadas. Los datos muestran que el prototipo alcanza un rango de diámetro entre 5,0 y 9,5 cm y un promedio de 6,0 a 8,0 cm, cifras que lo sitúan por debajo de la categoría “Mercado Gourmet (Otros)”,

donde los diámetros pueden llegar hasta 15 cm, pero claramente por encima de los estándares de exportación Eurochamp (España/UE), cuyo rango va de 1,0 a 5,0 cm y promedio de 3,0 a 5,0 cm, y también supera en tamaño al Portobello comercial colombiano (Setas Doradas), cuyo rango típico es de 7,0 a 10,0 cm con promedios de 7,0 a 10,0 cm.

Por otra parte, los resultados experimentales demuestran que el prototipo no solo es capaz de controlar y mantener la temperatura interna en los rangos requeridos para el cultivo de Agaricus bisporus, sino que también es eficiente en la recuperación térmica ante variaciones externas. Esto respalda la viabilidad técnica de su implementación en contextos agrícolas rurales con condiciones climáticas adversas.

La siembra duró 51 días, el costo del prototipo está categorizado de manera individual y el costo operativo del proceso durante ese periodo está determinado basándose en el gasto de energía y agua obtenidos del recibo de servicios de la residencia donde fue ejecutado el proyecto. (Tabla 12 y 13).

Tabla 12.

Costo Operativo de Consumo de Energía Eléctrica y Agua

mes	energía (consumo en pesos)	agua (consumo en pesos)	consumo total
marzo	211000	19900	230900
abril	434000	23000	457000
total			687900

Nota. Esta tabla muestra el consumo de energía y de agua en pesos colombianos durante el periodo de siembra. **Autor:** elaboración propia.

Durante la implementación del prototipo del sistema automatizado para el cultivo de champiñón en Tuluá, se realizó una inversión total de COP 3.329.600. Esta cifra incluye tanto los costos de diseño y construcción del sistema, como los gastos operativos asociados a los dos meses de funcionamiento continuo.

De ese total, los costos operativos ascendieron a COP 687.900, discriminados en COP 645.000 en consumo de energía eléctrica y COP 42.900 en agua. En este periodo de operación se logró una producción estimada de 21 kilogramos de champiñón.

Este resultado permite una primera aproximación al análisis de la rentabilidad del sistema, ya que, al considerar un precio promedio de mercado de COP 40.000 por kilogramo de champiñón fresco, se estima que la producción obtenida representa un ingreso potencial de COP 840.000.

Es importante destacar que el sistema es reutilizable y escalable, por lo que su desempeño puede mejorar significativamente en ciclos posteriores, disminuyendo el peso relativo de la inversión inicial en el costo por kilogramo producido.

Tabla 13.

Costo en pesos colombianos del Prototipo

Ítem	Componente o material	Cantidad	Costo unitario (COP)	costos indirectos	Costo total (COP)	Observaciones
1	madera aglomerada tipo RH	2	240000	35000	515000	incluye láminas de Rh, canteada y corte

2	Láminas de zinc galvanizadas	3	82000	15000	261000	calibre 18
3	Ángulos reforzados	12	7200	0	86400	
4	Pegamento para poliestireno	3	14000	0	42000	
5	Láminas de icopor	9	6300	0	56700	
6	Impresión de puerta corrediza y base para servomotor en 3D	1	75000	0	75000	Servicio de impresión
7	Yumbolon	9	14500	0	130500	
8	Tornillería	1	30000	0	30000	
9	Bisagras, rodachines, cerradura	1	45400	0	45400	Kit de cierre
10	ESP32	2	24600	12500	61700	Módulo microcontrolador
11	Xbee 2C	2	0	0	0	Comunicación inalámbrica

12	Sensor HD38	2	27000	15300	69300	Sensor ambiental
13	Sensor SCD-40	1	180000	0	180000	Sensor de CO_2
14	Celdas de Peltier	4	15500	12000	74000	Refrigeración
15	Disipadores de sólidos (aluminio)	4	25000	10700	110700	
16	Disipadores de agua	3	35300	0	105900	
17	Pasta térmica	1	17200	10000	27200	
18	Fuente 12 volts	1	58000	10500	68500	Fuente de alimentación
19	Relay	4	10800		43200	
20	Cooler 110 volts	2	36000	10600	82600	Ventilación
21	Cooler 12 volts	2	17800	0	35600	Ventilación
22	Motor a paso	1	17200	0	17200	Control de movimiento

