

**AUTOMATIZACIÓN DEL FERTIRRIEGO CON MONITOREO REMOTO DE LAS  
VARIABLES HUMEDAD AMBIENTE, TEMPERATURA AMBIENTE, HUMEDAD DEL  
SUELO Y CO<sub>2</sub> COPARA UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN VERTICAL DE VERDURAS  
BAJO UN INVERNADERO VERDE**

**EDISON RESTREPO VERGARA**

**INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
TECNOLOGÍA EN SISTEMAS MECATRÓNICOS CON ÉNFASIS EN  
AGRÓNICA  
MEDELLÍN  
2025**

**AUTOMATIZACIÓN DEL FERTIRRIEGO CON MONITOREO REMOTO DE LAS  
VARIABLES HUMEDAD AMBIENTE, TEMPERATURA AMBIENTE, HUMEDAD DEL  
SUELO PARA UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN VERTICAL DE VERDURAS BAJO UN  
INVERNADERO VERDE**

**EDISON RESTREPO VERGARA**

**Trabajo de grado para optar al título de Tecnólogo en Sistemas Mecatrónicos con  
énfasis en Agrónica**

**Asesor**

**Bayardo Emilio Cadavid Gómez**

**Magister en Automatización y Control Industrial**

**INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
TECNOLOGÍA EN SISTEMAS MECATRÓNICOS CON ÉNFASIS EN  
AGRÓNICA**

**MEDELLÍN**

**2025**

## Contenido

<b>Introducción</b> .....	9
<b>1 Planteamiento del problema</b> .....	10
<b>1.1 Descripción</b> .....	10
<b>1.2 Formulación</b> .....	10
<b>2 Justificación</b> .....	11
<b>3 Objetivos</b> .....	12
<b>3.1 Objetivo general</b> .....	12
<b>3.2 Objetivos específicos</b> .....	12
<b>4 Marco teórico</b> .....	13
<b>4.1 Estado del arte</b> .....	13
4.1.1 Sistemas de producción vertical automatizados.....	13
4.1.2 Tecnologías de automatización y monitoreo remoto .....	14
4.1.3 Integración de inteligencia artificial y plataformas de gestión .....	14
4.1.4 Beneficios ambientales de los cultivos verticales .....	15
<b>4.2 Marco tecnológico</b> .....	16
4.2.1 Tecnologías involucradas en los sistemas verticales .....	16
4.2.2 Estructura rotativas o verticales automatizadas .....	16
4.2.3 Automatización robótica y logística interna .....	17
4.2.4 Sensores y dispositivos IoT.....	17
4.2.5 Plataformas de control y gestión.....	17
4.2.6 Inteligencia artificial y análisis predictivo .....	17
<b>4.3 Conclusión</b> .....	18
<b>5 Metodología</b> .....	19
5.1 Tipo de proyecto.....	19
5.2 Método.....	20
5.3 Instrumentos de recolección de información.....	20
5.3.1 Fuentes primarias .....	20
5.3.2 Fuentes secundarias .....	21
<b>6 Resultados</b> .....	22

6.1	Construcción de un sistema mecánico con rotación vertical .....	22
6.2	Construcción de un invernadero utilizando materiales reciclables.....	23
6.3	Implementación del sistema de monitoreo remoto de variables ambientales.....	24
6.3.1	Sensores utilizados para la medición de variables .....	25
6.4	Implementación del sistema de automatización .....	29
<b>7</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>31</b>
<b>8</b>	<b>Recomendaciones .....</b>	<b>32</b>
<b>9</b>	<b>Referencias bibliográficas .....</b>	<b>33</b>
<b>10</b>	<b>Bibliografía .....</b>	<b>35</b>
<b>11</b>	<b>Referencias bibliográficas utilizadas en la elaboración de este documento. ¡Error! Marcador no definido.</b>	

## Listado de figuras

Ilustración 1 Sistema giratorio bidimensional .....	22
Ilustración 2 Invernadero Verde. Elaborado con botellas PET .....	23
Ilustración 3 ESP32.....	24
Ilustración 4 Dashboard construido .....	25
Ilustración 5 Sensor CO <sub>2</sub> .....	26
Ilustración 6 Sensores de humedad y temperatura de ambiente y CO <sub>2</sub> .....	28
Ilustración 7 Sensor de humedad de suelo .....	28
Ilustración 8 Sistema de riego y Fertirriego.....	30

## Resumen

### **AUTOMATIZACIÓN DEL FERTIRRIEGO CON MONITOREO REMOTO DE LAS VARIABLES HUMEDAD AMBIENTE, TEMPERATURA AMBIENTE, HUMEDAD DEL SUELO PARA UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN VERTICAL DE VERDURAS BAJO UN INVERNADERO VERDE**

