

# **Desarrollo de un sistema automatizado para la gestión eficiente de un invernadero agrícola**

Juliana Valeria Acosta Capera

Leidy Katherine Duarte Hernández

Laura Dayana Ortiz García

Asesora

Natalia Molina Arévalo

Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD

Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería - ECBTI

Ingeniería Industrial

2025

## **Agradecimientos**

Expresamos nuestro más profundo agradecimiento a la *Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD)* y a la *Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería – ECBTI*, por habernos brindado las bases académicas, las herramientas y los conocimientos fundamentales para el desarrollo de este trabajo de grado. La formación recibida a lo largo de nuestra carrera ha sido clave no solo para la construcción de este proyecto, sino también para nuestro crecimiento personal y profesional.

Nuestro más sincero agradecimiento a la ingeniera Natalia Molina Arévalo, directora y revisora de este trabajo, por su invaluable orientación, conocimiento y acompañamiento en cada etapa del proceso. Gracias a su compromiso, a sus críticas constructivas y a la confianza que depositó en nosotras, logramos superar nuestras propias expectativas y fortalecernos tanto en el ámbito investigativo como en el profesional. Su apoyo constante y sus palabras de aliento fueron un pilar fundamental en la realización de este proyecto.

Agradecemos también al ingeniero Duber Martínez Torres, quien con su asesoría técnica y experiencia en el área de electrónica nos brindó las herramientas necesarias para estructurar y perfeccionar una parte esencial de nuestro proyecto. Su paciencia, disposición y entusiasmo fueron decisivos para culminar esta etapa con éxito y lograr un resultado sólido y funcional.

De igual manera, expresamos nuestra gratitud a la Ingeniera Lucía Esmeralda Aguilar, quien fue un apoyo fundamental en la etapa inicial del anteproyecto. Gracias a su guía y acompañamiento, logramos construir las bases conceptuales, metodológicas y estructurales que dieron sentido a nuestro trabajo. Su exigencia, que se convirtió en una motivación constante para alcanzar un nivel académico de calidad y rigor.

Queremos también reconocernos y agradecernos mutuamente como equipo, por la colaboración, la perseverancia y el compromiso que cada una aportó a lo largo de este camino. El trabajo realizado es reflejo del esfuerzo compartido, del intercambio de conocimientos, de la responsabilidad y del apoyo constante entre nosotras. Agradecemos las palabras de aliento en los momentos difíciles, la dedicación del tiempo y la pasión con la que enfrentamos cada reto. Los logros alcanzados son resultado de un trabajo conjunto y, al mismo tiempo, de las dificultades superadas, que fortalecieron nuestra unión como compañeras y consolidaron nuestra capacidad de trabajo en equipo.

Finalmente, extendemos nuestro agradecimiento a todas aquellas personas que, de manera directa o indirecta, contribuyeron con su apoyo, conocimientos o acompañamiento emocional para que este proyecto fuera posible. Cada gesto, consejo o palabra de motivación representó un impulso invaluable que nos acompañó a lo largo de este proceso y nos permitió culminar con éxito esta etapa tan significativa en nuestra formación profesional.

## **Dedicatoria Juliana Acosta**

A mi mamá, por ser lo que su nombre significa en mi vida: un pilar. Por su amor infinito, su apoyo incondicional y por haber consagrado su vida a cuidar de la mía. Por guiarme con sabiduría y fortaleza, por enorgullecerse de quien soy y de quien seré, deseando siempre la mejor de mis suertes.

A mi segunda mamá, Julieth, quien con amor y una mirada distinta de la vida ha forjado en mí a la persona que soy hoy. Por el apoyo constante, por sus brazos siempre abiertos y por ser refugio en mis momentos difíciles.

A Ana, mi nuevo motor para seguir adelante. Espero que siempre se sienta orgullosa de la persona en la que me convertiré, así como yo lo estaré al verla crecer. Llevará siempre mi amor más puro.

A Inés y Rodrigo, por criarme con amor como a una hija más y brindarme un cariño que guardo con profunda gratitud.

A un par de amigos que, con su inteligencia, fortaleza y capacidad de superar la adversidad, han sido inspiración en este camino.

Y a la vida misma, por su complejidad y sus constantes cambios, por los retos que me han fortalecido, los momentos irreemplazables que me ha regalado y las personas que ha puesto en mi camino, haciendo de él un tránsito más bello y ligero.

Mi eterna gratitud a cada uno de ustedes incluidos quienes ya no están, por ser impulso, compañía y motivo en mi propósito de sacar adelante este proyecto y mi vida.

### **Dedicatoria Leidy Duarte**

A Dios, quien en medio de mis temores me recordó que no estaba sola, que me sostendría con su mano poderosa y que me daría fuerzas aun cuando sentía que no podía más. A Él dedico este logro, porque ha sido mi roca firme, mi luz en el camino y el motor que me impulsó a llegar hasta aquí.

A mi mamá, que con amor inagotable y sacrificio constante ha sido ejemplo de entrega y valentía. Gracias por enseñarme a luchar con fe y perseverancia, incluso en los momentos más difíciles.

A mis hermanas, mi alegría y compañía en cada paso. Gracias por creer en mí, por ser apoyo y refugio, y por recordarme que nunca camino sola.

A mis pastores, quienes como a una hija me ayudaron y apoyaron en este proceso. Gracias por sus oraciones, consejos y respaldo, que fueron fundamentales para darme fuerzas y avanzar hasta alcanzar esta meta.

Este triunfo es reflejo del amor, la fe y la unión que me han sostenido siempre.

### **Dedicatoria Laura Ortiz**

A Dios, fuente de fortaleza y luz, por darme la vida, la fe y la esperanza en cada paso de este camino.

A mi madre, ejemplo de amor incondicional y sacrificio, cuyo apoyo silencioso y constante ha sido mi mayor refugio.

A mi abuela, que aunque ya no está en este mundo, vive en mis recuerdos y en la fuerza que me inspira cada día.

A mi esposo y a mis hijos, motor incansable de mis sueños, quienes con su amor y paciencia me sostuvieron en los momentos de cansancio y me recordaron siempre por qué valía la pena continuar.

A mí misma, porque aprendí a creer, a resistir y a no rendirme, incluso cuando el camino parecía más difícil.

A mis compañeras, que se convirtieron en aliadas y amigas, tendiéndome su mano cuando las fuerzas flaqueaban y regalándome palabras de aliento que marcaron la diferencia.

Y, finalmente, a todas las personas que, de una u otra manera, contribuyeron con su tiempo, conocimiento y compañía a que este proyecto se hiciera realidad.

Este logro no es solo mío, sino de todos los que caminaron conmigo en este viaje.

## Resumen

Este trabajo tiene como objetivo desarrollar una propuesta para implementar la producción de un proyecto piloto de jengibre para un invernadero inteligente mediante la optimización de la logística, la producción y el monitoreo automatizado. La propuesta establece el diseño de estrategias para una gestión eficiente de los recursos y la implementación de tecnologías para el seguimiento en tiempo real de las condiciones de cultivo.

Los resultados muestran que la metodología permitió estructurar los procesos del invernadero, optimizar la distribución del espacio y mejorar el flujo de materiales. El diseño en 2D y 3D validó la planeación logística, mientras que la incorporación de sensores y microcontroladores como el ESP32 garantizó el control de variables ambientales y la automatización de riego, ventilación e iluminación, todo respaldado por un sistema fotovoltaico.

De esta manera, el trabajo demuestra la viabilidad de un modelo agrícola tecnificado y sostenible que integra logística, diseño y automatización. Aunque se mantiene en una fase conceptual, constituye una base sólida para futuras implementaciones que validen sus beneficios en ahorro de costos, eficiencia y sostenibilidad.

***Palabras clave:*** Invernadero, Automatización, Eficiencia, Diseño, Tecnologías.

## **Abstract**

This work aims to develop a proposal for implementing the production of a pilot ginger project in a smart greenhouse through the optimization of logistics, production, and automated monitoring. The proposal establishes the design of strategies for efficient resource management and the implementation of technologies for real-time monitoring of crop conditions.

The results show that the methodology made it possible to structure the greenhouse processes, optimize space distribution, and improve the flow of materials. The 2D and 3D design validated logistical planning, while the incorporation of sensors and microcontrollers such as the ESP32 ensured the control of environmental variables and the automation of irrigation, ventilation, and lighting, all supported by a photovoltaic system.

In this way, the work demonstrates the feasibility of a technified and sustainable agricultural model that integrates logistics, design, and automation. Although it remains at a conceptual stage, it provides a solid foundation for future implementations that validate its benefits in cost savings, efficiency, and sustainability.

***Keywords:*** Greenhouse, Automation, Efficiency, Design, Technologies.

## Tabla de contenido

Introducción.....	13
Justificación.....	14
Objetivos.....	17
Objetivos Generales.....	17
Objetivos Específicos .....	17
Descripción del problema .....	18
Planteamiento del problema .....	18
Antecedentes.....	20
Internacionales.....	20
Nacionales.....	21
Locales.....	22
Marco de referencia .....	25
Estado del arte.....	25
<i>Diagrama SIPOC</i> .....	25
<i>Método SLP - Systematic layout planning</i> .....	26
<i>Modelado 2D y 3D</i> .....	27
<i>Diagrama de flujo</i> .....	28
Marco teórico.....	29
<i>Planificación del almacenamiento para reducir desperdicios</i> .....	29
<i>Uso de sensores y controladores para optimizar la producción</i> .....	30
<i>Modelos de gestión logística aplicados a la agricultura</i> .....	30
Marco conceptual.....	31

<i>Invernadero inteligente</i> .....	31
<i>Automatización y control</i> .....	32
<i>Lean Manufacturing</i> .....	32
Marco normativo .....	32
<i>Ley 99 de 1993</i> .....	33
<i>Ley 1931 de 2018</i> .....	33
<i>Política Nacional de Cambio Climático (2017)</i> .....	33
<i>Norma ISO 14001:2015</i> .....	34
<i>Resolución 30021 de 2017</i> .....	34
<i>Decreto 3075 de 1997</i> .....	34
<i>Ley 1014 de 2006</i> .....	34
Metodología.....	35
Fase 1: Modelado del sistema agrícola con enfoque sistémico .....	35
Fase 2: Diseño físico y logístico del invernadero inteligente .....	36
Fase 3: Desarrollo e integración del sistema automatizado de monitoreo.....	36
Resultados.....	38
Modelado del sistema agrícola con enfoque sistémico.....	38
Diseño físico y logístico del invernadero inteligente .....	45
<i>Modelado invernadero 3D herramienta Floorplanner</i> .....	52
Desarrollo e integración del sistema automatizado de monitoreo .....	57
<i>Implementación del sistema fotovoltaico</i> .....	57
<i>Implementación y automatización del cultivo piloto</i> .....	65
Conclusiones.....	84

Recomendaciones .....	86
Referencias Bibliográficas .....	88

**Lista de tablas**

<b>Tabla 1</b> <i>Consumo Energético</i> .....	59
<b>Tabla 2</b> <i>Elección de Componentes Solares</i> .....	64
<b>Tabla 3</b> <i>Producción y Manejo Jengibre</i> .....	67
<b>Tabla 4</b> <i>Requerimientos del Jengibre</i> .....	68

## Lista de Figuras

<b>Figura 1</b> <i>Ahorro Acumulado Paneles Solares</i> .....	16
<b>Figura 2</b> <i>Diagrama SIPOC</i> .....	39
<b>Figura 3</b> <i>Tabla Relacional de Actividades</i> .....	46
<b>Figura 4</b> <i>Diagrama Relacional de Actividades</i> .....	47
<b>Figura 5</b> <i>Simbología ASME</i> .....	49
<b>Figura 6</b> <i>Diagrama de Recorrido</i> .....	50
<b>Figura 7</b> <i>Vista Superior del Diseño en 3D del Invernadero Inteligente</i> .....	52
<b>Figura 8</b> <i>Vista Suroeste del Diseño en 3D del Invernadero Inteligente</i> .....	53
<b>Figura 9</b> <i>Radiación Solar en Ibagué</i> .....	61
<b>Figura 10</b> <i>Esquema de Conexión ESP32 – DHT22</i> .....	69
<b>Figura 11</b> <i>Esquema de Conexión del Sistema de Ventilación Automatizado</i> .....	71
<b>Figura 12</b> <i>Diagrama de Flujo - Código Sistema de Ventilación</i> .....	75
<b>Figura 13</b> <i>Esquema de Conexión del Sistema de Riego Automatizado</i> .....	77
<b>Figura 14</b> <i>Diagrama de Flujo - Código Sistema de Riego</i> .....	80
<b>Figura 15</b> <i>Interfaz Blynk Valores Crudos y Porcentajes del Suelo.</i> .....	82

**Lista de ecuaciones**

<b>Ecuación 1</b> <i>Consumo Energético Estimado</i> .....	59
<b>Ecuación 2</b> <i>Horas Solares Pico</i> .....	61
<b>Ecuación 3</b> <i>Resultado Número De Paneles Requeridos</i> .....	62
<b>Ecuación 4</b> <i>Demanda Energética</i> .....	62

## Lista de Apéndices

<b>Apéndice A</b> <i>Invernadero Inteligente</i> .....	104
<b>Apéndice B</b> <i>Fase 3 – Conceptos</i> .....	105
<b>Apéndice C</b> <i>Blynk PC</i> .....	106
<b>Apéndice D</b> <i>Interfaz Blynk IoT Mobile</i> .....	107
<b>Apéndice E</b> <i>Código Ventilación Invernadero</i> .....	108
<b>Apéndice F</b> <i>Código Riego Invernadero</i> .....	109

## Introducción

La agricultura actual enfrenta el desafío de producir de manera eficiente y sostenible en un contexto donde los recursos son cada vez más limitados. En este escenario, la tecnología surge como un aliado clave para transformar las prácticas tradicionales y responder a las demandas de un mercado cada vez más competitivo. Con esta visión, el presente proyecto propone el diseño e implementación de un invernadero inteligente que funciona con energía solar y sistemas automatizados de monitoreo, capaces de regular variables críticas como la humedad, la temperatura, el riego y la ventilación.

Para validar su funcionamiento, se eligió el jengibre (*Zingiber officinale*) como cultivo piloto, ya que combina un alto potencial comercial con la necesidad de condiciones ambientales controladas. De esta forma, el proyecto no solo busca comprobar la eficacia del sistema automatizado, sino también demostrar la viabilidad de un modelo que integre energías limpias con tecnologías IoT en beneficio de pequeños y medianos productores rurales.

La estructura del documento guía al lector desde el marco teórico, pasando por la metodología aplicada, hasta llegar al desarrollo del prototipo y su validación práctica. Con ello, se sientan las bases para comprender cómo la innovación tecnológica puede convertirse en una herramienta estratégica para la sostenibilidad y la competitividad agrícola.

## Justificación

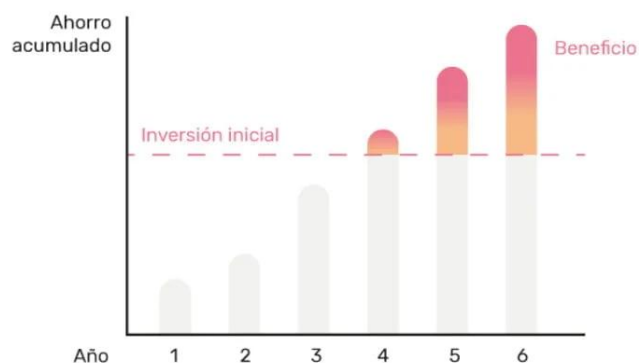
La implementación de un invernadero inteligente para la producción de hortalizas y legumbres busca optimizar los procesos agrícolas mediante la automatización y el uso eficiente de los recursos. Actualmente, la falta de un sistema estructurado de control y gestión puede afectar la estabilidad de los cultivos y generar desperdicios de insumos. Con una correcta planificación y la integración de tecnología, se espera mejorar la eficiencia del proceso productivo, reducir costos operativos y garantizar cosechas más regulares y de mejor calidad. Al contar con sistemas automatizados de riego, iluminación y monitoreo ambiental, se estima que se podrá reducir hasta un 30% el consumo de agua en comparación con métodos tradicionales, al aplicar la cantidad exacta necesaria para cada etapa del crecimiento de las plantas. Este porcentaje estimado se refuerza con información registrada en un estudio reciente, donde se comparó el consumo de agua entre un sistema de riego convencional y uno inteligente durante los años 2022 y 2023. En 2022, el sistema convencional tuvo un consumo de 86.250 litros, mientras que, en 2023, con la implementación del riego inteligente, el consumo disminuyó a 57.900 litros. Esto representa una reducción aproximada del 32,9 % en el uso del agua (Chamba et al., 2023). Este ahorro se debe al uso eficiente del recurso hídrico, ya que el sistema inteligente ajusta automáticamente la frecuencia y duración del riego según la humedad del suelo, gracias a la incorporación de sensores. Además, el número de días de riego semanales aumentó de 5 a 7, lo que indica que, a pesar del incremento en la frecuencia, el sistema optimizó el consumo de agua (Chamba et al., 2023).

Además, la estabilidad de las condiciones dentro del invernadero puede aumentar la tasa de crecimiento de los cultivos, permitiendo ciclos de producción más predecibles y consistentes. Esto significa una producción constante, con la posibilidad de realizar cosechas en intervalos

regulares, lo que facilitará la planificación de la distribución y el almacenamiento de los productos. Como lo señalan Chamba et al. (2023), “al tener un sistema automatizado, con monitoreos constantes sobre el agua, suelo y ambiente, este reduce costos y consumos, optimizando a su vez el crecimiento de plantas y rendimiento de cultivos”.

Desde la perspectiva logística, la organización del espacio dentro del invernadero será clave para maximizar la capacidad de producción. Se prevé la implementación de un sistema de distribución eficiente que optimice el aprovechamiento del área disponible, asegurando que cada metro cuadrado se utilice de manera estratégica para aumentar el rendimiento sin comprometer la calidad del cultivo. Además, el almacenamiento adecuado de insumos y productos cosechados permitirá minimizar pérdidas por deterioro, asegurando que los alimentos mantengan su frescura hasta su comercialización o consumo.

Otro aspecto fundamental es la integración de energía solar como fuente principal para la automatización del invernadero. Un informe técnico de POWEN (2022) destaca que “Se lograría un ahorro estimado del 40% al 60% cada año en la factura de la luz gracias a la instalación de paneles solares, esto ofrece una rentabilidad alta, ya que algunos paneles solares suelen tener una vida útil de 30 años”. Este informe también nos brinda un gráfico estadístico que se podrá visualizar en la figura 1.

**Figura 1***Ahorro Acumulado Paneles Solares*

Nota. tomado de POWEN (2022) <https://powen.es/instalaciones/sector-agroalimentario/invernaderos>

Cabe destacar que también garantizará la operatividad continua de los sistemas de control, incluso en zonas con acceso limitado a la red eléctrica. Esto permitirá que el invernadero mantenga sus funciones esenciales, como el monitoreo remoto y la automatización de procesos clave, sin interrupciones.

En términos generales, esta propuesta busca sentar las bases para un modelo de producción eficiente y sostenible, aprovechando la tecnología para optimizar los procesos agrícolas, reducir desperdicios y garantizar un mejor uso de los recursos disponibles. Con una gestión adecuada del espacio, la energía y los insumos, los invernaderos podrán operar de manera más eficiente, asegurando una producción continua y sostenible a mediano y largo plazo.

## **Objetivos**

### **Objetivos Generales**

Diseñar un sistema automatizado para la gestión eficiente de un invernadero inteligente para la gestión de almacenes y producción agrícola de hortalizas y legumbres en óptimas condiciones para el consumo humano ahorrando costos, esfuerzos y recursos.

### **Objetivos Específicos**

Modelar el sistema agrícola de hortalizas y legumbres aplicando un enfoque sistémico que permita identificar las entradas, actividades y salidas del proceso.

Diseñar el invernadero inteligente usando herramientas de diseño 3D para el análisis de la distribución de planta y flujo de materiales en los almacenes de materia prima, producción agrícola y almacén de producto terminado.

Desarrollar un sistema de monitoreo de datos en tiempo real para evaluar los indicadores y condiciones de producción agrícola en un invernadero inteligente, utilizando microcontroladores y sensores alimentados por energía solar.

## Descripción del Problema

### Planteamiento del Problema

El desarrollo de invernaderos inteligentes representa una oportunidad para mejorar la eficiencia y sostenibilidad en la producción agrícola. Un estudio de Tektelic (2024) destaca que: “Considerando que la población mundial crecerá a cifras cercanas a los 9.800 millones de personas para el año 2050, es prioritario desarrollar prácticas agrícolas sustentables que posibiliten la maximización de la producción minimizando el uso de recursos”. Sin embargo, muchos de estos espacios aún enfrentan limitaciones importantes que impiden el pleno aprovechamiento de sus capacidades tecnológicas y operativas.

Uno de los principales desafíos identificados en diversos invernaderos es la ausencia de un sistema de gestión automatizado que permita organizar de forma eficiente el almacenamiento de materias primas, producción de legumbres y hortalizas para ser almacenadas y posteriormente comercializadas. Sin un modelo de organización adecuado, pueden presentarse retrasos, desperdicio de recursos y costos innecesarios que afectan la viabilidad del proyecto. Esta problemática se evidencia también a nivel nacional. De acuerdo con el Departamento Nacional de Planeación (2016), “el sector agrícola colombiano, pese a su amplio potencial productivo, ha mostrado un crecimiento lento y enfrenta serias dificultades relacionadas con la pérdida de alimentos en distintas etapas de la cadena productiva”. En ese diagnóstico se estimó que, solo en el año 2010, se desperdiciaron aproximadamente 1.426.932 toneladas de frutas y verduras durante la fase de postcosecha, siendo las frutas las más afectadas, con un 32 % del total. Además, se reportó que, de una producción agrícola anual de 3,95 millones de toneladas, se pierden cerca de 2,9 millones, lo que representa un impacto considerable en términos económicos, sociales y ambientales. Estas pérdidas se generan, en gran medida, por deficiencias

en los procesos de recolección, almacenamiento, transporte y comercialización, especialmente entre pequeños productores, quienes también enfrentan barreras de acceso a insumos, financiación y formación técnica adecuada para gestionar eficientemente sus recursos”.