23	Servo motor	1	28000	0	28000	
24	Electrobomba para peceras	1	65000	0	65000	Recirculación
25	Electrobomba 1/2 HP	1	110000	0	110000	Riego
26	Contactor	1	39000	0	39000	Control eléctrico
27	Tanque de 80 litros	1	38000	0	38000	Almacenamiento de agua
28	juego de Tuberías	1	25100	0	25100	PVC o polietileno
29	Kit de riego para invernaderos (manguera y boquillas)	1	48500	0	48500	
30	juego de Jumpers	2	20000	0	40000	Conexiones internas
31	Cableado	12	4600	0	55200	
32	compost, grano inoculado tierra de cubrimiento	6	0	75000	75000	el compost y demás fue donado

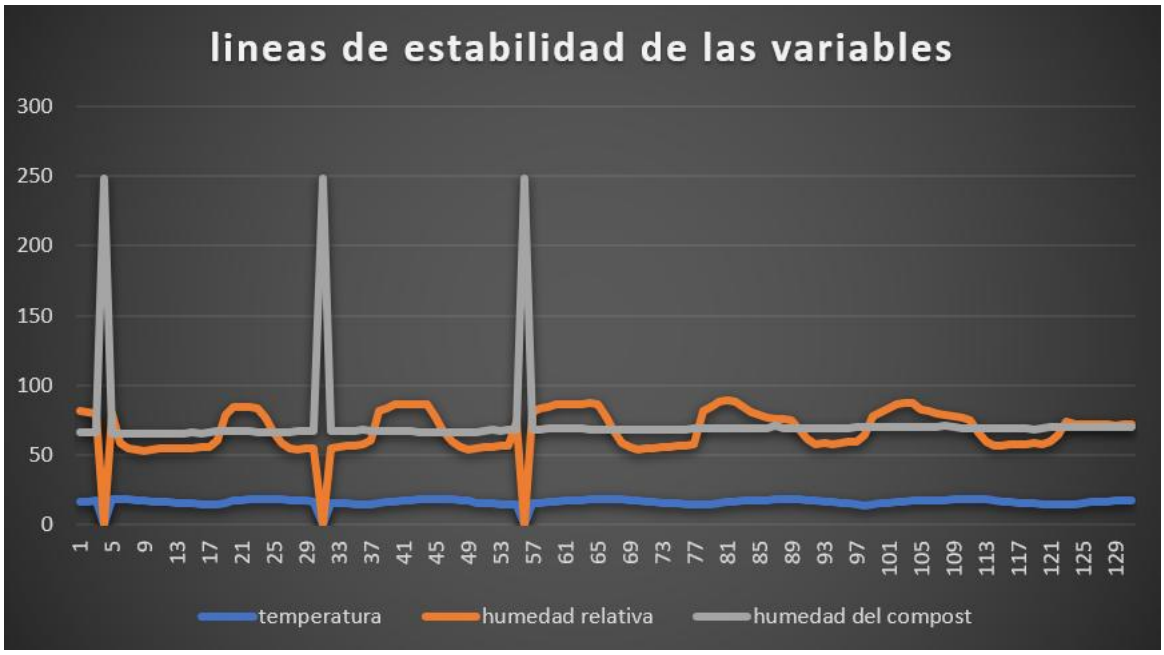
TOTAL	2641700

Nota. Esta tabla muestra el valor unitario y la cantidad requerida de cada componente para la fabricación del prototipo. **Autor:** elaboración propia.

La gráfica presentada refleja el comportamiento y la estabilidad de las variables de temperatura, humedad relativa y humedad del compost a lo largo de 130 mediciones consecutivas. Se evidencia que, en condiciones normales, las tres variables mantienen un patrón estable con ligeras oscilaciones que pueden asociarse al funcionamiento regulado del sistema de control. Este comportamiento estable permite identificar un perfil casi sinusoidal en las mediciones, lo que indica que el sistema mantiene las condiciones ambientales dentro de los rangos establecidos para el cultivo.