**Edison Restrepo Vergara**

El presente proyecto surge como respuesta a la necesidad de proponer soluciones sostenibles y automatizadas para espacios reducidos. El objetivo de este proyecto fue construir, automatizar el fertirriego y monitorear remotamente las variables climáticas de un sistema producción vertical de hortalizas colocado en una estructura rotativa, alojado este en interior de un invernadero elaborado con material reciclable PET, además de ser controlado y monitoreado remotamente mediante una tarjeta ESP 32, la humedad del suelo, el CO<sub>2</sub> y las variables climáticas humedad del ambiente, la temperatura del ambiente, Para su desarrollo se utilizaron materiales reciclables de bajo costo y componentes electrónicos accesibles. El sistema mostro un funcionamiento estable recolectando datos de las variables y enviándolos remotamente a una aplicación construida en la plataforma NODE-RED, ejecutando las rutinas de fertirriego eficientemente y validando el ahorro de espacio para el cultivo y crecimiento de las plantas. Se puede concluir que el sistema es una alternativa viable, replicable de bajo costo para mejorar la producción en entornos urbanos y rurales, al tiempo que promueve el uso de tecnologías limpias y sostenibles en la agricultura.

*Palabras claves:* agricultura vertical, ESP32, sensores, automatización.

## Abstract

This project emerges as a response to the need for sustainable and automated solutions in limited spaces. The objective was to design, construct, and automate a fertigation system while remotely monitoring climate variables in a vertical vegetable production system installed on a rotating structure. The system was housed inside a greenhouse built with recyclable PET materials and controlled via an ESP32 board. It monitored soil moisture, CO<sub>2</sub> levels, and environmental variables such as ambient humidity and temperature. Low-cost recyclable materials and accessible electronic components were used for its development. The system demonstrated stable operation by collecting data from all variables and transmitting them remotely to an application built on the NODE-RED platform. It efficiently executed fertigation routines and validated space-saving benefits for crop cultivation and plant growth. The project concludes that this system is a viable, low-cost, and replicable alternative to improve food production in both urban and rural environments, while also promoting the use of clean and sustainable technologies in agriculture.

Key words: vertical farming, ESP32, sensors, automation.

## Glosario

**Cultivo vertical:** método de cultivo que dispone las plantas en estructuras verticales, optimizando el espacio disponible, especialmente útil en áreas urbanas o con limitaciones de terreno.

**ESP32:** microcontrolador de bajo costo con conectividad Wifi y Bluetooth, ampliamente utilizado en proyectos de automatización y monitoreo por su capacidad de procesamiento y versatilidad.

**Fertirriego:** técnica de agricultura que combina la fertilización y el riego, aplicando fertilizantes a través del agua de riego para nutrir las plantas de forma eficiente. Permite una distribución más precisa y frecuente de nutrientes, reduciendo el desperdicio y mejorando la eficiencia del uso del agua.

**Material reciclado PET:** plástico reutilizado, principalmente proveniente de botellas (Polietileno Tereftalato), empleado como componente estructural del sistema de cultivo con fines ecológicos.

**Monitoreo remoto:** supervisión de variables del sistema desde una ubicación externa, a través de dispositivos conectados a Internet o redes locales, permitiendo el control en tiempo real.

**Riego:** es la práctica de aplicar agua al suelo para mantener la humedad necesaria para el crecimiento de los cultivos cuando la lluvia no es suficiente. Su objetivo es proporcionar agua a las plantas de manera controlada, evitando tanto la falta como el exceso de humedad.

## Introducción

Este proyecto de grado tiene como objetivo implementar un sistema automatizado de fertirriego con monitoreo remoto de variables como humedad del suelo, temperatura ambiente, humedad relativa y concentración de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), aplicado a un cultivo vertical de verduras dentro de un invernadero construido con materiales reciclables. El tema surge como respuesta a la necesidad de buscar soluciones sostenibles y eficientes para la producción de alimentos en espacios urbanos o con limitada disponibilidad de tierra cultivable.

La razón principal para realizar este trabajo es la motivación personal por integrar tecnologías accesibles y limpias al sector agrícola, promoviendo prácticas que reduzcan el consumo de recursos como el agua y los fertilizantes, y que a la vez faciliten la gestión remota de cultivos, especialmente en contextos donde la supervisión constante no es posible.

El desarrollo del proyecto se pensó como una solución práctica y replicable, combinando principios de ingeniería mecatrónica, sensores ambientales, plataformas de visualización y estructuras reutilizables. El método empleado consistió en el diseño, construcción y prueba de un sistema físico y electrónico, usando microcontroladores ESP32, sensores especializados y un sistema de riego automatizado alimentado por energía eléctrica, todo controlado a distancia.

Entre las principales limitaciones se encontraron el acceso a ciertos componentes de alta precisión, el presupuesto disponible para materiales y equipos, y el tiempo requerido para validar el comportamiento del sistema en condiciones reales de cultivo. Sin embargo, estas limitaciones también impulsaron la creatividad y la búsqueda de soluciones viables con lo que estaba al alcance, logrando cumplir los objetivos propuestos.

## **1 Planteamiento del problema**

### **1.1 Descripción**

La urbanización acelerada viene generando una demanda ascendente de alimentos frescos en las ciudades o municipios muy poblados. Se reducen las disponibilidades de tierras cultivables, esto lleva a que las personas recurran a cadenas de distribución de productos agrícolas para el consumo humano costosas.