Aunque el invernadero disponga de sistemas automatizados para el control de riego, iluminación y monitoreo ambiental, si estos no están completamente integrados ni operativos. Esto limitaría aprovechar al máximo su potencial para mejorar la productividad y optimizar el uso de los recursos disponibles.

Ante este panorama, ¿Cómo se podría desarrollar un sistema automatizado para la gestión eficiente de un invernadero agrícola que garantice la producción de hortalizas y legumbres en óptimas condiciones para el consumo humano y ahorrando costos, esfuerzos y recursos?

## Antecedentes

Para comprender el estado actual del desarrollo tecnológico aplicado a la agricultura, resulta fundamental revisar diversas investigaciones que han aportado soluciones innovadoras en distintos contextos geográficos. Estos antecedentes se han organizado en tres niveles: internacional, nacional y local, con el fin de ofrecer una visión más completa sobre los avances en automatización, monitoreo y control ambiental en sistemas agrícolas. A continuación, se presentan algunos de los estudios más representativos en cada ámbito, los cuales evidencian el potencial de la tecnología para transformar los procesos productivos y promover una agricultura más eficiente y sostenible.

### Internacionales

Un caso interesante es el estudio desarrollado por Austria, A. C. H., Fabros, J. S., Sumilang, K. R. G., Bernardino, J., & Doctor, A. C. (2023), titulado “*Desarrollo de un sistema de invernadero inteligente basado en IoT para huertos hidropónicos*”, publicado en la Revista Internacional de Investigación en Ciencias de la Computación. Esta investigación implementa un sistema automatizado de monitoreo y control ambiental que utiliza sensores para medir pH, luz, temperatura y humedad, integrados mediante una plataforma IoT. El estudio destaca la efectividad y funcionalidad del sistema, además de proponer soluciones sostenibles frente a retos globales como el cambio climático y la escasez de tierra.

En el área de la agricultura de precisión, uno de los modelos mundiales que más abarca es el invernadero inteligente creado por el Tecnológico de Monterrey (México), el nacimiento del cual responde al rezago que tiene el campo de México en cuanto a los aspectos de la tecnología. Este modelo resalta por incluir el uso de energías renovables (solar y eólica), riego hidropónico tipo NFT, lógica difusa para el control de variables ambientales, y una estructura modular,

escalable y de bajo coste, además de crear sistemas automáticos para regular la temperatura, la humedad, el pH, la luz y la conductividad eléctrica, a través de plataformas como LabVIEW y CompactDAQ, con el fin de buscar no solo el aumento de la productividad, sino también el desarrollo de una agricultura sostenible, eficiente y socialmente responsable.

En última instancia este estudio realizado por Hernández Sánchez (2021), en su trabajo titulado “*Diseño e implementación de un invernadero inteligente a escala con dimensionamiento fotovoltaico para su posible sostenimiento eléctrico*”, desarrolla en México un prototipo automatizado ubicado en el laboratorio de energía solar de la Facultad de Ciencias de la Electrónica de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Este proyecto controla temperatura, humedad, iluminación y humedad del suelo para garantizar el crecimiento óptimo del rábano, demostrando cómo la agricultura protegida combinada con energías renovables crea microclimas ideales sin depender del clima externo. Además, propone un sistema fotovoltaico autónomo que aporta sostenibilidad energética, reduce costos y mejora la eficiencia agrícola, mostrando el potencial de la tecnología para responder a los retos del cambio climático y optimizar la producción de alimentos.

### **Nacionales**

Una de las fuentes más destacadas sobre innovación tecnológica en invernaderos en Colombia es la de Encisoc, E. (2018, junio 6). *Horticentro de Utadeo, el invernadero más moderno de Colombia. De la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano*. Este presenta un espacio de demostración e investigación orientado al fortalecimiento del sector agropecuario y floricultor del país. A través de esta implementación se evidencian tecnologías para el control automatizado del riego fertilizante, medición de temperatura y humedad, aumentando así hasta cinco veces la producción. Lo dicho anteriormente demuestra que la tecnología y una adecuada

gestión prolongan significativamente la vida útil de una planta mucho más tiempo de lo que hace un agricultor tradicional.

En el contexto de los avances tecnológicos en la agricultura, el proyecto Invernadero IoT, que fue desarrollado en Medellín por el semillero de investigación de la Universidad EAFIT, propone un modelo de automatización agrícola que se basa en el Internet de las Cosas (IoT) y sistemas embebidos. Este proyecto integra sensores, actuadores y microcontroladores para medir y controlar variables como la temperatura, la humedad, la iluminación y las condiciones del suelo, todo gestionado a través de plataformas digitales en tiempo real. Aunque la tecnología se encarga de tareas operativas, los estudiantes subrayan la relevancia del conocimiento del agricultor como un complemento esencial del sistema.

Complementariamente, el estudio de Barbosa Rodríguez (2020), en su investigación titulada *“Invernadero inteligente, la contribución para el mejoramiento de la calidad de vida en la Guajira Colombiana”*, plantea el uso de tecnologías sostenibles como la energía solar y la desalinización del agua de mar para impulsar invernaderos capaces de producir frutas, hortalizas y verduras en una región afectada por la desnutrición y la falta de recursos. Este estudio muestra cómo la integración de soluciones tecnológicas puede aprovechar recursos naturales ilimitados y transformar las condiciones de vida de comunidades vulnerables, al mismo tiempo que promueve el desarrollo agrícola y el acceso a alimentos, evidenciando el potencial de la innovación para generar un impacto social positivo.

## **Locales**

En el artículo *“Desarrollo de una plataforma de territorios inteligentes para la agricultura inteligente en el departamento del Tolima”*, publicado en la revista Innovagro, se presenta un proyecto de innovación tecnológica que está transformando el agro tolimense

mediante la implementación de soluciones IoT y comunicación LoRaWAN. Este desarrollo demuestra cómo es posible construir territorios inteligentes en zonas rurales del Tolima, superando limitaciones de conectividad y tecnificación. El proyecto contempla la instalación de gateways con capacidad de conectar hasta 3000 dispositivos en radios de hasta 15 km, lo cual es clave para las extensas zonas rurales del departamento. Además, se desarrolló una plataforma web con arquitectura de microservicios que permite la gestión eficiente de sensores, visualización georreferenciada y aplicaciones personalizadas. A esto se suma la fabricación de nodos electrónicos económicos y adaptables, esenciales para el monitoreo ambiental y el control de sistemas agrícolas. Dentro de los casos aplicados se destaca una pasera automatizada para el secado de café y un kit tecnológico para el manejo eficiente del agua, ambos orientados a mejorar la productividad y sostenibilidad de las actividades agrícolas.

Cabe resaltar que en la ciudad de Ibagué el desarrollo de proyectos tecnológicos en torno a la agricultura muestra un claro camino hacia la sostenibilidad local. En 2023, estudiantes de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Ibagué presentaron un diseño innovador de invernadero de 100 m<sup>2</sup>, que incorpora control automatizado de temperatura, humedad y un sistema semiautomático de riego por goteo (Soler Villanueva & Triana Calderón, 2023). Según este trabajo, el invernadero permite mantener las condiciones ambientales registradas temperatura y humedad en rangos óptimos para el cultivo y propagación de plantas en peligro de extinción, lo cual demuestra un impacto positivo en el fortalecimiento de la biodiversidad local y uso eficiente del recurso hídrico.

Como cierre de estos antecedentes, se encuentra el trabajo de Rubio y Rodríguez (2024), titulado “*Implementación de sistema de control ambiental en cultivo de champiñón París en el Cañón del Combeima*”, desarrollado en la ciudad de Ibagué, Colombia. Esta investigación

presenta una propuesta tecnológica enfocada en optimizar la producción del champiñón París mediante un sistema de control automatizado que regula variables esenciales como la temperatura, la humedad y el dióxido de carbono, factores determinantes para el crecimiento y la calidad del cultivo. El proyecto destaca por su enfoque en la aplicación de sistemas de control precisos y eficientes, lo que permite crear un ambiente ideal para el desarrollo del hongo y aumentar su productividad. Además, demuestra cómo la integración de la automatización en procesos agrícolas especializados puede mejorar la eficiencia, reducir pérdidas y contribuir al fortalecimiento del sector agroindustrial en contextos específicos como el del Cañón del Combeima.

El análisis de los antecedentes presentados evidencia cómo la integración de la tecnología en la agricultura ha permitido avances significativos en la automatización, el monitoreo y el control de variables ambientales, tanto a nivel internacional como nacional y local. Los diferentes estudios demuestran que el uso de herramientas como el Internet de las Cosas, la inteligencia artificial, las energías renovables y los sistemas fotovoltaicos ha optimizado la producción, mejorado la eficiencia en el uso de recursos y contribuido al desarrollo de sistemas agrícolas sostenibles. Además, se observa que estas soluciones no solo responden a desafíos globales como el cambio climático y la escasez de recursos, sino que también tienen un impacto social positivo al mejorar la calidad de vida de las comunidades. En conjunto, estos proyectos sientan las bases para el desarrollo de nuevas propuestas tecnológicas aplicadas a la agricultura, reafirmando que la innovación es un eje clave para enfrentar los retos actuales y futuros del sector agroindustrial.

## **Marco de Referencia**

### **Estado del Arte**

El estado del arte constituye un eje fundamental para comprender el contexto académico y práctico en el que se desarrolla este proyecto. A través de la revisión de metodologías, herramientas y experiencias previas, es posible identificar cómo distintas disciplinas han aportado soluciones efectivas a problemas de caracterización, organización, modelado y control de procesos productivos.

### ***Diagrama SIPOC***

El diagrama SIPOC (Suppliers (Proveedores), Inputs (Entradas), Process (Proceso), Outputs (Salidas) y Customers (Clientes)) se ha consolidado como una herramienta clave para la caracterización de procesos, debido a que permite tener una visión clara y simplificada de todos los elementos que intervienen en un sistema productivo. Según ICX Estrategia (2025), su utilidad radica en que facilita la identificación de entradas y salidas críticas, mejora la comunicación entre las partes interesadas, ayuda a detectar actividades que no generan valor y asegura la alineación de los objetivos del proceso. Esta versatilidad explica su creciente aplicación en distintos sectores, incluyendo la agricultura.

Un ejemplo de ello es el proyecto desarrollado por Andrade Cedeño y Cedeño Barrionuevo (2018), orientado al rediseño de las etapas de secado y limpieza en la producción de semilla de arroz para pequeños productores en Ecuador. En dicho trabajo, el SIPOC fue utilizado para delimitar proveedores, entradas, procesos, salidas y clientes, lo que permitió establecer con claridad el alcance del proceso y fundamentar la posterior planificación de mejoras.

### ***Método SLP - Systematic layout planning***

La Planificación Sistemática de la Disposición (SLP) es una metodología que organiza y optimiza el diseño de plantas de producción, almacenes o centros de distribución, con el fin de mejorar el flujo de materiales, reducir recorridos innecesarios y aprovechar mejor el espacio. A través del análisis de la situación actual se identifican problemas como cuellos de botella o desperdicios, y se proponen distribuciones más eficientes que también consideran la seguridad, la ergonomía y la posibilidad de crecimiento futuro. Sus principales beneficios son mayor productividad, reducción de costos, mejor calidad y operaciones más ordenadas y flexibles. (Schiller, 2025)

Gisselle, B. A., Castro, R., Gómez, Á. T., y García, Á. (2024), en su estudio “Área del Conocimiento de Agricultura” sobre la prefactibilidad de una planta de alimentos concentrados para pollos de engorde, muestran cómo la Planificación Sistemática de la Disposición (SLP) es una herramienta eficaz para organizar y optimizar la distribución de las áreas productivas. A través del uso del SLP y de diagramas de hilos, lograron reducir costos no productivos, mejorar el manejo de materiales y garantizar un flujo más eficiente en la planta, evidenciando que esta metodología puede aplicarse en distintos sectores, independientemente del producto final, siempre con el objetivo de mejorar la eficiencia operativa.

Además, el diagrama relacional de actividades y de recorrido se ha consolidado como una herramienta fundamental dentro del método SLP, ya que facilita la identificación de las relaciones de proximidad entre procesos y la optimización de los desplazamientos. Un ejemplo reciente es el estudio de Veloz Pereda, Vásquez Coronado y Arrascue Becerra (2020), desarrollado en la empresa Timones Hidráulicos Veloz en Trujillo, donde se aplicó esta metodología para proponer una redistribución de planta más eficiente. A través de los diagramas

relacionales y de recorrido, los autores lograron evidenciar recorridos innecesarios y plantear una disposición que mejorará la organización de las áreas de trabajo y aumentará la productividad de la empresa. Este estudio demostró que los diagramas relacionales y de recorrido permiten no solo visualizar la interdependencia entre procesos, sino también fundamentar decisiones de rediseño orientadas a optimizar el uso del espacio y mejorar la productividad global de la organización.

### ***Modelado 2D y 3D***

La animación en 2D y 3D no debe verse como rivales, sino como técnicas que se complementan y enriquecen mutuamente. Mientras la animación 2D se centra en lo bidimensional, ofreciendo un estilo más simple y narrativo que facilita la atención en la historia, la animación 3D aporta profundidad, realismo y la posibilidad de crear entornos más inmersivos. Ambas comparten procesos similares, como la creación de fotogramas clave y el uso de software especializado que automatiza parte del trabajo, lo que permite a los animadores combinar lo mejor de cada técnica según el objetivo del proyecto. Así, hoy en día es común encontrar producciones que mezclan elementos 2D y 3D para lograr resultados visuales más atractivos, versátiles y creativos en campos como el cine, los videojuegos, la publicidad y la educación. (Campus, 2024)

Ochoa-Arias y Delgado-Pinos (2020), en su estudio titulado “*Modelo de registro fotogramétrico 2D y 3D del patrimonio edificado de Cuenca*”, muestran cómo la aplicación de la fotogrametría permite representar edificaciones patrimoniales tanto en dos como en tres dimensiones, integrándose a un Sistema de Información Geográfica. En su investigación, los autores destacan que el uso de modelados 2D y 3D constituye una forma estándar de visualizar, validar y documentar propuestas antes de llevarlas a la práctica, lo cual asegura precisión, bajo costo y facilidad en la gestión. Este enfoque resulta totalmente aplicable a cualquier proyecto que

requiera evaluar su diseño antes de la construcción, pues ofrece una base sólida para la toma de decisiones y la optimización de recursos.

### ***Diagrama de flujo***

El diagrama de flujo es una herramienta fundamental para representar gráficamente los pasos esenciales de un proceso, permitiendo organizar las tareas en orden cronológico, identificar entradas y salidas en cada etapa, y detectar posibles cuellos de botella o redundancias que afectan la eficiencia del sistema. Como señalan los investigadores de University College London (UCL, 2021), su valor radica en la capacidad de simplificar procesos complejos, mostrar de manera clara las decisiones críticas y facilitar la comunicación entre los diferentes actores involucrados en un proyecto. Esta importancia se refleja en su aplicación práctica en múltiples sectores.

Un caso representativo fue desarrollado en la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD) por Quiroga Medina, Mora Perdomo y Cuéllar Medina (2018), titulado “*Sistema automatizado de riego, fertilización y fumigado para cultivo de habichuela bajo invernadero, monitoreado mediante aplicación móvil*”. En este estudio se emplearon diagramas de flujo para describir la interacción entre sensores, válvulas y actuadores del sistema automatizado, lo cual permitió validar la lógica de control antes de su implementación y asegurar un funcionamiento coherente del sistema. Los autores estructuraron detalladamente los procesos de riego, fertilización y fumigación, mostrando cómo cada variable era monitoreada y gestionada a través de un sistema móvil que centralizaba la información.

Este enfoque evidenció que el uso de diagramas de flujo no solo facilitó la comprensión del funcionamiento técnico, sino que también ayudó a anticipar fallos, mejorar la toma de decisiones y garantizar la eficiencia del sistema agrícola. De esta manera, el trabajo de la UNAD

resalta la utilidad de los diagramas de flujo como herramienta clave para integrar tecnología y procesos agrícolas, fortaleciendo la automatización y el control en entornos productivos.

Aunque ninguna de las investigaciones consultadas replica de manera exacta el alcance de este trabajo, los métodos descritos como el diagrama SIPOC, la planificación sistemática de la disposición (SLP), el modelado en 2D y 3D, y los diagramas de flujo se consolidan como referentes válidos que demuestran su aplicabilidad y utilidad en escenarios diversos. De este modo, esta recopilación permite no solo sustentar las decisiones metodológicas adoptadas, sino también visibilizar el valor de integrar conocimientos de ingeniería, diseño y automatización en el ámbito agrícola.

## **Marco Teórico**

### ***Planificación del Almacenamiento para Reducir Desperdicios***

El desperdicio de alimentos es un problema global con fuertes impactos ambientales, económicos y sociales. Según la FAO, cada año se desecha un tercio de los alimentos destinados al consumo humano, lo que contribuye al cambio climático y al uso ineficiente de recursos como el agua, la energía y la tierra. En el caso de las frutas y hortalizas, las pérdidas varían según el nivel de desarrollo de los países: en los de bajos ingresos, se deben principalmente a problemas en la producción y postcosecha, mientras que en los de ingresos medios y altos, ocurren en la comercialización y el consumo final. Según Giménez et Al. (2022) “A nivel de producción agrícola se estima que hasta 40% de frutas y vegetales se desperdician como resultado de esas exigencias estéticas”, lo que muestra cómo los estándares de calidad influyen en el problema.

El comercio minorista juega un papel clave, ya que hasta un 15% de frutas y hortalizas se descartan en esta etapa y hasta un 20% en el consumo final. En la Unión Europea, más de 50 millones de toneladas se desperdician anualmente porque no cumplen con criterios estéticos.

Uruguay no es ajeno a esta situación, con un 12% de desperdicio estimado, aunque aún falta información detallada sobre lo que ocurre en las últimas etapas de la cadena de suministro. Según Giménez et Al. (2022) “El valor económico y ambiental de los alimentos se acumula a lo largo de la cadena”. Evitar estas pérdidas es fundamental. En este contexto, el estudio analiza los factores que influyen en el desperdicio y presenta estrategias para reducirlo, basándose en una revisión de artículos publicados en la última década.

### ***Uso de sensores y Controladores para Optimizar la Producción***

La agricultura ha cambiado drásticamente en el siglo XXI debido al crecimiento poblacional y la necesidad de mejorar la producción sin afectar el medio ambiente. Sin avances tecnológicos, las prácticas actuales pueden no ser sostenibles, especialmente por la pérdida de fertilidad del suelo y la escasez de agua. La Revolución Verde impulsó la producción con fertilización y mecanización, pero ahora es necesario dar un paso más con tecnologías como la agricultura de precisión, que busca, según Guzmán Albores et al. (2024) “maximizar el potencial de los recursos naturales, humanos y mecánicos con una mínima perturbación del agroecosistema”.

Los sensores remotos y la teledetección han revolucionado el monitoreo agrícola al permitir la recopilación de datos en tiempo real sobre el estado de los cultivos y el suelo. Estas tecnologías utilizan imágenes satelitales, drones y sensores terrestres para evaluar factores como humedad, temperatura y contenido de nutrientes, lo que facilita la toma de decisiones y optimiza el uso de recursos. Gracias a esto, los agricultores pueden detectar problemas a tiempo, reducir desperdicios y mejorar la sostenibilidad de sus cultivos.

### ***Modelos de Gestión Logística Aplicados a la Agricultura***

Al principio, se pensaba que la gestión de la cadena de suministro y la gerencia de proyectos tenían pocas similitudes, pero un análisis detallado evidenció que "los aspectos en común son más evidentes de lo que parece" (Páez Ricardo, 2023). Elementos clave como la comunicación, la toma de decisiones conjuntas y la agregación de valor son fundamentales en ambas disciplinas. Esta investigación demuestra la relación estrecha entre estas áreas en el contexto de la cadena de suministro agroalimentaria, permitiendo diseñar un modelo que busca "la integración de los actores/stakeholders de una cadena de suministro de este tipo en la ciudad de Bogotá" (Páez Ricardo, 2023), con el objetivo de mejorar la eficiencia y fomentar el desarrollo de proyectos empresariales con valor agregado.

Para ello, se empleó una metodología exploratoria, descriptiva y correlacional, con un enfoque basado en gestión de proyectos y logística. Se identificó según Páez Ricardo (2023) "la implementación de buenas prácticas puede influir positivamente en el desarrollo y agregación de valor en la cadena de abastecimiento agroalimentario de la ciudad de Bogotá". Como resultado, se plantea que la articulación entre la gestión logística, las mejores prácticas y la gestión de proyectos es esencial para fortalecer procesos, productos y actividades dentro de la cadena. Mediante un análisis bibliográfico, se estudian experiencias previas en abastecimiento agroalimentario, proporcionando la base para un modelo de gestión logística que impulsa la sostenibilidad del sector.