Figura 20.

comportamiento y la estabilidad de las variables de temperatura, humedad relativa y humedad



Nota. La figura ilustra el comportamiento y la estabilidad de las variables de temperatura, humedad relativa y humedad del compost a lo largo de 130 mediciones consecutivas. **Autor**: elaboración propia.

Los picos pronunciados que se observan en la humedad del compost, así como las caídas abruptas momentáneas, no corresponden a alteraciones en el control, sino a eventos externos puntuales ocasionados por caídas de tensión eléctrica. Es importante destacar que, tras estos eventos, el sistema presenta una capacidad de recuperación inmediata, retornando los valores a su rango de operación óptimo sin comprometer la estabilidad general de las variables. Este desempeño demuestra la eficacia y la resiliencia del sistema automatizado frente a interrupciones de energía, garantizando la continuidad de las condiciones ideales para el cultivo.

10. Conclusiones

El desarrollo del prototipo de sistema automatizado demostró ser una alternativa viable para recrear condiciones ambientales adecuadas para el cultivo del champiñón Agaricus bisporus en zonas tropicales como Tuluá, donde el clima natural no favorece su producción.

La implementación de tecnologías como microcontroladores ESP32, sensores ambientales (SCD-40, HD-38), celdas Peltier para refrigeración y el uso de Zigbee para la comunicación inalámbrica, permitió un control preciso y en tiempo real de variables críticas como temperatura, humedad relativa, humedad del sustrato y niveles de CO_2.

La integración con la plataforma IoT ThingSpeak facilitó la recolección, visualización y análisis de datos, permitiendo verificar el correcto funcionamiento del sistema y tomar decisiones informadas para el manejo del ambiente interno del invernadero.

Las pruebas experimentales confirmaron que el sistema es capaz de mantener las condiciones requeridas durante las fases de incubación y fructificación del hongo, evidenciando así su funcionalidad y aplicabilidad en entornos reales.

Este proyecto evidencia cómo la ingeniería electrónica puede contribuir directamente al desarrollo de la agricultura de precisión, democratizando el acceso a tecnologías para pequeños productores y ofreciendo soluciones sostenibles frente a desafíos alimentarios y climáticos.

11. Recomendaciones

Se recomienda ampliar el prototipo a una escala mayor para validar su eficacia en condiciones de producción comercial, evaluando su comportamiento con un mayor volumen de cultivo y diferentes variedades de sustrato.

Incluir sensores adicionales como medidores de luz y humedad ambiental externa, así como sensores de pH y temperatura del sustrato, para complementar la base de datos y mejorar el control micro climático del sistema.

Considerar el uso de energía solar como fuente alternativa de alimentación del sistema para aumentar su sostenibilidad y reducir costos operativos, especialmente en zonas rurales con acceso limitado a la red eléctrica.

Desarrollar una interfaz gráfica de usuario (GUI) más intuitiva para el monitoreo local o móvil, facilitando el acceso a personas con poca formación técnica, lo cual sería especialmente útil para pequeños agricultores.

12. Referencias Bibliográficas

- Basso, B., Lupo, S., & Sanna, A. (2017). Advances in microcontroller technologies for precision farming. Agricultural Technology Research Journal, 14(2), 112-118.
- Chhetri, N., Nepal, S., & Jha, B. (2020). Integration of remote sensing and sensor-based technologies for precision agriculture. Environmental Monitoring and Assessment, 192(8), 482-495.
- Delahuertacasa. (s.f.). Champiñón portobello (kg). Recuperado el 29 de junio de 2025, de https://delahuertacasa.com/verduras/champinon-portobello/
- Delgado, A. (2020). Qué es una célula de Peltier y para qué sirve. Recuperado de https://geeknetic.es.
- Eurochamp. (2021). Portobello, el secreto está en el sabor. https://www.eurochamp.es/noticias/portobello-el-secreto-esta-en-el-sabor/
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2022). The State of Food and Agriculture 2022: Leveraging automation in agriculture for transforming agrifood systems. FAO. https://www.fao.org/3/cb9479en/online/sofa-2022/agrifood-systems-transformation-automation.html
- Ge, Y., Zhang, M., & Wang, Y. (2022). Application of environmental sensors in agriculture and their potential in precision farming. Sensors, 22(14), 5291.
- Gutierrez-Li, E., et al. (2024). Robots in Agriculture: Automating Farm Production. North Carolina State University. https://cals.ncsu.edu/news/automating-farm-production/

- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. A. (2022). Metodología de la investigación (7.a ed.). McGraw-Hill Education.
- https://earchivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/24294/PFC_Sergio_Rafael_Lopez_Campos.pdf?utm
- https://redinnovacioncolombia.com/funglus
- https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/20.500.12692/29311/4/Odar-RSM-SD.pdf?utm
- https://revistas.unilibre.edu.co/index.php/ingeniare/article/view/562/436
- https://www.agronegocios.co/agricultura/funglus-transforma-cultivos-de-champicultores-colombianos-con-compost-de-alta-calidad-2751840
- https://www.fao.org/newsroom/detail/FAO-state-of-food-and-agriculture--SOFA-2022-automation-agrifood-systems/es
- Huang, Q., Xie, L., & Zhang, H. (2020). Performance analysis of ZigBee technology in agricultural sensor networks. Journal of Sensors and Actuators, 25(3), 112-119.
- IGrowNews. (2025, abril 22). Automation in Agriculture: Transforming Farming for the Future. https://igrownews.com/automation-in-agriculture-transforming-farming-for-the-future/
- Intellias. (2025, junio 17). Farm Automation: Shaping the Future of Agriculture. https://intellias.com/farm-automation-shaping-the-future/

- International Journal for Multidisciplinary Research. (2024). Agriculture and Automation: Potential Benefits, Difficulties and Socio-Economic Impacts. IJFMR, 6(5), 1-10. https://www.ijfmr.com/papers/2024/5/28903.pdf
- Jackson, A., & Marsh, R. (2018). Microcontroller applications in precision agriculture. Journal of Agricultural Engineering, 12(3), 67-74.
- Jha, K., Doshi, A., Patel, P., & Shah, M. (2019). A comprehensive review on automation in agriculture using artificial intelligence. Computers and Electronics in Agriculture, 165, 104943. https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104943
- Mulla, D. J. (2013). Twenty-five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. Biosystems Engineering, 114(4), 358-371.
- Naciones Unidas en México. (2022). Informe de la FAO sobre automatización agrícola. Recuperado de https://mexico.un.org.
- Patel, P., Kumar, R., & Singh, N. (2020). Energy-efficient microcontrollers for wireless sensor networks in agricultural systems. International Journal of Green Computing, 6(4), 45-53.
- Rankel, K. (2024, octubre 31). What to Know About Growing Your Portobello Mushroom Outdoors. Greg. https://greg.app/blog/portobello-mushroom-care/
- Rankel, K. (2024, octubre). Why Your Portobello Mushroom Is Not Doing Well. Greg. https://greg.app/blog/portobello-mushroom-problems/

- Red Hat. (2023). ¿Qué son los servicios en la nube? Recuperado de https://www.redhat.com.
- Rodríguez, R., Martínez, C., & González, F. (2020). Agricultural sustainability and environmental impact reduction through precision irrigation techniques. Journal of Agricultural Engineering Research, 56(2), 133-146.
- Setas Doradas. (2018). Ficha técnica champiñón blanco [PDF]. Setas Doradas. https://connectamericas.com/sites/default/files/company_files/FICHA%20TECNICA%20CHAMPI%C3%91ON%20SETAS%20DORADAS%20blanco%202018.pdf
- Terrashroom. (2024, junio 24). Common Challenges in Mushroom Cultivation. https://terrashroom.com/blogs/articles/common-challenges-in-mushroom-cultivation
- United States Department of Agriculture (USDA). (1990). Mushroom Crop Profile. USDA Risk Management Agency. https://legacy.rma.usda.gov/policies/1990/mushroom.html
- Van den Munckhof, M. (2020). Modern Mushroom Growing 2020. Harvesting Publishing.
- Zhang, H., Zheng, Y., & Li, X. (2021). Precision agriculture and environmental monitoring: Opportunities and challenges. Sensors and Actuators B: Chemical, 331, 129394.