## **Marco Conceptual**

### ***Invernadero Inteligente***

Un invernadero inteligente es una estructura automatizada que regula factores como temperatura, humedad, iluminación, riego y ventilación mediante sensores y sistemas de control. Esto permite mantener condiciones óptimas para el cultivo, optimizar el uso de recursos y reducir

costos de mano de obra. Además, su automatización ayuda a prevenir enfermedades, mejorar la producción y gestionar el invernadero de forma remota, con la posibilidad de registrar datos y recibir alertas en caso de fallos. (Novagric, 2024)

### ***Automatización y Control***

La automatización en agricultura ha transformado tareas del campo, reemplazando procesos manuales por tecnología que mejora la productividad, reduce costos y optimiza la gestión de cultivos. Herramientas como drones, satélites, inteligencia artificial y sensores permiten monitorear en tiempo real la salud de las plantas, controlar riegos y tomar decisiones precisas. Estas innovaciones han facilitado un mayor control sobre la producción, creando bases de datos para mejorar la calidad y eficiencia agrícola. Aunque existen desafíos, la automatización sigue evolucionando para hacer el sector más eficiente y sostenible. (Admin, 2019)

### ***Lean Manufacturing***

Lean Manufacturing es un enfoque de producción que busca reducir desperdicios y mejorar la eficiencia sin afectar la calidad. Se basa en eliminar actividades que no agregan valor, como tiempos de espera, sobreproducción o movimientos innecesarios. Su origen está en el sistema de producción de Toyota, y su aplicación ha demostrado ser efectiva en distintos sectores. Los principios clave incluyen la mejora continua (Kaizen), la producción ajustada a la demanda (pull system), la flexibilidad para adaptarse a cambios y la colaboración con proveedores para optimizar la cadena de suministro. Al enfocarse en la eficiencia y la calidad, Lean Manufacturing permite a las empresas mejorar su competitividad, reducir costos y responder de manera más ágil a las necesidades del mercado. (Andreu, 2024)

### **Marco Normativo**

El desarrollo e implementación de un invernadero inteligente en Colombia debe enmarcarse en la legislación ambiental, agrícola, tecnológica y logística vigente. A continuación, se presentan las principales bases legales que respaldan este tipo de iniciativas:

### **Normatividad Ambiental**

#### ***Ley 99 de 1993***

Esta ley establece la estructura del Sistema Nacional Ambiental (SINA) y define las políticas para la gestión ambiental en Colombia. Regula el uso de los recursos naturales, incluyendo el manejo del agua en actividades agrícolas (*Ley 99 De 1993 - Gestor Normativo*, n.d.). En el contexto del invernadero inteligente, esta norma promueve el uso eficiente del agua y la energía, elementos clave para una operación sostenible y automatizada.

#### ***Ley 1931 de 2018***

Define las directrices para la gestión del cambio climático en el país, incentivando la adopción de prácticas sostenibles y tecnologías limpias en sectores productivos como la agricultura. Su propósito es fortalecer la resiliencia climática y garantizar un uso responsable de los recursos naturales. (Función Pública, s. f.)

#### ***Política Nacional de Cambio Climático (2017)***

Esta política, emitida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, destaca la importancia de integrar tecnologías innovadoras en los procesos productivos como estrategia para mitigar impactos ambientales y aumentar la competitividad del sector agropecuario. (Minambiente, 2017).

***Norma ISO 14001:2015***

Establece lineamientos para implementar sistemas de gestión ambiental orientados a reducir los impactos negativos de las actividades operativas (ISOTools, 2025). Su aplicación en el invernadero inteligente permite garantizar eficiencia productiva con cumplimiento ambiental.

**Normatividad sobre Seguridad Alimentaria y Manejo de Insumos*****Resolución 30021 de 2017***

Establece los criterios de certificación de Buenas Prácticas Agrícolas para predios de producción primaria, incluyendo normas sobre el uso seguro y responsable de plaguicidas y bioinsumos, con el fin de proteger la calidad del producto, la salud humana y el medio ambiente. (ICA, 2017)

**Normatividad Logística y de Transporte*****Decreto 3075 de 1997***

Regula las condiciones sanitarias para la producción, procesamiento, transporte y comercialización de alimentos. En el contexto agroindustrial, este decreto garantiza la trazabilidad y conservación de la calidad durante la cadena logística (*Decreto 3075 De 1997 - Gestor Normativo, n.d.*).

**Normativa de Innovación Tecnológica*****Ley 1014 de 2006***

Fomenta el desarrollo de la cultura del emprendimiento y la innovación tecnológica. Apoya proyectos que integren tecnologías avanzadas para mejorar la productividad y competitividad, lo cual resulta clave para la implementación de sistemas automatizados en el invernadero inteligente. (Departamento Administrativo de la Función Pública, 2006).

## **Metodología**

Este proyecto se desarrolló bajo un enfoque mixto, combinando métodos cuantitativos y cualitativos para recopilar y analizar información de manera efectiva. Esta metodología estableció un proceso sistemático dividido en tres fases interrelacionadas. A través de este proceso, se buscó diseñar un sistema automatizado para un invernadero inteligente y garantizar su correcto funcionamiento.

### **Fase 1: Modelado del Sistema Agrícola con Enfoque Sistémico**

Esta primera fase comprendió el desarrollo del proceso productivo agrícola aplicando un enfoque sistémico, donde se determinó la cadena logística. Esta se complementó con la diagramación de procesos, en donde se pudo ver cada aspecto representado gráficamente. Esto permitió a las fases consecuentes tener un orden organizacional.

Se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos:

Se implementaron herramientas visuales que describieron la cadena logística del proceso productivo; que permitieron la comprensión de la información y del flujo de los recursos, detallando los elementos que componían este sistema, tales como entradas, actividades y salidas. Las entradas se identificaron como semillas, fertilizantes, mano de obra, entre otros; las actividades principales como siembra, riego, cosecha y almacenamiento, entre otras que se pudieron analizar. Por último, se tuvieron las salidas, en donde se determinaron los productos terminados, residuos y más.

Todo esto se realizó por medio de diagramas, tales como: SIPOC (Suppliers, Inputs, Process, Outputs, Customers) donde se visualizaron las relaciones de todos sus temas, permitiendo la identificación de oportunidades de mejora.

## **Fase 2: Diseño Físico y Logístico del Invernadero Inteligente**

A partir del análisis realizado en la fase anterior, se dio paso a esta segunda fase cuya finalidad fue el diseño físico y logístico del invernadero inteligente en 3D. Teniendo en cuenta el flujo de materiales, distribución de áreas, eficiencia en el uso del espacio y la incorporación de la tecnología. Se buscó lograr un entorno productivo que favorece la eficiencia, minimiza posibles pérdidas y facilitará la gestión automatizada en el cultivo.

Para asegurar que el diseño del invernadero fuera eficiente y adecuado a las necesidades productivas, se abordaron los siguientes elementos clave:

Inicialmente se realizó el proceso de división en zonas específicas de acuerdo con las actividades (Estudio de distribución de planta - método SLP (Systematic Layout Planning)), tales como: Almacén de insumos, área de cultivos, área técnica, almacenamiento PT (Producto terminado), empaque y selección, residuos y compostaje. Finalmente, se realizó un diagrama de recorrido para analizar el flujo de materiales en el invernadero. Se utilizaron herramientas de diseño 3D, como Flooplanner, la cual permitió representar de manera visual y detallada la distribución interna del invernadero. Además, se planificó la ubicación de los componentes tecnológicos como paneles solares, sensores y unidades de control, teniendo en cuenta el modelo sistémico del proyecto.

## **Fase 3: Desarrollo e Integración del Sistema Automatizado de Monitoreo**

Con la estructura física definida, esta última fase se centró en el diseño e integración de un sistema tecnológico que permitió el monitoreo y registro del proceso de los cultivos, tomando datos de variables ambientales y del suelo. Además, la implementación del sistema permitió el uso más eficiente y el ahorro de recursos como el agua mediante un sistema de riego inteligente,

así como la optimización del consumo de energía a través de paneles y controladores solares. Del mismo modo, la minimización de la dependencia del recurso humano.

El proceso inició con la selección de los componentes tecnológicos. Para lograr este sistema automatizado de monitorización se emplearon controladores como ESP32, DHT22 y un complemento de sensores que se distribuyeron por todo el invernadero según el diseño físico establecido en la fase anterior. Este sistema fue alimentado por energía solar; se emplearon paneles y controladores fotovoltaicos, los cuales no sólo suministraron energía a los componentes tecnológicos, sino que también abastecieron las necesidades energéticas del invernadero. Este sistema solar se optimizó por medio de herramientas como el LM2596 que reguló el voltaje que distribuyeron el panel y el controlador.

Una vez claras las herramientas tecnológicas a emplear, se realizaron las conexiones requeridas y por consiguiente su programación, esta se hizo por medio de la plataforma Arduino IDE, que permitió encontrar errores antes de subir cada código a los microcontroladores. En este último paso fue donde también se programó el aplicativo que permite leer los datos en tiempo real (como la temperatura y humedad).

## Resultados

### Modelado del Sistema Agrícola con Enfoque Sistémico

Dado que el funcionamiento de un invernadero inteligente implica la integración de diversos procesos físicos, técnicos y logísticos, en la Fase 1 del proyecto se aplicó un enfoque sistémico mediante la herramienta SIPOC (Proveedores, Entradas, Proceso, Salidas y Clientes), reconocida por su utilidad para representar de forma estructurada procesos complejos. Esta herramienta permitió identificar y organizar de manera clara los elementos clave del sistema productivo, desde los recursos que ingresan al invernadero hasta los resultados esperados tanto a nivel productivo como social.

Dado esto según González (2021), en su revista sobre la aplicación de la herramienta en la cadena logística nos infiere que “el diagrama SIPOC, que permite identificar los subprocesos y actividades que agregan y no agregan valor específicamente en las salidas cuello de botella, establecer propuestas de mejora con la fusión de estrategias, tácticas que se adapten a las necesidades del proceso, mejoren y se controlen los desperdicios en la cadena de suministro interna”.

La figura 2 presenta el diagrama SIPOC elaborado, compuesto por 10 subprocesos que inician con la recepción de insumos y culminan en disposición de residuos, facilitando una visión integral del sistema agrícola tecnificado y proporcionando una base sólida para las fases posteriores del proyecto.

Figura 2

## Diagrama SIPOC



*Nota.* Elaboración propia, el diagrama muestra la secuencia de actividades del invernadero inteligente

Dentro del diagrama SIPOC aplicado al sistema de producción, los proveedores resultan fundamentales para garantizar la sostenibilidad, la continuidad operativa y la productividad del cultivo. Contar con insumos de calidad desde el inicio, como semillas certificadas y sustratos adecuados, permite establecer cultivos más homogéneos, saludables y con mayor potencial productivo, aspectos clave en modelos agrícolas modernos (Agrosavia, 2020). De igual manera, las empresas proveedoras de insumos agroquímicos desempeñan un rol crucial al abastecer fertilizantes, plaguicidas y otros productos que contribuyen al control sanitario de los cultivos; su correcta aplicación incide directamente en la mejora del rendimiento agrícola y en la seguridad alimentaria, como afirma Torres (2018). Asimismo, los proveedores de tecnología, especialmente de sensores y controladores, cumplen una función estratégica al facilitar la medición y el control

automatizado de variables como la temperatura y la humedad, optimizando así el uso de recursos y mejorando las condiciones de crecimiento. En este sentido, Agricolus (2025) destaca que los sensores permiten recopilar datos precisos sobre el estado del cultivo, como la humedad foliar y del aire, posibilitando una gestión más eficiente del riego, reduciendo pérdidas y favoreciendo el ahorro energético. Aunque la automatización ha avanzado considerablemente, la mano de obra sigue siendo indispensable para labores operativas, de cosecha y supervisión técnica, lo cual representa una fuente de empleo estable y un aporte al desarrollo de las comunidades rurales. Finalmente, el soporte técnico especializado garantiza el mantenimiento adecuado de los sistemas automatizados, previene fallos y asegura la continuidad del proceso productivo. En conjunto, estos actores no solo proveen los recursos y servicios esenciales, sino que se consolidan como aliados estratégicos para impulsar la innovación, la sostenibilidad y la rentabilidad del invernadero (SAC, 2025).

También en un sistema agrícola juega un papel fundamental las entradas que serían todos aquellos recursos que necesitamos para que la producción sea eficiente y sostenible. Esto incluye materiales, mano de obra, tecnologías e información. No solo son los recursos que hacen que el proceso comience, sino que también afectan cómo se desarrolla todo, la calidad de los productos y si el sistema puede mantenerse a largo plazo. Por ejemplo, en un invernadero inteligente, las entradas iniciales incluyen semillas, que deberían estar certificadas para asegurar mejor rendimiento y resistencia a plagas, según lo indica el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA, 2024). También se usan fertilizantes aplicados con técnicas inteligentes, sensores que miden humedad y temperatura, y datos del clima, todo con el fin de hacer que el proceso sea más eficiente y tomar decisiones en tiempo real. Estas entradas no solo mantienen en marcha el invernadero, sino que también ayudan a que sea más sostenible en lo ambiental, social y

económico. Según el artículo “La Logística en la Agricultura”, los insumos clave para producir incluyen semillas, fertilizantes, fungicidas, insecticidas, herbicidas y herramientas de trabajo; si falta alguno, puede afectar desde la producción hasta si el cultivo puede seguir adelante o no. Según Insagrín, (2021), la preparación del terreno es esencial para garantizar condiciones óptimas de aireación, drenaje y estructura del suelo, permitiendo un desarrollo radicular eficiente. Esta fuente también destaca la importancia de optimizar el espacio en el invernadero para mejorar la circulación del aire, el acceso a la luz y el manejo de recursos como el riego y la fertilización.

Por su parte, la Universidad de los Andes (2016) resalta que la siembra requiere variables clave como la profundidad y el espaciamiento, lo que asegura una plantación homogénea. En cuanto al riego, Rieggo (2022) explica que los sistemas inteligentes dosifican el agua de acuerdo con las necesidades específicas de cada planta, reduciendo desperdicios y mejorando el rendimiento. Esta eficiencia se complementa con el fertirriego, una técnica que, según Intagri (2021), permite distribuir nutrientes de forma precisa a través del sistema de riego, aumentando la productividad y minimizando la contaminación.

Insagrín, (2021) también señala que la fumigación mejora la sanidad vegetal al aplicar productos fitosanitarios con mayor exactitud, evitando excesos y reduciendo el uso de químicos. Además, el monitoreo constante del cultivo, mediante sensores ambientales, permite registrar datos como humedad, temperatura y desarrollo de la planta, lo cual facilita una gestión preventiva y en tiempo real. La Universidad de los Andes (2016) indica que, gracias al monitoreo del cultivo durante todo el proceso, la cosecha se realiza en el momento óptimo, garantizando la calidad y frescura del producto. A su vez, Insagrín, (2021) enfatiza que el almacenamiento debe llevarse a cabo en condiciones controladas para conservar la calidad postcosecha, asegurando una mayor durabilidad del producto final.

Por último, el blog “6 consejos para mejorar tus cultivos en invernaderos” de Jacto Netx (2024) resalta que la automatización también impacta favorablemente la postcosecha, mejorando los procesos de clasificación, empaque y gestión de residuos. Este mismo recurso sugiere prácticas como el compostaje para transformar los desechos agrícolas en insumos útiles, fomentando así una economía circular dentro del sistema productivo.

En conjunto, estos procesos automatizados no solo optimizan la producción, sino que también promueven una agricultura más eficiente, sostenible y tecnificada.

Por otro lado, dentro de las salidas del sistema se encuentran los resultados generados a lo largo de todo el proceso agrícola, tanto a nivel físico como en términos de rendimiento. Estas salidas comprenden el cultivo recolectado, reportes técnicos, residuos orgánicos, información útil para la toma de decisiones, ahorro de recursos, automatización del riego y reducción de costos.

En primer lugar, se obtiene la cosecha como resultado tangible del proceso productivo, el cual fue automatizado en su mayoría. Esto permitió una optimización significativa en el uso de los recursos, reduciendo la intervención manual del agricultor. Esta disminución de la mano de obra se traduce en una reducción directa de costos operativos, al mismo tiempo que se disminuye el uso de energía convencional gracias a la incorporación de tecnologías sostenibles.

Según un artículo de Santander (2023), los invernaderos inteligentes ofrecen ventajas como una mayor capacidad de reacción, ya que el agricultor puede conocer en tiempo real el estado de los cultivos y tomar decisiones basadas en datos concretos. Además, se destaca el ahorro de recursos al evitar la repetición de tareas y reducir la intervención humana, lo que incrementa la rentabilidad del sistema, ya sea en el consumo energético o en otros insumos agrícolas.

Asimismo, la implementación de sistemas automatizados de riego y control climático permite una gestión más eficiente del agua, la humedad y la temperatura dentro del invernadero.

Estas condiciones ambientales controladas no solo favorecen el crecimiento óptimo de los cultivos, sino que también proporcionan información clave para la toma de decisiones estratégicas.

Finalmente, encontramos a los clientes, es decir, a quienes se benefician directamente del proceso productivo. En este grupo se incluyen los consumidores finales de los productos agrícolas, los supervisores del proyecto y, en general, todo el sector agropecuario.

La implementación de tecnología en el invernadero inteligente aporta beneficios significativos a cada uno de estos actores. Gracias a un modelo automatizado y sostenible, se genera un proceso más rentable, eficiente y competitivo en el mercado. Esto se traduce en una mayor calidad de los productos, reducción de costos operativos y mejoras en la eficiencia de las operaciones agrícolas, como se ha detallado en los anteriores componentes del diagrama SIPOC. De acuerdo con una investigación realizada por Intellect (2024), los sistemas implementados en un invernadero inteligente como el monitoreo del suelo, el control climático y el riego automatizado, permiten gestionar todo el proceso de forma más precisa. La misma investigación destaca el crecimiento en la demanda de este tipo de agricultura, impulsada por la necesidad de soluciones sostenibles que maximicen la producción, mejoren la calidad de los alimentos y reduzcan el impacto ambiental.

En comparación con la agricultura tradicional, estas prácticas tecnológicas no solo hacen más eficiente el sistema productivo, sino que también ofrecen alimentos más frescos y nutritivos, mientras se promueven métodos de cultivo responsables y sostenibles.

Este análisis no solo permitió visualizar el flujo de recursos y decisiones, sino también identificar cómo la calidad de las entradas, el soporte tecnológico y la participación humana se articulan para garantizar un proceso continuo y rentable.

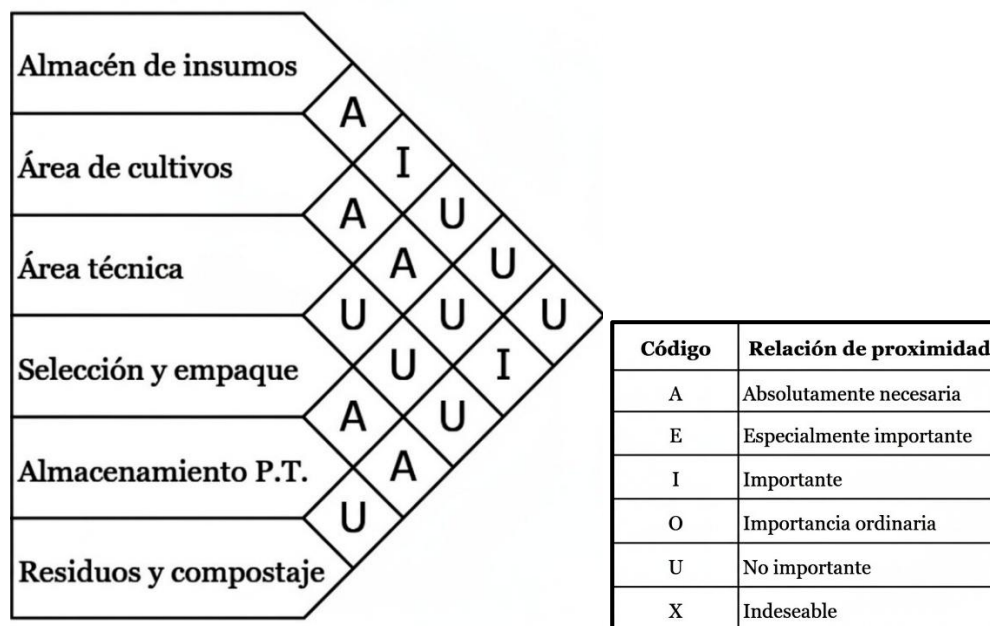
Además, se evidenció que los resultados de este sistema no se limitan a la obtención del cultivo como producto final, sino que incluyen beneficios técnicos, económicos y ambientales, como la reducción del consumo energético, el mejor uso del agua, la disminución de residuos y la generación de información útil para la toma de decisiones. Estos resultados refuerzan la necesidad de adoptar modelos de producción inteligentes que respondan a las demandas actuales del sector agropecuario. En conjunto, el SIPOC no solo sirvió como herramienta de diagnóstico y organización, sino como punto de partida para plantear mejoras e innovaciones que fortalezcan la sostenibilidad y competitividad del sistema agrícola.

## **Diseño físico y Logístico del Invernadero Inteligente**

En esta etapa se llevó a cabo la consolidación del diseño del sistema, transformando el análisis previo en un diseño físico y logístico que integra tecnología, eficiencia espacial y flujo operativo optimizado. Se determinaron las áreas funcionales, se estableció el recorrido de materiales y se incluyeron los componentes tecnológicos, con la finalidad de lograr una distribución equilibrada que favorezca la productividad y disminuya tiempos muertos.

A partir de la aplicación del método SLP, se obtuvieron diagramas de relación entre zonas, recorridos y una representación tridimensional que expone cómo se interconectan las operaciones dentro del invernadero. Según Muther (1970), infiere que “La distribución en planta implica la ordenación física de los elementos industriales. Esta ordenación, ya practicada o en proyecto, incluye los espacios necesarios para el movimiento del material, almacenamiento, trabajadores indirectos y todas las otras actividades o servicios”. En este caso, este diseño no solo responde a criterios de orden y funcionalidad, sino que sienta las bases para una gestión automatizada y sostenible, alineada con los objetivos del proyecto.

A continuación, se observa el desarrollo de la aplicación método SLP para distribución de planta del sistema agrícola:

**Figura 3***Tabla Relacional de Actividades*

*Nota.* Elaboración propia. La tabla representa la secuencia operativa del invernadero inteligente.

La tabla relacional de actividades es una herramienta importante dentro del método SLP (Systematic Layout Planning), que permitió identificar y analizar la relación entre las distintas áreas del invernadero. Este se enfoca en detallar qué tan necesarias son las relaciones de cercanía entre áreas funcionales con el fin de garantizar un flujo lógico y eficiente de materiales, personas y procesos dentro del sistema. La tabla relacional consiste en “un diagrama de doble entrada, en el que quedan plasmadas las necesidades de proximidad entre cada actividad y las restantes según los factores de proximidad definidos a tal efecto” (Muther, 1981).

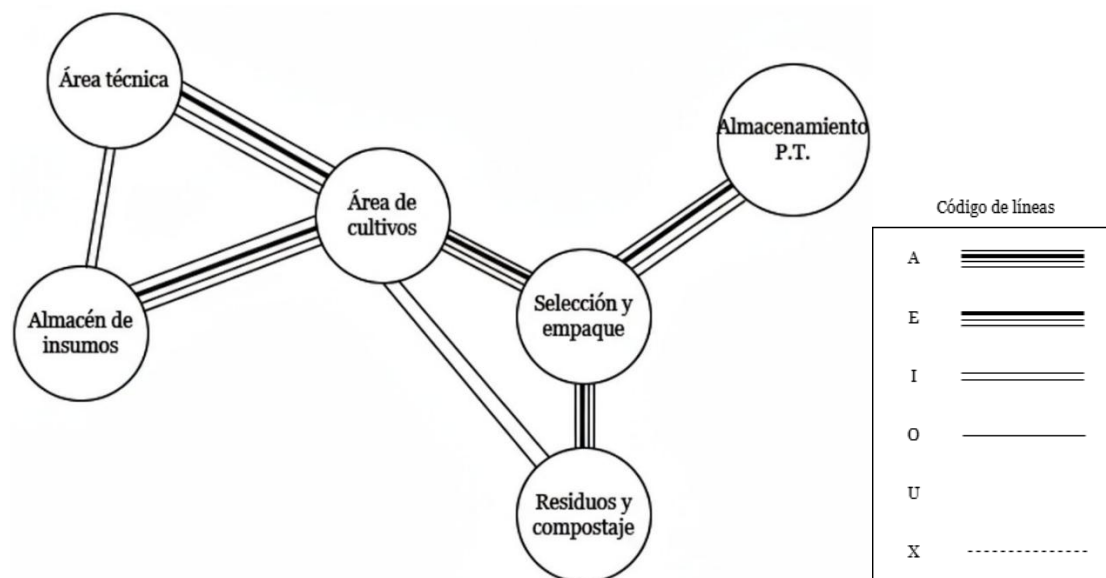
En la aplicación de esta herramienta se emplearon códigos simbólicos “A”, “E”, “I”, “O” y “U” para clasificar la prioridad de proximidad entre las actividades. Se asignó la letra “A” a aquellas áreas que requieren una proximidad inmediata debido al flujo constante de materiales.

La “I” indica una importancia moderada de cercanía, con intercambios ocasionales. En contraste, aquellas relaciones con baja frecuencia de interacción o con procesos que no dependen directamente entre sí fueron clasificadas como “O” o “U”, lo que indica que no requieren cercanía inmediata dentro del diseño espacial.

Este análisis nos permitió tomar decisiones estratégicas sobre cómo ubicar cada zona del invernadero, priorizando aquellas que requerían una conexión directa y reduciendo así los tiempos de desplazamiento, los cruces innecesarios y los desperdicios operativos. Gracias al diagrama relacional, se logró construir una distribución funcional que no solo mejora la eficiencia del proceso productivo, sino que también contribuye al orden, al aprovechamiento del espacio y a la sostenibilidad del sistema agrícola.

#### Figura 4

*Diagrama Relacional de Actividades*



*Nota.* Elaboración propia. Diagrama relacional de actividades del invernadero inteligente basado en el método SLP.

El diagrama relacional de actividades representa la conexión funcional entre las diferentes áreas del invernadero inteligente, utilizando líneas para señalar la necesidad de proximidad según el método Systematic Layout Planning (SLP). Las relaciones se clasifican por letras: “A” indica una necesidad absoluta de cercanía y se representa con cuatro líneas, una de ellas gruesa; “E” expresa una necesidad especialmente importante y lleva tres líneas, una también más gruesa; “I” refleja una relación importante pero no crítica, mostrada con dos líneas delgadas; “O” indica una relación ordinaria, marcada por una sola línea delgada; y “U” representa una relación innecesaria, por lo que no se grafica en el diagrama. Estas clasificaciones permiten identificar qué áreas deben estar más próximas entre sí para garantizar el funcionamiento eficiente del sistema. Para sustentar lo anterior, Muther (1981) infiere que “El diagrama es un gráfico en el que las actividades son determinadas por núcleos unidos por líneas. Estas representan la intensidad de la relación (“A”, “E”, “I”, “O”, “U”, “X”) entre actividades unidas a partir del código de líneas planteado”.

En el análisis del diagrama, se observa que el área de cultivos es el núcleo central del invernadero, con relaciones funcionales con todas las demás zonas. Su conexión con el almacén de insumos y el área técnica es de tipo “A”, ya que los insumos deben ser trasladados con frecuencia y los sensores requieren estar cerca para un monitoreo constante. Con el área de empaque y selección se identifica una relación “E”, pues, aunque no es tan crítica como la anterior, sí requiere cercanía para evitar pérdidas de calidad en los productos cosechados. La relación con el área de residuos y compostaje se clasifica como “I”, lo que indica que, aunque el contacto no es permanente, es importante para el traslado de residuos orgánicos.

En cuanto al resto de interacciones, por ejemplo, entre el área de empaque y el almacenamiento de productos terminados, la relación es “E”, debido a la necesidad de mantener una conexión fluida después del empaque. La relación entre el empaque y la zona de residuos se



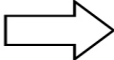


considera “O”, ya que solo en ocasiones es necesario enviar descartes al compostaje. A diferencia de estas zonas, donde se mantiene cierta cercanía, otras relaciones han sido clasificadas como “O” o incluso “U”, al no requerir contacto directo frecuente, lo cual permite mayor flexibilidad en su ubicación. Esta distribución estratégica favorece un flujo eficiente, optimiza los tiempos y garantiza un mejor aprovechamiento del espacio en el invernadero.

Como parte del desarrollo del diseño de distribución para el invernadero inteligente, se llevó a cabo un diagrama de recorrido sobre un plano realizado en el software floorplanner, siguiendo la metodología de la Planeación Sistemática de Instalaciones (SLP) y haciendo uso de la simbología estándar de ASME para representar visualmente las actividades del proceso productivo, tal como se muestra en la figura 5.

## Figura 5

### *Simbología ASME*

#### SIMBOLOGIA SEGÚN LA NORMA ASME – ISO 9000

Actividad	Símbolo	Descripción
Operación		▪ Indica las principales fases del proceso, método o procedimiento.
Inspección		▪ Indica que se verifica la calidad y/o cantidad de algo.
Transporte		▪ Indica desplazamiento o movimiento de empleados, material y equipo de un lugar a otro.
Espera		▪ Indica demora en el desarrollo de los hechos.
Almacenamiento		▪ Indica el depósito de un documento o información dentro de un archivo, o de un objeto cualquiera dentro de un almacén.

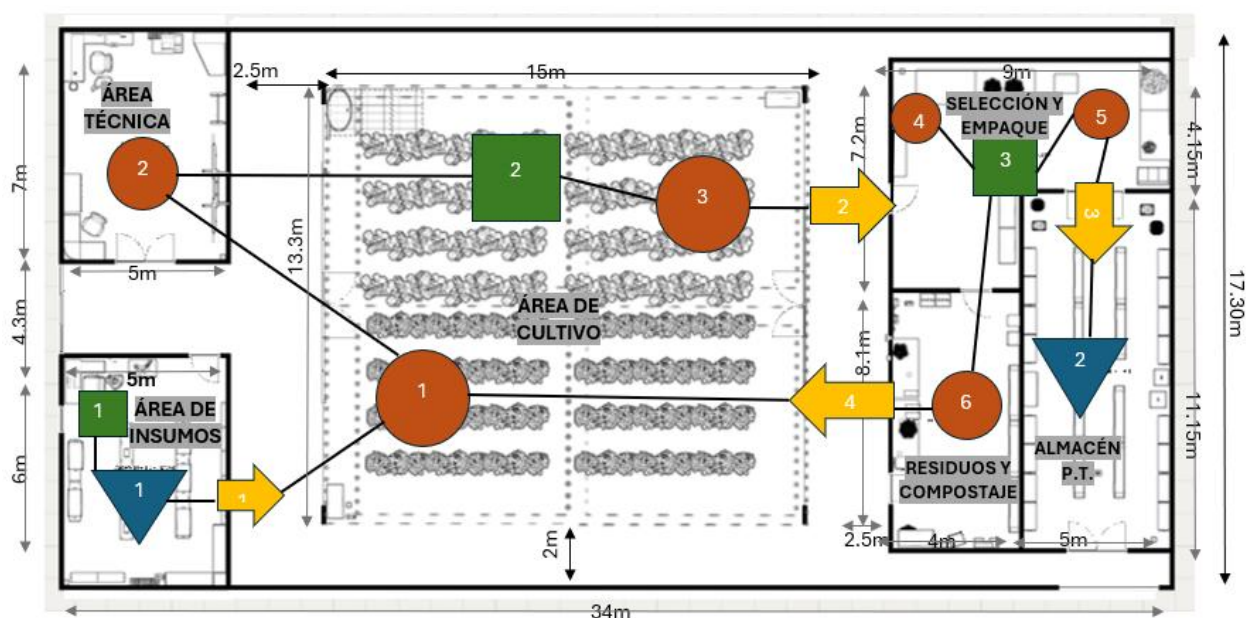
*Nota.* Escuela de Producción y Transformación – EPT. (s.f.). Simbología de los diagramas de recorrido según la norma ASME.

<https://ept.pe/index.php/component/sppagebuilder/?view=page&id=90>

Este diagrama de recorrido fue elaborado a partir de un análisis logístico y secuencial de las operaciones que componen el flujo operativo del sistema, partiendo de la llegada de materias primas hasta el almacenamiento del producto terminado, además, incluyendo un retorno que se genera desde la etapa de selección y empaque, donde se realiza la devolución de sustancias orgánicas que regresan al cultivo, tal como se muestra en la figura 6.

**Figura 6**

*Diagrama de Recorrido*



*Nota.* Elaboración propia. Diagrama relacional de actividades del invernadero inteligente basado en el método SLP.

A continuación, se describe el proceso considerado y cómo fue plasmado gráficamente:

El recorrido operativo inicia con la recepción e inspección de insumos y materias primas, donde se verifica su estado y calidad (representado por el símbolo de inspección) antes del almacenamiento. Luego, los insumos son agrupados en el área de almacenamiento y, son transportados al área de cultivo. Allí se desarrollan actividades clave como el alistamiento del

terreno, aplicación de abonos provenientes del sistema de compostaje y la siembra, todas identificadas como operaciones. En paralelo, se realiza un monitoreo constante desde el área técnica, supervisando variables como riego, temperatura y funcionamiento de sensores automatizados, después de este proceso se inspecciona su funcionalidad y veracidad aplicados al cultivo. Completado el ciclo productivo, se lleva a cabo la cosecha y recolección del cultivo, marcando el paso al procesamiento postcosecha.

Posteriormente, los productos son transportados al área de selección y empaque, donde se clasifican según su estado y se someten a una inspección de calidad que define dos rutas: en la primera, los productos no aptos se envían al área de residuos para ser transformados en compostaje, retornando luego al cultivo y cerrando un ciclo interno de aprovechamiento siendo esto un beneficio para el medio ambiente. Como lo resalta Jaramillo y Zapata (2008) en su monografía “el compostaje es una estrategia de poco presupuesto, garantiza que los residuos orgánicos vinculen sus componentes en el ciclo de la cadena de producción inicial, además permite mejorar condiciones fisicoquímicas del suelo y aumenta la productividad de los cultivos”. En la segunda ruta, los productos que cumplen con los estándares de calidad pasan al empaque y son trasladados al área de almacenamiento de producto terminado. El flujo culmina con el almacenamiento final, donde los productos quedan listos para su distribución.

Este diagrama de recorrido, plasmado sobre el plano físico del invernadero, permite visualizar el flujo real del proceso, identificar cuellos de botella y tomar decisiones estratégicas para mejorar la eficiencia operativa. La simbología ASME utilizada brinda claridad técnica y facilita la interpretación del sistema productivo.

Se realizó un modelado tridimensional (3D) del invernadero inteligente utilizando el software Floorplanner, la misma herramienta con la que previamente se elaboraron los planos

bidimensionales (2D). Este diseño surge como resultado de la aplicación del método SLP, tomando como base la tabla y el diagrama relacional, los cuales definieron el grado de cercanía y conexión funcional entre las distintas áreas del sistema agrícola. Gracias a ello, fue posible transformar la información analítica en una representación física y visual, logrando un diseño alineado con los principios de eficiencia, flujo operativo y aprovechamiento del espacio.

### ***Modelado Invernadero 3D Herramienta Floorplanner***

#### **Figura 7**

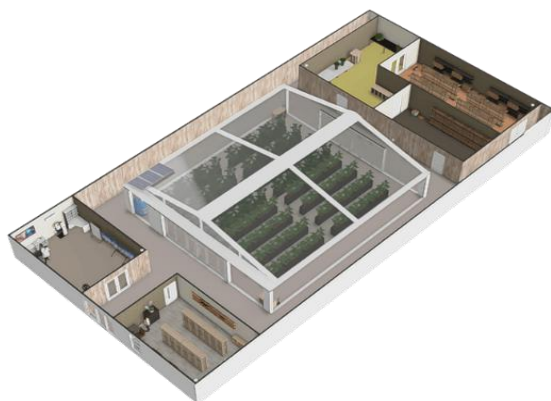
*Vista Superior del Diseño en 3D del Invernadero Inteligente*



*Nota.* Elaboración propia. Modelado en Floorplanner.

## Figura 8

*Vista Suroeste del Diseño en 3D del Invernadero Inteligente*



*Nota.* Elaboración propia. Modelado en Floorplanner.

En el siguiente video se presenta el modelado 3D del invernadero inteligente, con elaboración propia como parte del proceso de diseño del sistema agrícola: [Invernadero Inteligente](#) (Duarte, 2025)

En las figuras 7, 8 y en el video mencionado se aprecia la distribución general del invernadero, desarrollada sobre un terreno de 34 metros de largo por 17,30 metros de ancho (588,20 m<sup>2</sup>). Este modelo respeta las proporciones espaciales y las relaciones lógicas derivadas del diagrama de recorridos, integrando divisiones estratégicas para cada área funcional. Cabe mencionar que las medidas establecidas para el dimensionamiento de la planta total se realizaron de manera libre. El diseño tridimensional no solo permitió visualizar de forma realista los espacios, sino también validar la coherencia entre los recorridos de materiales, los procesos productivos y la ubicación de los componentes tecnológicos, garantizando un flujo eficiente de las operaciones.

Dentro de esta superficie se destinó un espacio aproximado de 200 m<sup>2</sup> para el área de cultivo, configurado en un módulo rectangular que asegura una proporción equilibrada entre largo y ancho. Esta decisión se fundamenta en referentes nacionales, como el Horticentro de la Universidad Jorge Tadeo Lozano en Bogotá, que cuenta con un invernadero de características similares y es considerado uno de los más modernos del país, diseñado bajo criterios técnicos y de buenas prácticas de producción (Encisoc, 2018).

A continuación, se describen las áreas diseñadas:

**Área de Insumos.** Ubicada en la parte inferior izquierda, cumple la función de recepción y almacenamiento de todos los recursos necesarios para el proceso productivo, tales como fertilizantes, semillas certificadas, herramientas agrícolas y otros insumos logísticos. La cercanía de esta zona con el área de cultivo permite agilizar el suministro de materiales y reducir tiempos de desplazamiento, asegurando que los insumos estén disponibles en el momento y lugar requeridos.

**Área Técnica,** Localizada en la parte superior izquierda, constituye el centro de control tecnológico del invernadero. En este espacio se encuentran instalados los controladores solares, circuitos electrónicos, unidades de comunicación y dispositivos de supervisión del sistema automatizado. Desde aquí se reciben los datos generados por los sensores de humedad del suelo y temperatura ambiental, procesándose en tiempo real para garantizar un monitoreo constante. Esta área también sirve como punto de diagnóstico y ajuste de los sistemas electrónicos, contribuyendo a una gestión agrícola basada en datos y a la rápida reacción ante posibles fallos.

**Área de Cultivo,** Situada en la zona central y siendo el núcleo principal del invernadero, fue diseñada para maximizar la producción de legumbres y hortalizas. Cuenta con 20 camillas de cultivo dispuestas linealmente, separadas por un metro de distancia para facilitar el tránsito del

personal durante labores de fumigación, siembra y cosecha. Se implementó un sistema de riego automatizado controlado por sensores de humedad, los cuales activan el suministro de agua únicamente cuando el suelo lo requiere. Este mecanismo permite un uso racional del recurso hídrico, manteniendo condiciones de humedad óptimas para un desarrollo vegetal saludable.

**Área de Selección y Empaque.** Ubicada en la parte superior derecha, destinada a la inspección postcosecha, clasificación y preparación del producto para su comercialización. Aquí se verifica el estado de cada unidad recolectada, separando aquellos productos que cumplen con los estándares de calidad y destinando los no aptos al área de compostaje. El diseño de esta zona facilita el flujo continuo desde la recolección hasta el almacenamiento final, evitando cuellos de botella durante la operación.

**Área de Compostaje.** Estratégicamente posicionada para recibir los residuos orgánicos provenientes de la zona de cultivo y del área de selección y empaque. En este espacio se procesa el material descartado mediante la técnica de compostaje, generando abono orgánico reutilizable en los cultivos. Su ubicación próxima al área de cultivo permite un retorno eficiente de los nutrientes al proceso productivo, cerrando el ciclo interno de aprovechamiento y fortaleciendo la sostenibilidad del sistema agrícola.

**Área de Almacenamiento de Producto Terminado.** Localizada en la parte inferior derecha, fue diseñada para conservar los productos seleccionados y empacados en condiciones controladas de humedad y temperatura. Esta área asegura que los alimentos mantengan su calidad y frescura hasta el momento de su distribución, reduciendo pérdidas postcosecha y contribuyendo a una logística de salida más eficiente.

El modelado en 2D y 3D del invernadero inteligente, realizado en el software Floorplanner, constituyó un paso fundamental para visualizar de forma técnica y precisa la

distribución física del espacio. A partir del análisis de la tabla y el diagrama relacional, junto con la aplicación de la simbología ASME, se logró plasmar de manera coherente las proporciones espaciales y los recorridos operativos del sistema productivo. Esta representación permitió anticipar ajustes, evaluar la interacción entre áreas funcionales y validar la eficiencia del layout propuesto, asegurando un flujo lógico de materiales y procesos dentro del invernadero.

En conjunto, la fase de diseño consolidó la transformación del análisis conceptual en una planificación estructural, operativa y logística completa. La implementación del método SLP permitió estructurar de manera eficiente cada etapa del sistema productivo, optimizando recursos, minimizando tiempos de desplazamiento y mejorando la sostenibilidad mediante la reincorporación de residuos orgánicos al ciclo agrícola. Gracias a esta integración entre planificación, modelado y criterios de sostenibilidad, se sentaron bases sólidas para proyectar un invernadero inteligente, escalable y ambientalmente responsable.

## **Desarrollo e Integración del Sistema Automatizado de Monitoreo**

Una vez definido el esquema, la distribución física y funcional del invernadero inteligente, a través del método SLP en las etapas previas, se procedió a la fase de implementación tecnológica que respalda la operación automatizada del sistema. En esta tercera y última etapa, la atención se centró en el desarrollo e integración de un sistema automático de monitoreo, pensado para recopilar y gestionar en tiempo real los datos relevantes del entorno productivo. Se ejecutó tomando como cultivo piloto el jengibre basándose en el diseño espacial previamente establecido, se seleccionaron y ubicaron de forma estratégica microcontroladores y sensores que tienen la capacidad de medir variables ambientales y del suelo, mejorando así el control del cultivo. Todo el conjunto del sistema fue alimentado por energía solar, lo cual refuerza la idea de un modelo agrícola autosuficiente y sostenible, creando una infraestructura inteligente que no solo reduce la necesidad de intervención humana, sino que también favorece un uso más eficiente de los recursos.

Además, se realizó una presentación con las definiciones de los componentes tanto solares como electrónicos, para mejor comprensión del desarrollo de esta última fase: [Fase 3 - Conceptos](#)

### ***Implementación del Sistema Fotovoltaico***

Una de las partes esenciales de esta fase se basa en la energía solar que tendrá el invernadero para que sea autosostenible. Esta práctica alimentará a todo el invernadero. Las herramientas principales serán los paneles solares, controladores solares, baterías y cableados que permitan la conexión entre sí.

Para garantizar la correcta implementación del sistema fotovoltaico en el invernadero, fue necesario estudiar con detalle el espacio disponible y las condiciones ambientales, con el fin de definir la ubicación más adecuada de los paneles y la cantidad requerida según la demanda

energética. La selección de paneles fotovoltaicos de alta eficiencia y materiales resistentes a la intemperie resultó esencial, ya que deben soportar factores climáticos como la radiación solar, el viento o la lluvia. Asimismo, se consideró la importancia de una fijación segura que prolongue su vida útil y evite pérdidas por daños estructurales.

El diseño del sistema eléctrico contempló las distintas formas de conexión de los paneles solares, ya sea en serie, en paralelo o en una combinación de ambos, lo cual depende de las características del inversor, encargado de transformar la corriente continua en corriente alterna para el funcionamiento de los equipos. Tal como menciona AutoSolar (s.f.), la elección del tipo de conexión modifica el desempeño del sistema, por lo que contar con asesoría especializada es fundamental para dimensionar correctamente la instalación, prevenir sobrecargas y asegurar un rendimiento estable y seguro.

De manera complementaria, se definió la incorporación de controladores solares que regulan el flujo energético hacia las baterías, evitando tanto la sobrecarga como la descarga profunda. Estas baterías deben tener una capacidad suficiente para almacenar la energía necesaria y garantizar la autonomía del invernadero durante la noche o en días con baja radiación solar. De esta forma, el sistema fotovoltaico no solo asegura un suministro continuo de energía, sino que también respalda el principio de sostenibilidad que orienta todo el proyecto.

Teniendo en cuenta lo anterior, se realizó una investigación sobre el consumo diario que se tienen algunos factores o elementos que necesitarán energía, como los sensores, la luz LED que se necesitará para el crecimiento de la cosecha entre otros. El cálculo del consumo energético se realizó a partir de la estimación de las horas de uso diarias de cada elemento, lo que permitió obtener el consumo total diario. Con este valor se pudo proyectar la cantidad y potencia de los paneles necesarios para cubrir la demanda.

La fórmula que nos ayudará a determinar lo anterior es: FORMULA: consumo energético estimado

### Ecuación 1

*Consumo Energético Estimado*

$$\text{Cálculo: } \frac{\text{Consumo diario}}{\text{HSP}} * \text{consumo de pérdidas} =? \quad (1)$$

Para este procedimiento se tomaron los datos de consumo diario tal como se muestra en la tabla 1 y se complementaron con la información de las Horas Solares Pico, que representan la disponibilidad real de radiación solar en el día. Posteriormente, se aplicó un factor de pérdidas recomendado por Zeroadmin (2024), el cual considera aspectos como acumulación de polvo, desgaste de cableado y calentamiento del sistema, elementos que pueden reducir la eficiencia de los paneles a lo largo del tiempo.

**Tabla 1**

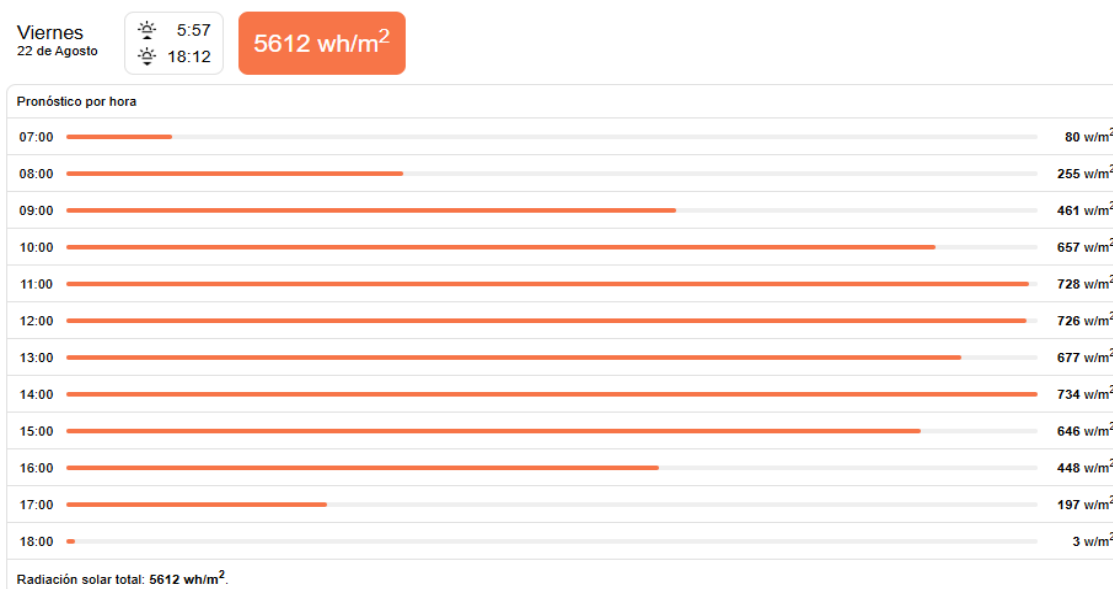
*Consumo Energético*

Equipo	Cantidad	Potencia por unidad (W)	Potencia total (W)	Horas de uso diario (h)	Consumo diario (Wh)
Ventilador	2	110W	220W	8h	1670Wh
Bomba de agua	16	4.8W	76.8W	1h	76.8Wh
Módulo de sensores					
ESP32	18	0.264W	4.75W	24h	114Wh
DHT22	18	0.0125W	0.23W	24h	5.4Wh
Capacitive	32	0.0165W	0.53W	24h	12.7Wh
Consumo extra	1	25W	25W	2h	50Wh
<b>TOTAL DIARIO</b>					<b>2018.9Wh</b>

*Nota:* Elaboración propia a partir de Naylamp Mechatronics (s.f.), Vostermans (s.f.), Varela, C. (2025), ProFeTolocka (2022) y AutoSolar (s.f.).

Cada línea de la tabla 1 muestra el consumo de un grupo de equipos, desde los de mayor potencia como los ventiladores, hasta los más eficientes como las bombas de agua. La sección de sensores, que integra los ESP32, DHT22 y sensores capacitivos, se ha calculado de forma precisa según el número de unidades que se planea usar, reflejando su bajo pero constante consumo para el monitoreo del ambiente y del cultivo, la cantidad de estos elementos se eligen teniendo en cuenta la cantidad de camillas que en el caso de nuestro invernadero serían 16 distribuidas según los requerimientos del cultivo piloto y la disponibilidad del área de cultivo. Al sumar estos valores, el cuadro da un consumo total diario de 2018,9 Wh, que será el dato fundamental para dimensionar los componentes del sistema solar.

Luego de concluir el consumo energético diario, se determina el HSP (Horas solares pico), se investigó cuál sería el promedio de radiación solar, como se puede ver en la figura 9 la radiación solar total del día 22 de agosto es de 5612 Wh/m<sup>2</sup>, se eligió este dato ya que refuerza el promedio de la región Andina, según Autosolar (s.f.) la región Andina cuenta entre 5 y 7 horas solares aproximadamente, siendo esta una región intermedia de radiación solar en comparación con las demás regiones.

**Figura 9***Radiación Solar en Ibagué*

*Nota.* tomado de Tutiempo Network, S.L., (s.f.) <https://www.tutiempo.net/radiacion-solar/ibague.html>

Según Solarama (2022), las horas solares pico (HSP) representan la cantidad de energía solar recibida por cada metro cuadrado en un lugar determinado. Este valor puede variar de acuerdo con la temporada del año y resulta fundamental para calcular el número de paneles solares necesarios en un sistema fotovoltaico. La fórmula para determinar las horas solares pico es la siguiente:

**Ecuación 2***Horas Solares Pico*

$$HSP = \frac{\text{Radiación solar (Wh/m}^2\text{)}}{1000 (W/m^2)} \quad (2)$$

Teniendo ya el dato de los 5612 Wh/m<sup>2</sup> del 22 de agosto en Ibagué se logró obtener el dato preciso para continuar con la operación, quedaría de la siguiente manera:

### **Ecuación 3**

*Resultado Número de Paneles Requeridos*

$$HSP = \frac{5612 \text{ Wh/m}^2}{1000 \text{ (W/m}^2)} = 5,612 \text{ horas} \quad (3)$$

Se lograron sacar todos los cálculos que nos determinarán cuántos paneles usar, recordando la fórmula que es consumo solar/HSP \* Consumo de pérdidas. Como se mencionó anteriormente, se determina con consumo de pérdidas ya que algunos factores pueden afectar el funcionamiento a largo plazo de los paneles, se utilizó un 25%, este se transforma a un 1.25, siendo el “1” el 100% de la energía solar que se necesita y el “.25” cuenta como el 25% que se necesita para compensar las pérdidas. De esta manera se garantiza que el panel o los paneles funcionen a futuro sin algún problema.

### **Ecuación 4**

*Demanda Energética*

$$\text{Cálculo: } \frac{2018.9 \text{ Wh}}{5.61 \text{ h}} * 1.25 = 450.2 \text{ W}_p \quad (4)$$

Por consiguiente, se establece que la demanda energética corresponde a 450.2 W<sub>p</sub>. Dado que los paneles solares de alta eficiencia con potencias de 450 W<sub>p</sub> y superiores son ampliamente accesibles y viables en el mercado actual, la alternativa más adecuada y robusta es la implementación de un único panel de 450 W<sub>p</sub>. Esta opción representa una solución más sencilla y

confiable, al reducir el número de componentes, simplificar el cableado y minimizar los puntos de posible fallo en la instalación.

A partir de este dato se logran definir conexiones y los elementos a emplear para un correcto desarrollo de un sistema solar para el consumo del invernadero como se logra evidenciar en la tabla 2.

**Tabla 2***Elección De Componentes Solares*

Elemento	A usar	Conexión	Explicación
Paneles solares	1 panel de 450 Wp	Se conecta directamente al regulador (se verifica que sea de clase 24 V: $V_{mp} > 27-28$ V).	Al ser un panel potente y único, evita la complejidad de series/paralelos; lo importante es que su $V_{mp}/V_{oc}$ sea compatible con el regulador MPPT y con el banco de 24 V.
Batería	2 baterías de 12V-200Ah en serie =24V-200Ah. Tipo AGM (sin mantenimiento, vida útil ~1000 ciclos, con límite de descarga 60%, este límite es para usarlo de manera segura, el otro % queda como reserva para que no se degrade rápido.	Cada batería se conectó en serie (+ con -) para obtener un banco de 24V-200Ah.	Este banco de baterías puede almacenar aproximadamente 4,8 kWh de energía útil. Su autonomía depende del consumo, pero con un límite de carga del 60% la energía disponible ronda los 2,9 kWh. Esto permite respaldar el sistema en la noche para el ventilador, internet y equipos pequeños que sean requeridos, asegurando entre 2 y 3 días de autonomía según el uso.
Regulador solar	MPPT 30A/24V.	Entre panel y banco. Debe soportar el $V_{oc}/V_{mp}$ del panel y la corriente generada por 450 Wp a 24 V.	Regula la carga para que las baterías no se dañen. MPPT aumenta la eficiencia, es decir que hace trabajar los paneles en su mejor punto y tiene mejor adaptación del voltaje al de la batería.
Inversor	Inversor off-grid (cargador), 24V entrada / 110V salida, 1000-1500W.	Se conectó al banco de baterías (24V). Salida AC para computadores y equipos de 110V.	Como no se cuenta con red eléctrica en este espacio del invernadero, el inversor debe ser independiente como lo es el (off-grid). Este convierte la energía de baterías a AC y soporta la carga de computadores, ventilador y red Wi-Fi.

*Nota.* Elaboración propia a partir de SunFields Europe (2025) <https://www.sfe-solar.com/paneles-solares/voltaje/>, Autosolar (s.f.) <https://autosolar.co/aspectos-tecnicos/que-es-un-controlador-de-carga-solar>, Solarplak (2023) <https://solarplak.es/energia/como-elegir-baterias-para-paneles-solares/>

Con base en los cálculos y la decisión de usar un sistema a 24 V con un panel solar de 450 Wp, se garantiza una fuente de energía suficiente para cubrir las necesidades principales del invernadero: ventiladores, módulos de sensores y equipos electrónicos pequeños como el ESP32 y un router WiFi.

El uso de un inversor es indispensable, ya que se requerirá corriente alterna (AC) para dispositivos como computadores y posiblemente el router. Sin embargo, siempre que sea posible, se recomienda alimentar directamente en corriente continua (DC) los equipos de bajo consumo, como los sensores y el ESP32, para reducir pérdidas de conversión.

Se infiere que el sistema es autosustentable para la operación tecnológica básica del invernadero satisfaciendo las necesidades energéticas del cultivo piloto, aunque su eficiencia dependerá de un buen dimensionamiento de baterías, un inversor adecuado y el manejo responsable de los consumos conectados.

### ***Implementación y automatización del cultivo piloto***

Una vez definido el sistema fotovoltaico como fuente principal de energía para el invernadero, el siguiente paso corresponde a la implementación de los sensores y mecanismos de control ambiental. Para validar la eficiencia del sistema automatizado, se ha seleccionado el jengibre (*Zingiber officinale*) como cultivo piloto, dado que sus requerimientos específicos permiten evaluar con precisión la capacidad del sistema para regular variables críticas como temperatura, humedad y riego.

El jengibre es un cultivo de alta importancia en el mercado global, con una demanda creciente en la industria alimentaria, farmacéutica y cosmética, gracias a sus propiedades medicinales, su versatilidad gastronómica y sus múltiples formas de transformación, entre ellas el

consumo fresco, deshidratado, en polvo y en aceite esencial. En 2024, el mercado mundial de jengibre alcanzó un valor de USD 6,04 mil millones, con proyecciones de crecimiento hasta USD 8,98 mil millones en 2034, lo que refleja una tasa anual compuesta del 4,5% (Informes de Expertos, 2024). Este dinamismo en la demanda confirma el potencial del jengibre como producto estratégico tanto para el comercio local como para la exportación.

La elección del jengibre como cultivo piloto en el invernadero automatizado responde también a su rentabilidad y adaptabilidad a diferentes entornos productivos. Bajo condiciones de invernadero, la planta puede desarrollarse con un manejo controlado de la humedad, la temperatura y el riego, reduciendo la incidencia de enfermedades y asegurando uniformidad en la cosecha. Asimismo, la producción bajo condiciones controladas garantiza rizomas de mayor calidad, atractivos para mercados especializados (Cultivo de jengibre en invernadero, Reyes, 2023).

En términos productivos, el jengibre requiere entre 8 y 10 meses desde la siembra hasta la cosecha, dependiendo de las condiciones edafoclimáticas y del manejo agronómico. En promedio, cada planta puede generar entre 2 y 3 kg de rizoma fresco cuando se cultiva en condiciones óptimas (Reyes, 2023).

Para un invernadero de 200 m<sup>2</sup>, considerando la adecuación de 16 camillas de cultivo con pasillos de 1 metro de ancho, el área efectiva de siembra se reduce a aproximadamente 160 m<sup>2</sup> netos. Aplicando una densidad de siembra de 15 a 20 plantas por metro cuadrado, la población real se estima entre 2.400 y 3.200 plantas por ciclo productivo. Con un rendimiento promedio de 2 kg por planta, la producción total podría oscilar entre 4.800 y 6.400 kilogramos de rizoma fresco por ciclo, lo que evidencia un alto potencial económico y productivo bajo un esquema controlado de invernadero.

**Tabla 3***Producción y Manejo Jengibre*

Etapa	Prácticas recomendadas
Propagación	División de rizomas (3–5 cm con yema viable)
Preparación del terreno	Labranza mínima, incorporación de materia orgánica, nivelación y surcos
Siembra	6–10 cm de profundidad, 70 cm entre surcos, 25 cm entre plantas
Densidad	56.000 plantas/ha aprox. (1.000–1.200 kg de rizoma/ha)
Fertilización	Orgánica (compost, gallinaza, estiércol) y química (urea, fosfatos, potasio)

*Nota.* Elaboración Propia. Resumen del sistema de producción y su respectivo manejo.

Finalmente, contar con información detallada sobre los parámetros óptimos de desarrollo del jengibre resulta esencial para definir los criterios de referencia que guiarán tanto el manejo agronómico como la integración tecnológica del sistema automatizado. En la tabla 4, se organizan los factores más relevantes para su producción, ofreciendo un punto de partida para la toma de decisiones y la configuración del sistema de control ambiental en el invernadero.

**Tabla 4***Requerimientos del Jengibre*

Factor	Requerimiento óptimo	Rango tolerable / Observaciones
Temperatura del aire	24 – 28 °C	Tolera 20 – 30 °C. Estrés a $\geq 32$ °C; daños fisiológicos a $\geq 35$ °C.
Temperatura del suelo	~25 °C (77 °F)	Mínimo 13 °C; por debajo de 15 °C el crecimiento se ralentiza.
Humedad relativa	80 – 90 %	Menor de 60 % → riesgo de estrés hídrico y reducción de vigor.
Humedad del suelo	60 – 80 % de Capacidad de Campo (equiv. 30 – 40 % VWC en sustratos arenosos)	Evitar encharcamiento (>90 % CC) → riesgo de pudrición de rizomas.
Luz / Radiación	Semisombra (malla 30 – 50 %)	Exceso de radiación → sobrecalentamiento y quemaduras foliares. Puede tolerar hasta 70 % en suelos bien drenados.
pH del suelo/sustrato	5,5 – 6,5	Puede tolerar hasta 7,0 en suelos bien drenados.
Textura del suelo	Franco-arenoso, rico en materia orgánica	Evitar suelos arcillosos pesados o con mal drenaje.
Nutrientes	Alta demanda de K y N. Requiere aporte regular de materia orgánica (compost, estiércol).	Deficiencia de K afecta el desarrollo de rizomas.
Ciclo del cultivo	8 – 10 meses desde la siembra hasta la cosecha	En condiciones protegidas puede alargarse o adelantarse según manejo.

*Nota.* Elaboración propia a partir de Bozhurin (2024) <https://growplant.org/blog/how-to-grow-ginger/> y Growing ginger at home (2025) [https://ext.vt.edu/lawn-garden/Timely\\_Topics/Ginger.html](https://ext.vt.edu/lawn-garden/Timely_Topics/Ginger.html)

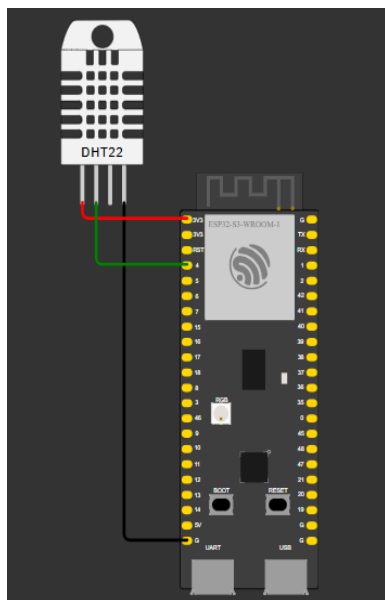
Esta tabla 4 expone los factores ambientales y de manejo más determinantes para lograr un rendimiento óptimo del jengibre cultivado en invernadero. En ella se detallan los rangos ideales y los niveles de tolerancia, además de señalar los posibles riesgos y limitaciones asociados. Este insumo constituye una herramienta técnica clave para planificar y conducir el cultivo bajo condiciones controladas, garantizando un crecimiento vigoroso, la adecuada

formación de rizomas y la reducción de problemas relacionados con estrés térmico, hídrico o nutricional. Asimismo, la información servirá como base para el desarrollo de los códigos en el ESP32, ya que los parámetros definidos orientarán el uso de los sensores y la configuración de los sistemas automatizados.

De esta manera, se establece un vínculo entre los requerimientos agronómicos del cultivo y la arquitectura tecnológica del sistema, garantizando que cada variable ambiental sea monitoreada y regulada conforme a los rangos establecidos. A su vez, la información obtenida servirá como base para el desarrollo de los códigos en el ESP32, ya que los parámetros definidos orientarán el uso de los sensores y la configuración de los sistemas automatizados. En este sentido, se da paso a la presentación de los esquemas de automatización, los cuales permiten visualizar de manera clara la integración entre la tecnología y las necesidades del cultivo.

## Figura 10

### *Esquema de Conexión ESP32 – DHT22*



*Nota.* Elaboración propia a partir del simulador Wokwi <https://wokwi.com>

En la figura 10 se presenta la conexión entre el sensor DHT22 y la tarjeta de desarrollo ESP32, implementada mediante el simulador Wokwi. El DHT22, utilizado para la medición de temperatura y humedad relativa, dispone en su versión real de tres pines funcionales: VCC, GND y DATA, mientras que en la simulación en Wokwi aparece con cuatro terminales: VCC, GND, SDA y NC. La correspondencia entre ambos esquemas es la siguiente:

VCC → VCC (alimentado desde el pin 3V3 del ESP32).

GND → GND (referencia común).

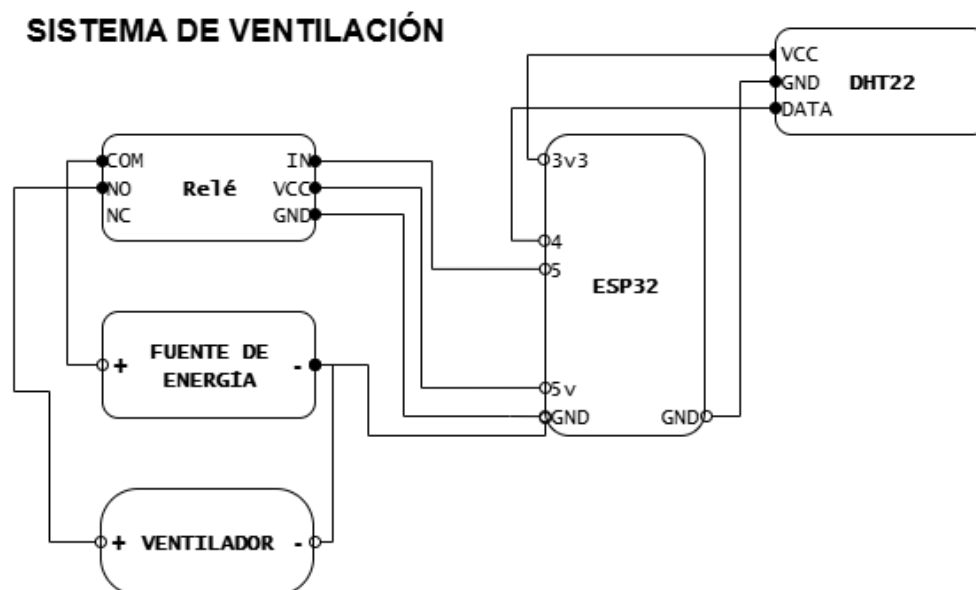
DATA (real) → SDA (en Wokwi), conectado al GPIO 4 del ESP32, encargado de la transmisión de datos digitales hacia el microcontrolador.

NC (Not Connected) → no se conecta, puesto que no cumple ninguna función en el circuito.

De esta forma, la configuración garantiza que el ESP32 pueda recibir de manera adecuada los datos de humedad y temperatura del DHT22, permitiendo su posterior procesamiento y visualización en aplicaciones de monitoreo ambiental. Asimismo, se añadieron los elementos necesarios para el control automático del ventilador, cuyo funcionamiento también depende de los valores registrados por el sensor. Todo este proceso se representa de forma general en el diagrama de bloques de la figura 11, que muestra cómo interactúan los diferentes componentes del sistema.

Figura 11

*Esquema de Conexión del Sistema de Ventilación Automatizado*



*Nota.* Diagrama de bloques Sistema de ventilación. Elaboración propia (2025)

En la figura 11. se muestra el diagrama de bloques que explica cómo están conectados los componentes del sistema. Este funciona haciendo que el ESP32 controle el encendido del ventilador a través del relé, usando como fuente de energía una batería o un LM2596 adecuándolos al voltaje necesario. Cuando el sensor detecta que la temperatura supera el valor establecido en el código, el ESP32 envía una señal al relé para que permita el paso de la energía desde la batería hacia el ventilador. De esta forma, el ventilador se enciende sólo cuando hace falta bajar la temperatura y se apaga automáticamente cuando vuelve a estar dentro del rango adecuado. Este mecanismo asegura que el ventilador no esté encendido todo el tiempo, lo que ayuda a ahorrar energía y a mantener condiciones ambientales estables para el cultivo.

Para iniciar, se diseñó un proyecto en el aplicativo Blynk, el cual permite visualizar en tiempo real la información obtenida de los sensores. En esta primera etapa, el enfoque se centró

en la detección de temperatura y humedad del ambiente, por lo que se definieron los ítems básicos necesarios para esta lectura.

Para la configuración inicial del aplicativo se tomó como guía el tutorial de Edison R Sasig - Roboticoss disponible en YouTube, el cual fue seguido hasta el minuto 6:25. Este material orientó la creación del proyecto básico y la estructuración de los elementos necesarios para el correcto funcionamiento de la plataforma (Edison R Sasig - Roboticoss, s. f., 0:00–6:25).

El aplicativo no solo facilita la visualización de los datos, sino que también proporciona parámetros que deben incorporarse en el código para asegurar la correcta comunicación entre el ESP32 y la plataforma. De esta manera, los datos obtenidos podrán analizarse y aplicarse en beneficio del cultivo.

En el siguiente video se presenta la interfaz desarrollada en Blynk Web, programada en línea desde el computador, como parte del proceso de diseño y configuración inicial del sistema agrícola: [Blynk PC](#) (Duarte, 2025)

En el video elaborado se muestra en tiempo real cómo se desarrolló este diseño, siguiendo como referencia el tutorial mencionado. Allí se explican los pasos esenciales: iniciar sesión en la aplicación, crear un nuevo proyecto, seleccionar el dispositivo ESP32, configurar la conexión por WiFi, obtener el token de autenticación y diseñar la interfaz inicial mediante la incorporación de widgets que permiten visualizar en tiempo real la temperatura y la humedad. Esta guía práctica constituye la base para comprender la dinámica del aplicativo y aplicarla al sistema de monitoreo del invernadero inteligente.

En el siguiente video se presenta la interfaz móvil desarrollada en la aplicación Blynk IoT, donde se configuraron los *Datastreams* de temperatura y humedad para su visualización en tiempo real. [Interfaz Blynk IoT Mobile - Humedad y temperatura](#)

En esta etapa se realizó únicamente el diseño de la interfaz para el formato de visualización en dispositivos móviles. Dado que los *Datastreams* de temperatura y humedad ya habían sido definidos previamente en la plataforma web desde el computador, se procedió a incorporar en la aplicación las mismas gráficas presentadas en el primer video. De esta manera, se garantiza un seguimiento coherente entre ambas interfaces y se fortalece la conexión visual y funcional del sistema.

En adición como se mencionó anteriormente de este aplicativo se logran obtener unos datos que son utilizados en el código, los datos obtenidos fueron los siguientes:

```
#define BLYNK_TEMPLATE_ID "TMPL2fZtnJxBB"
```

```
#define BLYNK_TEMPLATE_NAME "JengibreTemperaturayHumedad"
```

```
#define BLYNK_AUTH_TOKEN "EygMhv9w9dCl3MPGLTpiIXJFSm_ckRxv"
```

Con esta base, el siguiente paso fue la implementación del código en Arduino IDE, que constituye el vínculo entre el diseño realizado en la plataforma Blynk y el funcionamiento del ESP32 dentro del sistema de monitoreo. Dicho código integra los parámetros obtenidos en el aplicativo y permite que las mediciones del sensor puedan transmitirse y visualizarse en tiempo real. En el apéndice E, se presenta el código desarrollado: [Código ventilación invernadero.pdf](#)

Este código está diseñado para ser trabajado en la plataforma Arduino IDE, que es la herramienta donde se escribe, edita y carga el programa al ESP32. Desde allí se puede verificar que el código no tenga errores, hacerle cambios cuando sea necesario y, finalmente, subirlo al microcontrolador para que funcione de manera óptima en el proyecto.

Para que este programa funcionara correctamente, fue necesario contar con algunas librerías que deben descargarse en el Arduino IDE:

**Blynk.** permite la conexión del ESP32 con la aplicación Blynk para visualizar los datos en tiempo real.

**WiFi.** se usa para conectar el ESP32 a la red inalámbrica.

**DHT Sensor Library.** permite leer los valores de humedad y temperatura del sensor DHT22.

Una vez se cargó el código en el ESP32, fue posible verificar su funcionamiento usando el Serial Monitor, que se encuentra en el menú Tools (Herramientas) de Arduino IDE. Allí se pudieron observar los mensajes de depuración que el mismo código imprime, como la lectura de la temperatura, la humedad o posibles errores de conexión. Esto permitió confirmar que el dispositivo está leyendo y enviando correctamente la información.

En cuanto al envío de datos, el programa está configurado para que la información capturada por el sensor DHT22, que se conecta físicamente al pin 4 del ESP32, sea enviada a la plataforma Blynk. Allí los resultados se muestran en tiempo real, permitiendo ver tanto la humedad como la temperatura directamente desde el celular o la aplicación web.

Además, se incorporó un ventilador controlado por un relé, el cual se activa o desactiva automáticamente dependiendo de la temperatura registrada por el sensor. Si la temperatura supera los 28 °C (límite superior del rango óptimo para el cultivo de jengibre), el relé enciende el ventilador para enfriar el ambiente; cuando la temperatura desciende nuevamente a 24 °C o menos, el relé apaga el ventilador. Esto permite mantener las condiciones ambientales adecuadas de manera automática, ayudando a evitar el estrés térmico en las plantas.

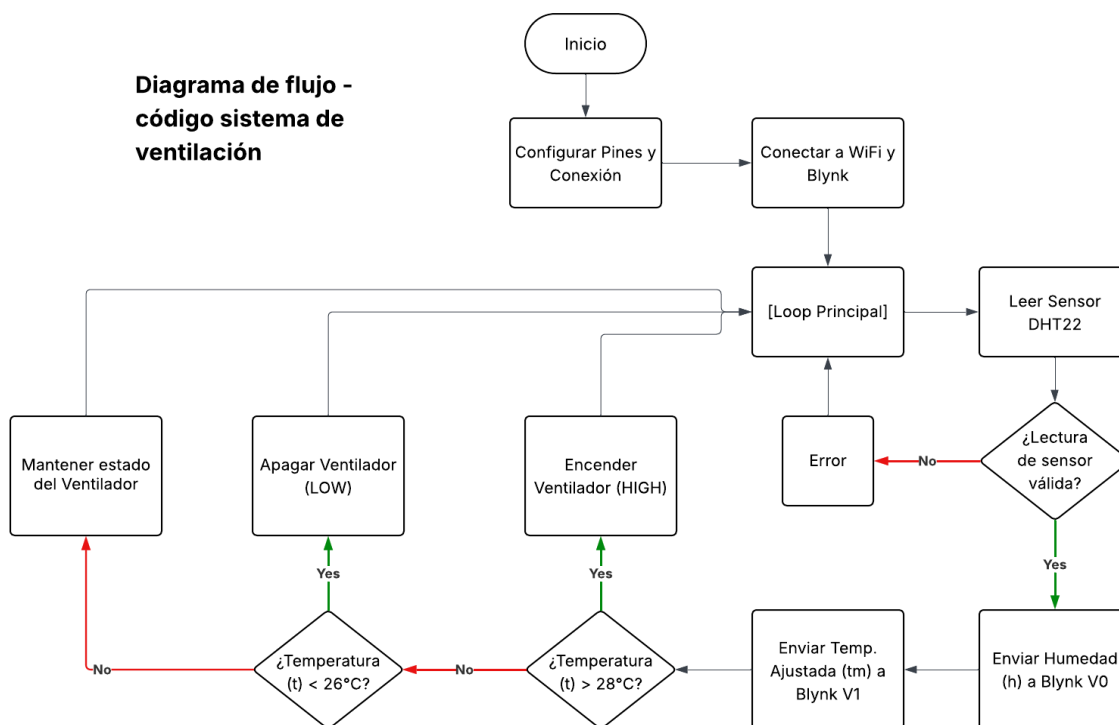
La conexión entre el ESP32 y Blynk se logra gracias al `BLYNK_AUTH_TOKEN`, un código generado automáticamente en la aplicación cuando se creó el diseño del proyecto, como se pudo evidenciar en los videos mencionados anteriormente. Ese token, junto con el nombre y la

contraseña del WiFi del lugar donde se desea sensorizar, es el dato que enlaza el dispositivo físico con la plataforma en línea. Es importante que en el código se reemplacen esas variables con la red y la contraseña reales, de lo contrario el dispositivo no podrá enviar la información.

En resumen, este programa combina el Arduino IDE como entorno de programación, el ESP32 como dispositivo físico, el sensor DHT22 para medir temperatura y humedad, un ventilador que regula automáticamente la temperatura mediante un relé, y la plataforma Blynk como interfaz en tiempo real. Todo esto conectado a través de WiFi y gestionado con el token, lo que asegura que los datos recogidos en el invernadero lleguen directamente a la aplicación para su monitoreo mientras se mantienen condiciones ambientales óptimas para el jengibre.

## Figura 12

Diagrama de Flujo - Código Sistema de Ventilación



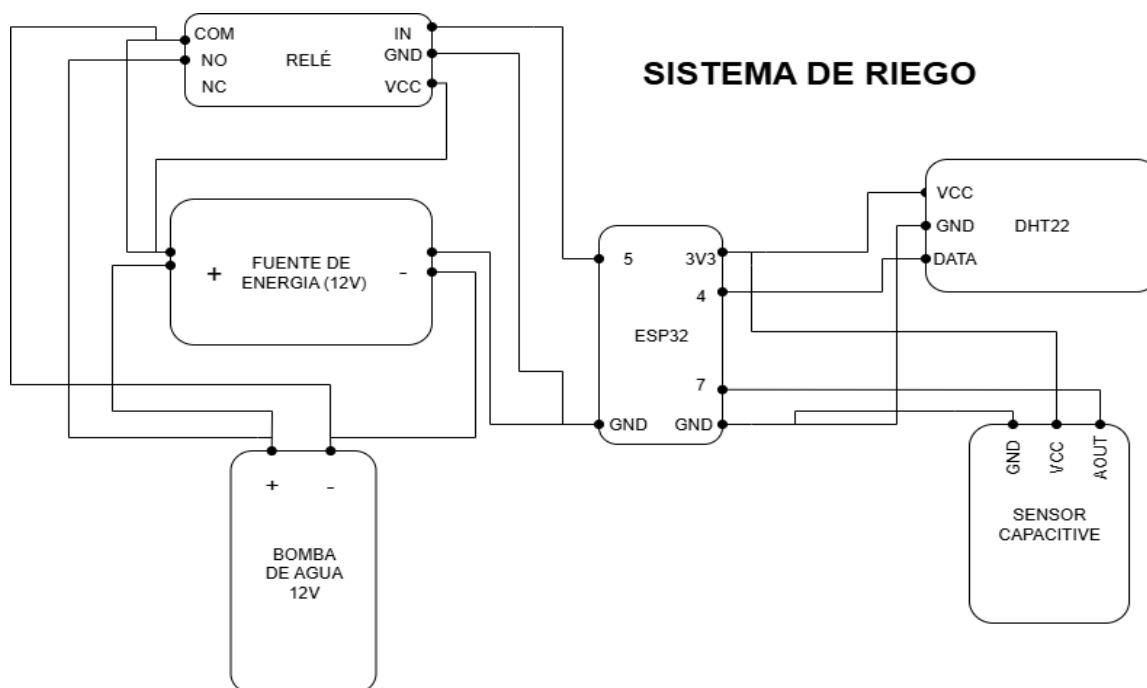
*Nota.* Elaboración propia. Diagrama del código establecido sistema de ventilación a partir del software Lucidchart.

El diagrama de flujo que se elaboró representa la lógica de tu sistema de ventilación y monitoreo del jengibre. En él se ilustra cómo, después de que el dispositivo ESP32 se inicializa y se conecta a la red Wi-Fi y a la plataforma Blynk, entra en un ciclo de operación continuo.

Este ciclo principal, conocido como el loop, es el corazón del sistema. En cada iteración del loop, el programa espera 2 segundos para luego leer los datos del sensor DHT22. Después de una lectura exitosa, envía la información de humedad y temperatura a la aplicación de Blynk para su visualización.

Lo más importante es que, inmediatamente después, el programa evalúa si la temperatura es lo suficientemente alta como para encender el ventilador o lo suficientemente baja como para apagarlo. Sin importar cuál de las tres decisiones se tome, encender, apagar o no hacer nada, el flujo de control retorna de nuevo al loop principal. Este retorno garantiza que el proceso se repita una y otra vez, permitiendo que el sistema monitoree y ajuste las condiciones ambientales del jengibre de forma automática y constante.

Una vez establecido el primer proyecto en la plataforma Blynk, orientado al monitoreo de temperatura y humedad, se da paso a un nuevo desarrollo dentro de la misma aplicación, esta vez enfocado en la integración del riego automatizado, que constituye el eje central de la propuesta de un invernadero inteligente. A diferencia del paso anterior, que se limitaba a la recolección y visualización de datos ambientales, este nuevo proyecto se centra en la gestión activa del recurso hídrico, garantizando que el cultivo reciba agua únicamente cuando lo requiere y en la cantidad adecuada.

**Figura 13***Esquema de Conexión del Sistema de Riego Automatizado*

*Nota.* Diagrama de bloques Sistema de riego. Elaboración propia (2025).

La figura 13 muestra la integración de los componentes que conforman el sistema de riego automatizado, en el cual intervienen el ESP32, un sensor capacitivo de humedad del suelo, un módulo relé y una bomba de agua de 12 V. El funcionamiento se basa en que el sensor mide el nivel de humedad del sustrato y transmite la señal al microcontrolador, el cual, según los parámetros definidos en la programación, determina la activación o no de la bomba.

La bomba de 12 V es el elemento central que permite que el agua llegue a las plantas solo cuando realmente lo necesitan, evitando tanto el exceso como la falta de riego. Su uso resulta eficiente y sostenible, ya que consume poca energía, requiere poco mantenimiento y puede alimentarse mediante energía solar (Autosolar, s.f.). En lugar de conectarla directamente a una

batería de 12 V, se emplea un regulador LM2596, que adapta la energía disponible hasta alcanzar el voltaje necesario para el funcionamiento de la bomba, de forma más precisa y controlada.

El relé actúa como intermediario, permitiendo el paso de energía hacia la bomba únicamente cuando se cumplen las condiciones de riego, lo que optimiza el uso del agua y prolonga la vida útil de los componentes. Este diseño constituye la base para futuras integraciones con plataformas de monitoreo remoto, lo que ampliará las posibilidades de control y gestión en tiempo real del sistema.

Con el diseño del sistema ya estructurado y las conexiones definidas, el paso siguiente fue la programación que permitió dar vida al funcionamiento del riego automatizado. Para ello, se elaboró un código en Arduino IDE, el cual establece la comunicación entre el ESP32, los sensores y los actuadores del sistema. Este código gestiona las lecturas obtenidas y activa los mecanismos de riego de acuerdo con las condiciones registradas. En el siguiente Apéndice F se presenta el código implementado: [Código riego invernadero.pdf](#)

Este código controla un sistema de monitoreo y riego automático para el cultivo de jengibre, usando un sensor de humedad de suelo capacitivo v2.0 conectado al pin GPIO 7 del ESP32-S3-WROOM-1, y un sensor DHT22 en el pin GPIO 4 para medir temperatura y humedad del aire.

El DHT22 funciona igual que en la versión anterior del proyecto: se conecta con sus tres pines principales (VCC a 3.3 V, GND a GND y señal al pin 4). Aunque en este escenario no controla nada directamente, su función es registrar y enviar al panel de Blynk las condiciones ambientales (temperatura y humedad del aire) para tener una visión más completa del entorno del cultivo de jengibre.

El sensor de suelo funciona con lecturas analógicas: cuando el suelo está muy seco, entrega valores crudos cercanos a 2700, y cuando está muy húmedo, entrega valores cercanos a 1500.

Los valores crudos dependen de la lectura analógica, para el ESP32 el rango va desde 0 hasta 4095, pero los resultados nunca llegan a 0, los valores normalmente se mueven entre 3100 y 2600 (*ESP32 - Soil Moisture Sensor | ESP32 Tutorial*, n.d.). Es por eso que se decide hacer una aproximación y tomar los datos de 2700 para los valores de seco y 1500 para húmedo. Sirven para tener una base aproximada y poder convertir la señal analógica en un porcentaje de humedad (0 % = tierra muy seca y 100 % = tierra saturada).

Con base en los datos del cultivo de jengibre, que requiere una humedad del suelo entre el 60 % y el 80 % para desarrollarse bien, se establecieron umbrales de control:

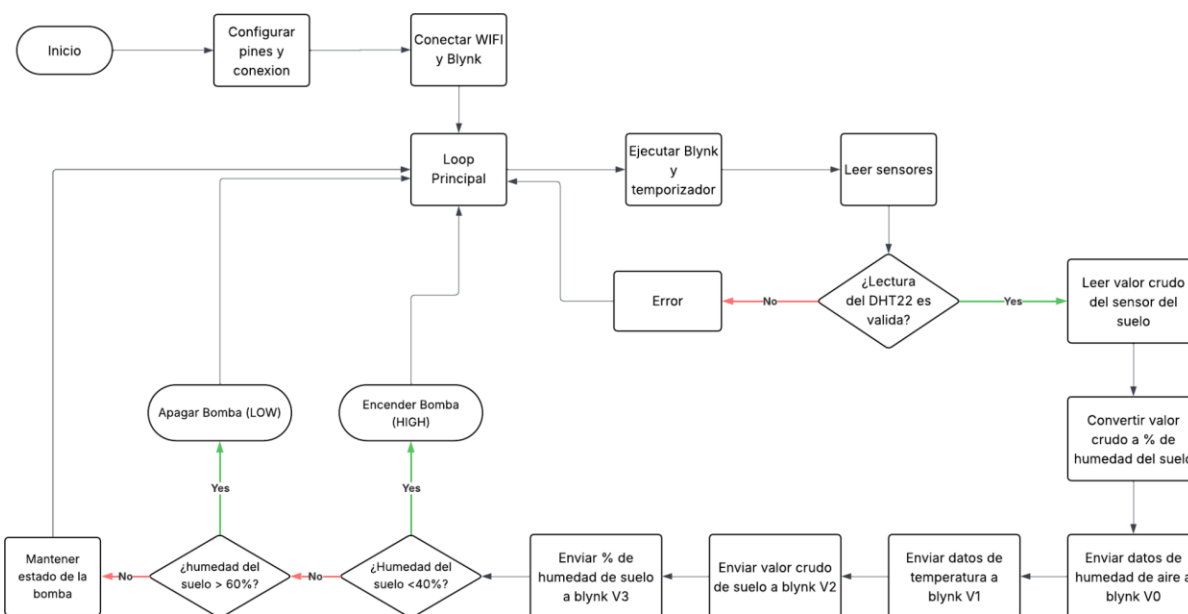
- Si el porcentaje baja de 60 %, el código activa automáticamente la bomba de agua encendiendo el relé conectado al pin GPIO 5.
- Si el porcentaje supera el 80 %, la bomba se apaga automáticamente para evitar el exceso de agua.

Además, el sistema envía continuamente los valores crudos y los porcentajes de humedad del suelo al panel de Blynk, donde pueden visualizarse en tiempo real mediante un gráfico y un medidor.

Este código permite mantener de forma automática el rango de humedad óptimo para el jengibre, evitando tanto la sequía como el encharcamiento y registrando las condiciones ambientales que podrían afectar su crecimiento.

Figura 14

## Diagrama de Flujo - Código Sistema de Riego



*Nota.* Elaboración propia. Diagrama del código establecido sistema de riego a partir del software Lucidchart.

El diagrama de flujo diseñado muestra de manera clara la lógica que sigue nuestro sistema de riego automático. Una vez que el ESP32 se enciende y logra conectarse tanto a la red Wi-Fi como a la plataforma Blynk, comienza a ejecutar un ciclo repetitivo que constituye la base de su funcionamiento.

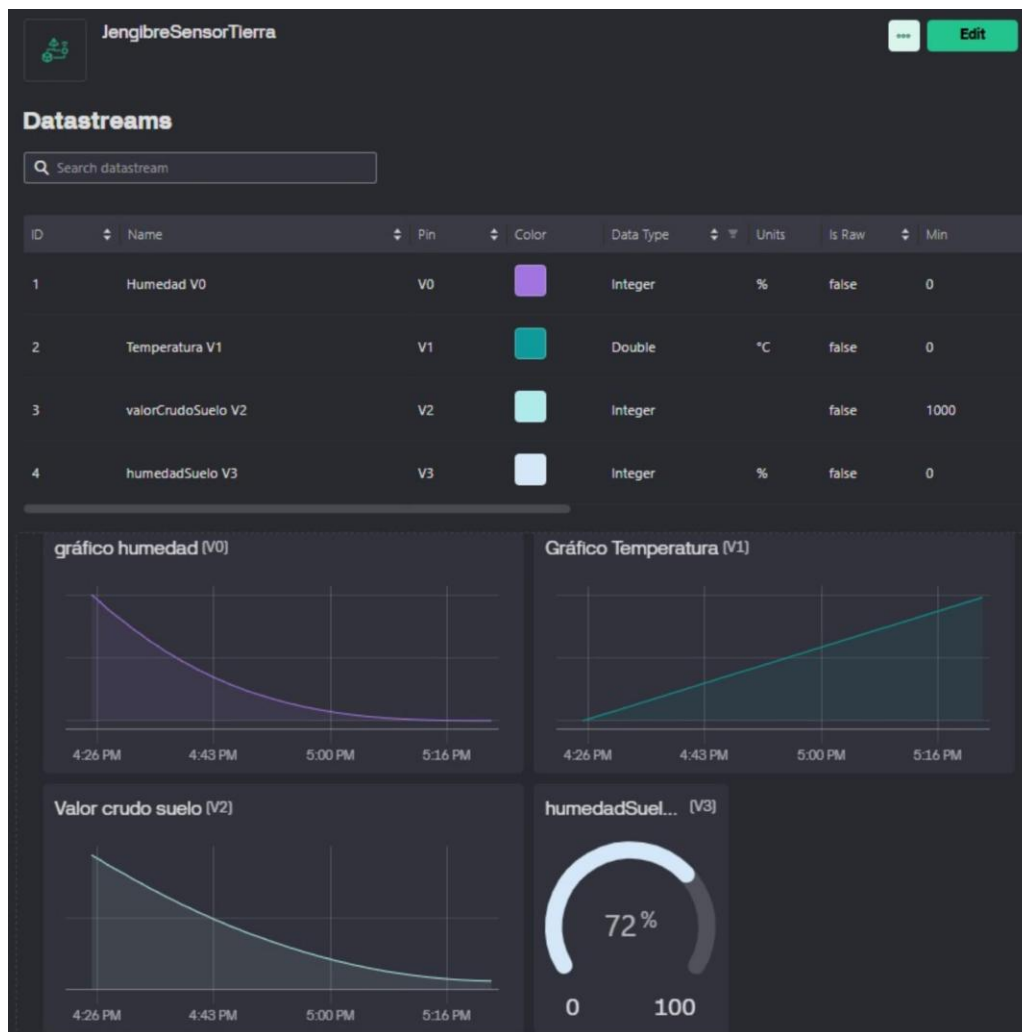
Dentro de este ciclo, el programa realiza una pausa determinada antes de proceder a tomar la lectura del sensor de humedad del suelo. Esa información no solo se transmite a la aplicación para su consulta en tiempo real, sino que además es utilizada por el sistema para decidir la acción a tomar respecto al riego.

En este punto, el programa analiza si el nivel de humedad es inferior al umbral establecido, lo que activa la bomba de agua, o si, por el contrario, es suficiente, en cuyo caso la bomba permanece apagada. Tras cualquiera de estas acciones, el control regresa nuevamente al ciclo principal. Este retorno asegura que el monitoreo y la toma de decisiones se repitan de forma continua, garantizando así que las condiciones de riego del cultivo se mantengan bajo un control automático y constante.

De esta manera, el sistema no solo controla automáticamente el riego según la humedad del suelo. Además, permite monitorear en tiempo real las variables desde la plataforma de Blynk. En la figura 15. Se muestra el modelo de la interfaz en Blynk que utilizamos, siguiendo el mismo proceso explicado en los videos previos del proyecto.

**Figura 15**

*Interfaz Blynk Valores Crudos y Porcentajes del Suelo*



*Nota.* Elaboración Propia. Interfaz Blynk utilizada para la supervisión de la humedad del suelo y la gestión automática de la bomba de riego. <https://blynk.cloud/dashboard/login>

Para esta versión, se incorporaron dos nuevos Datastreams que complementan la información:

Valor Crudo Suelo (V2): muestra el valor analógico que entrega el sensor de humedad del suelo, normalmente entre 2700 (suelo seco) y 1500 (suelo húmedo).

Humedad Suelo (V3): convierte ese valor crudo en un porcentaje (0 % a 100 %), facilitando la interpretación de los datos y el accionamiento automático de la bomba de agua cuando la tierra lo requiere.

Estos Datastreams permiten supervisar con mayor precisión el estado de la tierra y asegurar que se mantenga dentro del rango de humedad adecuado para el cultivo de jengibre.

Finalmente, la fase 3 permitió integrar de manera efectiva el sistema automatizado del invernadero, combinando la implementación del sistema fotovoltaico con la instalación de sensores y microcontroladores ESP32. A través de estos elementos se logró el monitoreo en tiempo real de variables críticas como temperatura, humedad ambiental y humedad del suelo, empleando la plataforma Blynk para la visualización y gestión de los datos.

Asimismo, se desarrollaron mecanismos de control automático para la ventilación y el riego, garantizando un uso eficiente de la energía y el agua, siempre en función de los rangos óptimos requeridos por el cultivo piloto de jengibre. Esta integración tecnológica confirmó la viabilidad del modelo diseñado y sentó las bases para el manejo autónomo del invernadero bajo condiciones controladas y sostenibles.

## Conclusiones

Este trabajo de grado abordó la problemática de la producción agrícola ineficiente y la pérdida de recursos en los invernaderos tradicionales. El proyecto demostró que es posible desarrollar un sistema automatizado que responda a la pregunta de investigación: "¿Cómo se podría desarrollar un sistema automatizado para la gestión eficiente de un invernadero agrícola que garantice la producción de hortalizas y legumbres en óptimas condiciones para el consumo humano y ahorrando costos, esfuerzos y recursos?". Los hallazgos a lo largo de las tres fases de la investigación validan la viabilidad del modelo propuesto, sentando las bases para una producción eficiente y sostenible.

En el desarrollo del proyecto también se alcanzó el objetivo de modelar el sistema agrícola aplicando un enfoque sistémico, a través de la metodología SIPOC. Esta herramienta permitió identificar claramente las entradas, actividades y salidas del proceso, proporcionando una comprensión integral del flujo de recursos y de información.

El diseño del invernadero representó otro logro importante. Mediante el uso de herramientas de diseño 2D y 3D se optimizó la distribución de la planta y el flujo de materiales, lo que incluyó el manejo de los almacenes de materia prima, la producción agrícola y el producto terminado. Esta planeación logística, apoyada por la metodología SLP (Systematic Layout Planning), contribuyó significativamente a la eficiencia general del proceso, al minimizar los cuellos de botella y maximizar el aprovechamiento del espacio.

La implementación de un sistema de monitoreo y control automatizado es un hallazgo clave. Mediante el uso de sensores ambientales y del suelo, el sistema puede ajustar variables como la humedad y la temperatura, lo que a su vez activa el sistema de ventilación y el riego para

mantener las condiciones ideales para los cultivos. La programación de los códigos para cada sensor es fundamental para asegurar que las respuestas del sistema sean precisas y oportunas.

Finalmente, este proyecto, aunque limitado a una propuesta conceptual, sienta un precedente importante para el desarrollo de una agricultura tecnificada y ambientalmente responsable. La siguiente fase de investigación debería enfocarse en la implementación física de este sistema para obtener datos empíricos que validen a gran escala el ahorro de costos, la reducción de esfuerzos y la mejora en la productividad, contribuyendo así a la seguridad alimentaria y la sostenibilidad del sector agrícola en el futuro.

## Recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos en este trabajo de grado, se recomienda avanzar hacia la implementación física del invernadero inteligente en una escala piloto, con el fin de validar de manera empírica la viabilidad del modelo propuesto. Esta acción permitirá comprobar en condiciones reales el ahorro de recursos, la optimización de esfuerzos y la mejora en la productividad agrícola que se plantearon de manera conceptual en la investigación.

Asimismo, es pertinente continuar optimizando los algoritmos de programación que gestionan los sensores y actuadores, de manera que las respuestas del sistema sean cada vez más precisas y oportunas. En fases futuras se sugiere integrar tecnologías avanzadas como inteligencia artificial o lógica difusa, que faciliten la anticipación a cambios climáticos y mejoren la toma de decisiones en tiempo real.

En cuanto a la sostenibilidad, se recomienda ampliar y fortalecer el sistema de energía fotovoltaica, garantizando no solo la autonomía del invernadero, sino también la escalabilidad del modelo hacia unidades de mayor tamaño. De igual forma, resulta necesario incorporar indicadores ambientales que midan de forma cuantitativa el ahorro de agua, la eficiencia energética y la reducción de emisiones, con el fin de evidenciar el impacto positivo del sistema en la gestión responsable de los recursos naturales.

Otro aspecto fundamental consiste en diseñar programas de capacitación y transferencia de conocimiento dirigidos a agricultores y técnicos. Esto permitirá garantizar la correcta operación, mantenimiento y apropiación tecnológica del sistema, favoreciendo la sostenibilidad del proyecto a largo plazo y facilitando su replicabilidad en otros contextos productivos.

Finalmente, se recomienda consolidar la logística interna del invernadero mediante protocolos de almacenamiento, trazabilidad y control de inventarios, asegurando que el diseño físico optimizado se traduzca en eficiencia operativa en todas las fases de producción.

## Referencias Bibliográficas

- ¿Qué es un controlador de carga solar?* | *AutoSolar Blog*. (n.d.). [https://autosolar.co/aspectos-tecnicos/que-es-un-controlador-de-carga-solar?srsltid=AfmBOorkqVFXmsebu9OvwVII2\\_dGhpM\\_EteuIyf7XgLzG-39mrdSRoOq](https://autosolar.co/aspectos-tecnicos/que-es-un-controlador-de-carga-solar?srsltid=AfmBOorkqVFXmsebu9OvwVII2_dGhpM_EteuIyf7XgLzG-39mrdSRoOq)
- ¿Qué es un controlador de carga solar?* | *AutoSolar Blog*. (n.d.). [https://autosolar.co/aspectos-tecnicos/que-es-un-controlador-de-carga-solar?srsltid=AfmBOorkqVFXmsebu9OvwVII2\\_dGhpM\\_EteuIyf7XgLzG-39mrdSRoOq](https://autosolar.co/aspectos-tecnicos/que-es-un-controlador-de-carga-solar?srsltid=AfmBOorkqVFXmsebu9OvwVII2_dGhpM_EteuIyf7XgLzG-39mrdSRoOq)
- ¿Qué es un inversor de corriente?* | *AutoSolar Blog*. (n.d.). [https://autosolar.pe/aspectos-tecnicos/que-es-un-inversor-de-corriente?srsltid=AfmBOop0Nn\\_Hpel-OzOcZUIojr\\_XhkGYexdmElyX4g6zGaDO0\\_bA3gZ3](https://autosolar.pe/aspectos-tecnicos/que-es-un-inversor-de-corriente?srsltid=AfmBOop0Nn_Hpel-OzOcZUIojr_XhkGYexdmElyX4g6zGaDO0_bA3gZ3)
- ¿Qué inversor para paneles solares necesitas?* | *Guía completa en AutoSolar*. (n.d.). <https://autosolar.pe/energia-solar/como-elegir-un-inversor-para-paneles-solares-guia-completa>
- 6 consejos para mejorar tus cultivos en invernaderos*. (n.d.). Blog | Tecnología Para La Agricultura -. <https://bloglatam.jacto.com/cultivos-en-invernaderos/>
- About Us*. (n.d.). Blynk.Io. <https://blynk.io/about-blynk>
- Admin. (2019, August 7). El control y la automatización en la agricultura. Compañía Nacional De Peritos Agrícolas. <https://conapa.es/el-control-y-la-automatizacion-en-la-agricultura/>
- administrator*. (s. f.). <https://elproductor.com/2022/11/resumen-del-mercado-global-del-jengibre-5/>
- AdminRotoplas. (2023, February 28). *Beneficios de los sistemas de riego en invernaderos - rieigo - blog*. Rieigo - Blog. <https://rieggo.com/blog/beneficios-de-los-sistemas-de-riego-en-invernaderos/>

AgriCola, A. T. *La logística en la agricultura, aporte oportuno de insumos-servicios*. Todos los

Derechos Reservados - agro-tecnologia-tropical.com. <https://www.agro-tecnologia-tropical.com/logistica.html>

Agricolus. (2025, febrero 13). *Sensores para la*

*agricultura*. <https://www.agricolus.com/es/tecnologias/sensores-para-la-agricultura/>

*Agroindustria, Sociedad y Ambiente*, 2(11), 4–18.

<https://revistas.uclave.org/index.php/asa/article/view/1792>

Agrosavia. (2020). *Buenas prácticas agrícolas para el establecimiento de cultivos hortícolas en ambientes protegidos*. Corporación Colombiana de Investigación

Agropecuaria. [https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/13469/43123\\_50544.pdf?isAllowed=y&sequence=1](https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/13469/43123_50544.pdf?isAllowed=y&sequence=1)

Andrade Cedeño, L. R., & Cedeño Barrionuevo, R. I. (2018). Rediseño de las etapas de secado y limpieza del proceso de producción de semilla de arroz para pequeños productores

<https://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/123456789/45481/D-CD88650.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Andreu, I. (2024, October 3). *Lean Manufacturing: ¿qué es y cuáles son sus principios?* APD

España. <https://www.apd.es/lean-manufacturing-que-es/>

Anexo 1 - *Código ventilación invernadero.pdf*. (n.d.). Google Docs.

[https://drive.google.com/file/d/1iaa8mzF6n60mNyj4J-eXzBd2y41\\_1Rbl/view](https://drive.google.com/file/d/1iaa8mzF6n60mNyj4J-eXzBd2y41_1Rbl/view)

Anexo 2 - *Código riego invernadero.pdf*. (n.d.). Google Docs.

<https://drive.google.com/file/d/1Ax2DbIR123nHP0Ii2hJIS5sJRQYi3cM/view>

Aparicio, M. P. (2020). *Energía solar fotovoltaica: 3a edición*. Marcombo.

<https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=XkxOEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1>



[898%2C3632%2C1484%2C0\\_0&invitationId=inv\\_45ef9d3f-582a-4a2c-a657-da2a4d21a2c7](https://blynk.io/invitationId=inv_45ef9d3f-582a-4a2c-a657-da2a4d21a2c7)

Blynk: una plataforma de software IoT de bajo código para empresas y desarrolladores . (sin fecha). Blynk.Io. <https://blynk.io/>

*Bomba de Agua Ajustable 12VDC - 240L/H - Electronilab.* (2025, September 12). Electronilab.

<https://electronilab.co/tienda/bomba-de-agua-sumergible-9-12vdc-500lh/?srsltid=AfmBOorhz0Nxz2nj73VDj2e7hYtwn2Gb5Zum3uOZO0wOBxquKcds4Is7>

Bozhurin, K. (2024, November 4). How to grow ginger: A step-by-step guide for beginners.

*GrowPlant.* <https://growplant.org/blog/how-to-grow-ginger/>

Caleño, C., Briñez, O. J., Yepes, D. A., & Rodríguez, S. J. V. (2023). DESARROLLO DE UNA PLATAFORMA DE TERRITORIOS INTELIGENTES PARA LA AGRICULTURA INTELIGENTE EN EL DEPARTAMENTO DEL TOLIMA. *Innovagro*, (02.).

<https://revistas.sena.edu.co/index.php/INNOVAGRO/article/download/6157/5944>

Campus, C. (2024, May 22). *Diferencias entre 3D y 2D: ¿cuáles son?* Universidad Europea

Creative Campus. <https://creativecampus.universidadeuropea.com/blog/diferencias-entre-3d-2d/>

Carranza, S. (2022b, septiembre 17). *CONOCIENDO AL ESP32*. TodoMaker.

<https://todomaker.com/blog/conociendo-al-esp32/>

Castaño, J. A. G., Vallejo, Á. F., Correa, J. A. T., Grajales, J. D. P., Aguirre, M. S. C., Posso, S. L., & Londoño, V. P. (2021). Distribución de plantas usando el método SLP: enseñada desde un juego serio. *I+ D Revista de Investigaciones*, 16(1), 165-179.

<https://sievi.udi.edu.co/ojs/index.php/ID/article/download/275/347>

Chamba, D. a. J., Gonzalez, W. V. P., Calva, A. Y. C., & Molina, N. E. E. (2023). Sistema de riego inteligente para el mantenimiento de áreas verdes en una institución educativa.

*Revista Científica Y Tecnológica UPSE*, 10(2), 50–63.

<https://doi.org/10.26423/rctu.v10i2.740>

*Cómo Elegir un Regulador de Carga Solar: PWM o MPPT*. (n.d.). MPPTSOLAR.

<https://www.mpptsolar.com/es/como-elegir-regulador-de-carga-solar.html>

Congreso de Colombia. (1993). Ley 99 de 1993. Diario Oficial No.

41.146.[https://www.minambiente.gov.co/wp-](https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/ley_99_de_1993.pdf)

[content/uploads/2021/10/ley\\_99\\_de\\_1993.pdf](https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/ley_99_de_1993.pdf)

Congreso de Colombia. (2006). Ley 1014 de 2006: Fomento a la cultura del emprendimiento.

Diario Oficial No.

46.164.<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=19430>

Congreso de Colombia. (2018). Ley 1931 de 2018: Por la cual se establecen directrices para la gestión del cambio climático.

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=87765>

Corporativa, I. (n.d.). *¿Cómo funcionan las placas solares fotovoltaicas?* Iberdrola.

[https://www.iberdrola.com/conocenos/nuestro-modelo-innovacion/como-funcionan-](https://www.iberdrola.com/conocenos/nuestro-modelo-innovacion/como-funcionan-placas-solares-fotovoltaicas)

[placas-solares-fotovoltaicas](https://www.iberdrola.com/conocenos/nuestro-modelo-innovacion/como-funcionan-placas-solares-fotovoltaicas)

*Cuántos paneles solares necesito*. (n.d.). <https://autosolar.co/cuantos-paneles-solares-necesito>

*Cultivo de jengibre en invernadero: una guía completa de plantación* | *Tecnología Agrícola*. (s. f.).

<https://es.modernagriculturefarm.com/tech/1001002310.html>

*DAP Dop*. (n.d.). Ept. <https://ept.pe/index.php/component/sppagebuilder/?view=page&id=90>

*Decreto 3075 de 1997 - Gestor Normativo.* (n.d.). Función Pública.

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=3337>

Departamento Nacional de Planeación. (2016). *Pérdidas y desperdicio de alimentos en Colombia: diagnóstico y estrategias para su reducción.* Bogotá D.C., Colombia.

<https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/Publicaciones/P%C3%A9rdida%20y%20desperdicio%20de%20alimentos%20en%20colombia.pdf>

Duarte, L., Ortiz, L., & Acosta, J. (s. f.). *Fase 3 - Conceptos* [Diapositivas].

[https://www.canva.com/design/DAGzc4RyJLQ/t8U8yAoh4k0nQDZBNq9jsQ/edit?utm\\_content=DAGzc4RyJLQ&utm\\_campaign=designshare&utm\\_medium=link2&utm\\_source=sharebutton](https://www.canva.com/design/DAGzc4RyJLQ/t8U8yAoh4k0nQDZBNq9jsQ/edit?utm_content=DAGzc4RyJLQ&utm_campaign=designshare&utm_medium=link2&utm_source=sharebutton)

ecogreensolar. (n.d.). *Controlador de carga solar Epever 12/24V 30A | Eco Green Solar.* Eco

Green Solar. [https://www.ecogreensolar.co/producto/controlador-de-carga-solar-epever-12-24v-](https://www.ecogreensolar.co/producto/controlador-de-carga-solar-epever-12-24v-30a/?srsltid=AfmBOoqTRMRFO3uazL1ZC8dGsuTyZskD6MnFSdhX7ot207VO5iswuAif)

[30a/?srsltid=AfmBOoqTRMRFO3uazL1ZC8dGsuTyZskD6MnFSdhX7ot207VO5iswuAif](https://www.ecogreensolar.co/producto/controlador-de-carga-solar-epever-12-24v-30a/?srsltid=AfmBOoqTRMRFO3uazL1ZC8dGsuTyZskD6MnFSdhX7ot207VO5iswuAif)

Encisoc, E. (2018, June 6). *Horticultura de Utadeo, el invernadero más moderno de Colombia.*

Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.

<https://www.utadeo.edu.co/es/noticia/especiales/home/1/horticultura-de-utadeo-el-invernadero-mas-moderno-de-colombia>

Equipo de Redacción PartesDel.com & Equipo de Redacción PartesDel.com. (2018, 12 abril).

*Partes de la bomba de agua.* Partesdel.com.

[https://www.partesdel.com/partes\\_de\\_la\\_bomba\\_de\\_agua.html](https://www.partesdel.com/partes_de_la_bomba_de_agua.html)

*ESP32 - Soil Moisture Sensor | ESP32 Tutorial.* (n.d.). ESP32 Tutorial.

<https://esp32io.com/tutorials/esp32-soil-moisture-sensor>

*ESP32-DeVKITC v4 - ESP32 WiFi Micro-USB.* (s. f.). Naylamp Mechatronics - Perú.

<https://naylampmechatronics.com/espressif-esp/1011-esp32-devkitc-v4-esp32-wifi-micro-usb.html>

Feng, N. (2023, February 28). *Sensor Cable and connectors.* OMCH.

<https://www.omchsmeps.com/sensor-cable-and-connectors/>

Framad, P. (2021a, marzo 2). Los cables eléctricos: componentes y función. Framad.

<https://share.google/zYEAZ0pRd3COGU511>

Función Pública. (s. f.). Ley 1931 de 2018 – Gestor Normativo.

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=87765>

Giménez, A. M., Montoli, P., Curutchet, M. R., & Ares, G. (2022). Strategies to reduce losses and waste of fruits and vegetables in the last stages of the agrifood-chain: advances and challenges. *Agrociencia Uruguay*, 25 (NE2), e813.

<https://doi.org/10.31285/AGRO.25.813>

Gisselle, B. A., Castro, R., Gómez, Á. T., & García, Á. Área del Conocimiento de Agricultura.

<https://core.ac.uk/download/pdf/622492138.pdf>

González, H. G., & Prado, C. A. E. (2021). Aplicación de la herramienta SIPOC a la cadena de suministro interna de una empresa distribuidora de medicamentos. *Revista Lumen*

*Gentium*, 5(2), 119-134.

<https://mail.revistas.unicatolica.edu.co/revista/index.php/LumGent/article/download/361/207>

*Growing ginger at home.* (2025, February 13). Ext.vt.edu. [https://ext.vt.edu/lawn-garden/Timely\\_Topics/Ginger.html](https://ext.vt.edu/lawn-garden/Timely_Topics/Ginger.html)

*Guía completa sobre cómo instalar paneles solares en 4 pasos | Aprende con AutoSolar.* (n.d.). [https://autosolar.co/energia-solar/guia-completa-para-instalar-paneles-solares-en-4-pasos?srsId=AfmBOopvV\\_oJxW0IZ1LwOL-D7aYsaDI6L\\_s978vDmgRWmzBgNnyis0G6](https://autosolar.co/energia-solar/guia-completa-para-instalar-paneles-solares-en-4-pasos?srsId=AfmBOopvV_oJxW0IZ1LwOL-D7aYsaDI6L_s978vDmgRWmzBgNnyis0G6)

Guzmán Albores, J. M., Matuz Cruz, M. de J., Arana Llanes, J. Y., López Carrasco, E., Gómez Vázquez, V., & González Cárdenas, N. (2024). Avances y perspectivas de la agricultura de precisión para la sostenibilidad agrícola *XIKUA Boletín Científico De La Escuela Superior De Tlahuelilpan*, 12(24), 1-6. <https://doi.org/10.29057/xikua.v12i24.12790>

Herman, F. (2022, 6 abril). ¿Qué son las bombas de agua para riego? *Futurepump*. <https://futurepump.com/que-son-las-bombas-de-agua-para-riego/>

Hernández Sánchez, E. (2021). Diseño e implementación de un invernadero inteligente a escala con dimensionamiento fotovoltaico para su posible sostenimiento eléctrico. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla <https://hdl.handle.net/20.500.12371/15567>

Humanizada, T. (2018, November 6). *Blynk, plataforma de internet de las cosas en la red.* Tecnología Humanizada. <https://humanizationoftechnology.com/blynk-plataforma-de-internet-de-las-cosas-en-la-red/revista/2018/volumen-4-2018/11/2018/>

*Importancia del Fertirriego en la Tecnificación de Cultivos | Intagri S.C.* (n.d.). <https://www.intagri.com/articulos/agua-riego/importancia-del-fertirriego-en-la-tecnificacion-de-cultivos>

Intellect, M. R. (2024, June 18). *Control climático: cómo los invernaderos inteligentes usan la tecnología para vencer a los elementos.* Market Research Intellect.

<https://www.marketresearchintellect.com/es/blog/climate-control-how-smart-greenhouses-use-technology-to-beat-the-elements/>

*Interfaz Blynk IoT Mobile - Humedad y temperatura.* (n.d.). YouTube.

<https://www.youtube.com/shorts/iwSerTNJ4R8>

*Invernaderos: un modelo para ejercer control de factores ambientales en los cultivos.* (2021).

Insagrin. <https://insagrin.com/2021/06/25/invernaderos-un-modelo-para-ejercer-control-de-factores-ambientales-en-los-cultivos/>

ISOTools. (2025, 19 agosto). *Norma ISO 14001: qué es, para qué sirve y objetivos.* Software

ISO. <https://www.isotools.us/normas/medio-ambiente/iso-14001/>

Jaramillo Henao, G y Zapata Márquez, L. (2008). Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos en Colombia. Universidad de Antioquia. <http://hdl.handle.net/10495/45>

Julián, C. (2025, 11 mayo). *Conociendo el entorno de Desarrollo (IDE) de Arduino.* Ingtelecto | Electrónica, Robótica y IoT. <https://ingtelecto.com/conociendo-el-entorno-de-desarrollo-ide-de-arduino/>

Leidy Duarte. (2025, 4 septiembre). [Blynk PC] [Video]. YouTube.

<https://youtu.be/OWZEHGBb4bM>

Leidy Duarte. (2025, 7 agosto). Invernadero inteligente [Video]. YouTube.

<https://www.youtube.com/watch?v=AeimpOBOuhM>

*Ley 1014 de 2006.* (2006). *En Departamento Administrativo de la Función Pública.*

*Departamento Administrativo de la Función Pública.*

[https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma\\_pdf.php?i=18924](https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=18924)

*Ley 99 de 1993 - Gestor Normativo.* (n.d.). *Función Pública.*

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=297>

Maker y Lecciones de Programación Para Todos los Niveles.

<https://www.profetolocka.com.ar/2022/07/04/midiendo-temperatura-y-humedad-con-dht22-usando-esp8266-y-esp32/>

Mateo, J. (2023, May 5). *¿Cuáles son los tipos de paneles solares y cómo funcionan?* POWEN.

<https://powen.es/tipos-paneles-solares/>

*Mercado latinoamericano de jengibre | Tamaño de la industria, participación, crecimiento, informe, análisis 2025-2034.* (s. f.). Expert Market Research.

<https://www.informesdeexpertos.com/informes/mercado-latinoamericano-de-jengibre>

Ministerio del Medio Ambiente. (1993). Ley 99 de 1993: Normatividad ambiental en Colombia.

<https://www.minambiente.gov.co>

MÓDULO 4: REGULADORES, INVERSORES Y BATERÍAS. (s. f.). *PROSUMIDORES*.

<https://www.santafe.gov.ar/ms/academia/wp-content/uploads/sites/27/2019/12/Módulo-4-Inversores-reguladores-baterías.pdf>

*Módulo LM2596 Convertidor de Voltaje DC-DC Reductor Buck 1.25V-35V - Electronilab.*

(2025, August 12). Electronilab. [https://electronilab.co/tienda/modulo-lm2596-](https://electronilab.co/tienda/modulo-lm2596-convertidor-de-voltaje-dc-dc-buck-1-25v-35v/?srsltid=AfmBOoriR1Z8cy_Vby2y9iSqx47zIE_bGGPI8puHtmXFxDkDLzoOO6Bz)

[convertidor-de-voltaje-dc-dc-buck-1-25v-](https://electronilab.co/tienda/modulo-lm2596-convertidor-de-voltaje-dc-dc-buck-1-25v-35v/?srsltid=AfmBOoriR1Z8cy_Vby2y9iSqx47zIE_bGGPI8puHtmXFxDkDLzoOO6Bz)

[35v/?srsltid=AfmBOoriR1Z8cy\\_Vby2y9iSqx47zIE\\_bGGPI8puHtmXFxDkDLzoOO6Bz](https://electronilab.co/tienda/modulo-lm2596-convertidor-de-voltaje-dc-dc-buck-1-25v-35v/?srsltid=AfmBOoriR1Z8cy_Vby2y9iSqx47zIE_bGGPI8puHtmXFxDkDLzoOO6Bz)

Muther, R. 1968. Planificación y proyección de la empresa industrial (Método SLP). Editorial

Técnicos Asociados S.A., Barcelona (España). [https://richardmuther.com/wp-](https://richardmuther.com/wp-content/uploads/2016/07/Spanish-SLP.pdf)

[content/uploads/2016/07/Spanish-SLP.pdf](https://richardmuther.com/wp-content/uploads/2016/07/Spanish-SLP.pdf)

Muther, R. 1981. Distribución en planta. Segunda Edición. Editorial HispanoEuropea. Barcelona

(España). <https://richardmuther.com/wp-content/uploads/2016/07/Spanish-PPL.pdf>

*New ESP-IDF on ESP32-S3 Project - Wokwi Simulator.* (n.d.).

<https://wokwi.com/projects/new/esp-idf-esp32-s3>

Novagric. (2024, July 24). ¿Qué es un invernadero inteligente? Novagric.

<https://novagric.com/que-es-un-invernadero-inteligente/>

Ochoa-Arias, Paúl, & Delgado-Pinos, Omar Andrés. (2020). Modelo de registro fotogramétrico 2D y 3D del patrimonio edificado de Cuenca. *Universitas-XXI, Revista de Ciencias Sociales y Humanas*, (33), 163-180. <https://doi.org/10.17163/uni.n33.2020.08>

Organización Internacional de Normalización. (2015). ISO 14001:2015: Sistemas de gestión ambiental -Requisitos con orientación para su uso. ISO.

<https://www.iso.org/standard/60857.html>

Pérez Monsalve, J. (2019). Un invernadero inteligente para optimizar los cultivos. *Revista Universidad EAFIT*, 54(173), 136-139.

<https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/16953/document%20-%202020-06-19T163716.660.pdf?sequence=2>

POWEN. (2022). *Instalación de Placas Solares en Invernaderos - POWEN.*

<https://powen.es/instalaciones/sector-agroalimentario/invernaderos/>

Quiroga Medina, C. C., Mora Perdomo, M. D., & Cuéllar Medina, L. A. (2018). Sistema automatizado de riego, fertilización y fumigado para cultivo de habichuela bajo invernadero, monitoreado mediante aplicación móvil [Trabajo de grado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia]. Repositorio Institucional UNAD

<https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/25231/%20mdmorap.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Reyes, J. (2023, 31 octubre). ▷ Guía completa sobre el cultivo de jengibre: consejos, técnicas y secretos ✓. *Vida Sustentable*. <https://vida-sustentable.com/como-se-cultiva-el-jengibre/>

Ricardo, J. A. P. (n.d.). modelo de gestión logística de la cadena de abastecimiento agroalimentaria de la ciudad de bogotá. Edu.Co. Retrieved March 11, 2025. <https://repository.universidadean.edu.co/server/api/core/bitstreams/e5211761-5204-46cd-b1ce-f038562f6049/content>

RIEGO. (n.d.). Canva.

[https://www.canva.com/design/DAGys78ZoOg/XeoO7ZcafXuRXZmQ\\_QgtIA/edit?ut%E2%80%A6=](https://www.canva.com/design/DAGys78ZoOg/XeoO7ZcafXuRXZmQ_QgtIA/edit?ut%E2%80%A6=)

Rode, P. C., Gamarra, R. R., Espinosa, H. P., Guizar, A. G. R., Daz, D. R., Cruz, P. P., & Gutierrez, A. M. (2010). Invernadero inteligente basado en un enfoque sustentable para la agricultura mexicana. In *Memorias del VIII Congreso Internacional sobre Innovación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca Morelos, México* (pp. 623-630).

[https://www.researchgate.net/profile/Arturo-Molina/publication/264045356\\_Invernadero\\_Inteligente\\_basado\\_en\\_un\\_Enfoque\\_Sustentable\\_para\\_la\\_Agricultura\\_Mexicana/links/555bcac108ae8f66f3ad7e85/Invernadero-Inteligente-basado-en-un-Enfoque-Sustentable-para-la-Agricultura-Mexicana.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Arturo-Molina/publication/264045356_Invernadero_Inteligente_basado_en_un_Enfoque_Sustentable_para_la_Agricultura_Mexicana/links/555bcac108ae8f66f3ad7e85/Invernadero-Inteligente-basado-en-un-Enfoque-Sustentable-para-la-Agricultura-Mexicana.pdf)

Rodríguez Velandia, A. (2020). Automatización de un sistema de siembra y riego.

Universidad de los Andes. <https://hdl.handle.net/1992/45087>

Rubio, J. C. G., & Rodriguez, A. A. R. (2024). IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE CONTROL AMBIENTAL EN CULTIVO DE CHAMPIÑÓN PARÍS EN EL CAÑÓN DEL COMBEIMA. *Innovagro*, (03).

<https://revistas.sena.edu.co/index.php/INNOVAGRO/article/view/6761/6450>

Sanabria, B. (2025, June 2). 7 razones para usar SIPOC para su Customer Journey Map. ICX Consulting. <https://blog.icx.co/es/estrategia/sipoc/7-razones-para-usar-sipoc-para-su-customer-journey-map>

Santander, B. (2023). Invernaderos inteligentes, qué son y cómo funcionan. *Banco Santander*. <https://www.bancosantander.es/blog/pymes-negocios/invernaderos-inteligentes-que-son>

Schiller, J. (2025, August 20). *Systematic Layout Planning (SLP)*. visTABLE® Software. [https://www.vistable-com.translate.google.com/blog/factory-layout-design/systematic-layout-planning-slp/?\\_x\\_tr\\_sl=en&\\_x\\_tr\\_tl=es&\\_x\\_tr\\_hl=es&\\_x\\_tr\\_pto=rq](https://www.vistable-com.translate.google.com/blog/factory-layout-design/systematic-layout-planning-slp/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=rq)

*Sensor capacitivo de humedad del suelo – Sonrobots*. (s. f.).

<https://sonrobots.com/producto/sensor-capacitivo-de-humedad-del-suelo/>

*Sensor capacitivo de humedad del suelo*. (2024, diciembre 6).

<https://www.niuboltech.com/Product-knowledge/Capacitive-soil-moisture-sensor-16.html>

*Sensor de humedad de suelo capacitivo VI.2*. (s. f.). Naylamp Mechatronics - Perú.

<https://naylampmechatronics.com/sensores-temperatura-y-humedad/538-sensor-de-humedad-de-suelo-capacitivo-v1.html>

*Sensor de humedad del suelo capacitivo vs. resistivo*. (2025, junio 15).

<https://www.niuboltech.com/Product-knowledge/capacitive-vs-resistive-soil-moisture-sensor.html>

*Sensor de temperatura y humedad relativa DHT22 (AM2302)*. (n.d.). Naylamp Mechatronics -

Perú. Retrieved August 21, 2025. <https://naylampmechatronics.com/sensores-temperatura-y-humedad/58-sensor-de-temperatura-y-humedad-relativa-dht22-am2302.html>

- Sociedad de Agricultores de Colombia. (2025). *Contexto del mercado laboral agropecuario – Revista Nacional de Agricultura (Ed. 1056)*. <https://sac.org.co/contexto-mercado-laboral-agropecuario-2024/>
- Solarama. (2022, August 19). ¿Qué es y cómo calcular hora solar pico? *Solarama Paneles solares México*. <https://solarama.mx/blog/como-calcular-hora-solar-pico/>
- Solarplak. (2023, July 20). *Cómo elegir baterías para paneles solares - Blog de energía solar*. Blog De Energía Solar. <https://solarplak.es/energia/como-elegir-baterias-para-paneles-solares/>
- Soler Villanueva, D y Triana Calderón, B. (2023). Diseño de un invernadero con control de temperatura y humedad para ser utilizado en la ciudad de Ibagué con fines de cultivo y propagación de plantas en vía de extinción. Universidad de Ibagué. <https://repositorio.unibague.edu.co/server/api/core/bitstreams/7fbfc2fc-ce11-46e7-b6c9-08a9464e018a/content>
- SunFields Europe. (2025, May 2). *Voltaje de placas solares: qué es, tipos, cómo elegirlo | SunFields*. SunFields | Expertos En Energía Fotovoltaica Para Ahorro Energético En España. <https://www.sfe-solar.com/paneles-solares/voltaje/>
- Tektelic. (2024). *The Whole Truth about Smart Farming: Pros and Cons you Need to Know*. TEKTELIC. <https://tektelic.com/expertise/the-whole-truth-about-smart-farming-pros-and-cons-you-need-to-know/o>
- Tolocka, E., & Tolocka, E. (2022, 1 octubre). *Tutorial: Cómo utilizar el DHT22 con ESP8266 y ESP32 en Arduino | profe Tolocka*. Profe Tolocka | Explora Tutoriales Gratuitos de Electricidad y Electrónica. Aprende A Tu Ritmo Con Proyectos

Torres, D., Mendoza, B., Gomez, C., Almas, L., Hernandez, W., Carrero, L., Castillo, E., Makhoul, I., & Escalona, A. (2018). Agroindustria, sociedad y ambiente. *Agroindustria, Sociedad y Ambiente*, 2(11), 4–18.

<https://revistas.uclave.org/index.php/asa/article/view/1792>

Tutiempo Network, S.L. (n.d.). *Radiación solar en Ibagué (Colombia) - Energía solar*.

www.tutiempo.net. <https://www.tutiempo.net/radiacion-solar/ibague.html>

UCL. (2 de junio de 2021). *¿Cuál es la importancia de un diagrama de flujo?* Cultura en línea.

<https://www.ucl.ac.uk/culture-online/case-studies/2021/jun/what-significance-flowchart>

*Una semilla autorizada hace la diferencia en economía, seguridad alimentaria y competitividad del campo* | ICA. (s. f.). Portal Corporativo ICA.(2024).

<https://www.ica.gov.co/noticias/una-semilla-autorizada-hace-la-diferencia-en-econo>

Varela, C. (2025, 24 mayo). Calculadora de iluminación LED: Potencia, PPF, PPFD y distancia del LED a tu planta | Saltón Verde. *Saltón Verde*. <https://saltonverde.com/calculadora-de-iluminacion-led>

[iluminacion-led](https://saltonverde.com/calculadora-de-iluminacion-led)

Veloz Pereda, J. A., Vásquez Coronado, M. H., & Arrascue Becerra, M. A. (2020). MEJORA DE DISTRIBUCIÓN DE PLANTA, PARA INCREMENTAR LA PRODUCTIVIDAD, EN LA EMPRESA TIMONES HIDRÁULICOS VELOZ DE LA CIUDAD DE TRUJILLO. *INGENIERÍA: Ciencia, Tecnología e Innovación*, 7(2).

<https://doi.org/10.26495/icti.v7i2.1494>

*Ventiladores Bajo Canalón: Mejor Clima en Invernaderos*. (s. f.). vosterman Ventilation.

<https://www.vostermans.com/es/ventilation/recursos/casos-practicos/mejor-clima-en-el-invernadero-con-ventiladores-bajo-el-canalon-de-cultivo>

Zeroadmin. (2024, August 5). Aprenda a calcular el tamaño y la capacidad de su sistema solar.

*Ambiente Solar.* <https://ambientesolar.com.co/calcular-el-tamano-y-la-capacidad-de-su-sistema-solar/>

## Apéndices

### Apéndice A

*Invernadero Inteligente*

[Invernadero Inteligente](#)

**Apéndice B**

*Fase 3 – Conceptos*

[Fase 3 - Conceptos](#)

**Apéndice C***Blynk PC*[Blynk PC](#)

## **Apéndice D**

*Interfaz Blynk IoT Mobile*

[Interfaz Blynk IoT Mobile - Humedad y temperatura](#)

**Apéndice E**

*Código Ventilación Invernadero*

[Código ventilación invernadero.pdf](#)

**Apéndice F**

*Código Riego Invernadero*

[Código riego invernadero.pdf](#)