Además, el modelo agrícola tradicional presenta algunos factores negativos en su sostenibilidad, como es el uso excesivo de agua, nutrientes químicos, que ocasionan un impacto ambiental y deterioro de los suelos.

### **1.2 Formulación**

¿Es posible construir un sistema que permita ahorrar espacio en el cultivo de hortalizas, de forma que se pueda automatizar el riego y fertirriego y monitorear remotamente las variables humedad del suelo, el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y las variables climáticas, humedad ambiente, temperatura ambiente?

## 2 Justificación

La automatización del fertirriego y el monitoreo de variables ambientales en sistemas de producción vertical ofrece una solución integral para mejorar la eficiencia, productividad y sostenibilidad agrícola. Esto se logra mediante:

- **Optimización de Recursos:** Dosificación precisa de nutrientes y agua, reduciendo el desperdicio y promoviendo una gestión más eficiente de recursos.
- **Mejora en la Calidad y Cantidad de la Producción:** Mantenimiento de condiciones óptimas para el crecimiento de plantas, resultando en cosechas más abundantes y de mejor calidad.
- **Reducción de Costos y Mejora en la Eficiencia:** Menor dependencia de la intervención manual, lo que reduce costos laborales y mejora la eficiencia operativa.
- **Gestión Precisa y Resiliente:** Capacidad de realizar ajustes rápidos ante cambios ambientales, aumentando la resiliencia del sistema.
- **Sostenibilidad y Responsabilidad Ambiental:** Promoción de prácticas agrícolas más sostenibles, reduciendo el impacto ambiental y contribuyendo a la seguridad alimentaria a largo plazo.

### 3 Objetivos

#### 3.1 Objetivo general

Implementar el fertirriego y el monitoreo remoto de las variables humedad ambiente, temperatura ambiente, humedad de suelo, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), para un sistema de producción vertical de verduras bajo un invernadero verde.

#### 3.2 Objetivos específicos

- Implementar un sistema de monitoreo remoto mediante el microcontrolador ESP32 para las variables. humedad ambiente, temperatura ambiente, humedad de suelo, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).
- Construir un invernadero utilizando materiales reciclables como el PET.
- Construir un sistema mecánico con rotación vertical para la producción de verduras.
- Implementar un sistema de automatización que permita suministrar oportunamente el riego y fertirriego a un cultivo de verduras con rotación vertical.

## 4 Marco teórico

### 4.1 Estado del arte

La agricultura vertical representa una alternativa eficiente frente a los retos de la agricultura tradicional, especialmente en zonas urbanas y espacios limitados. Esta modalidad, al integrar tecnologías emergentes como sistemas rotativos, sensores, redes IoT y plataformas de control remoto, permite optimizar la producción de alimentos con un menor uso de recursos y una mayor eficiencia en la gestión agronómica. A continuación, se presenta una revisión del estado del arte que aborda diversos enfoques sobre sistemas de producción vertical, sus mecanismos de automatización y capacidades de monitoreo remoto.

#### 4.1.1 Sistemas de producción vertical automatizados

Existen diversos tipos de sistemas de producción vertical, siendo los más destacados los estanterías fijas, estructuras rotativas y módulos modulares automatizados. Según Dürr EcoY (2023), los sistemas rotativos permiten mejorar la captación solar de las plantas al rotarlas durante el día, lo que maximiza el uso del espacio y la eficiencia energética. Este diseño también facilita la automatización del riego, la iluminación artificial y la recolección (Dürr, 2023).

Por su parte, Swisslog (2023) presenta soluciones de automatización en agricultura vertical mediante el uso de sistemas de transporte automatizado, como carriers y shuttles, que desplazan las bandejas entre estaciones de riego, luz y cosecha, reduciendo la necesidad de intervención humana (Swisslog, 2023).

#### 4.1.2 Tecnologías de automatización y monitoreo remoto

Diversas investigaciones muestran el uso de sensores y plataformas IoT en entornos de agricultura protegida. El trabajo de Freddy Pérez (2023), por ejemplo, describe el desarrollo de un sistema de monitoreo y control para invernaderos usando tecnología LoRaWAN y el protocolo MQTT. Este sistema permite el control de temperatura, humedad, pH y radiación solar, todo gestionado desde una HMI basada en Node-RED, y con capacidad de monitoreo y control remoto vía Telegram (Pérez, 2023).

Otro caso relevante es el de Mora y Rosas (2019), quienes implementaron una red de sensores inalámbricos utilizando ESP8266 y Node-RED para monitorear cultivos de frijol, demostrando la fiabilidad del sistema con pequeñas variaciones respecto a instrumentos de medición convencionales. Igualmente, en Chile, Villarroel et al. (2019) utilizaron sensores de temperatura y humedad conectados por WiFi, procesando los datos en la plataforma IoT Cloud para evaluar un invernadero en el desierto de Atacama.

Asimismo, el proyecto MACARONS (2022) introduce un enfoque modular y de código abierto para automatizar bandejas en sistemas verticales, integrando transporte, cultivo y cosecha en una misma línea automatizada. Su arquitectura se diseña para facilitar la escalabilidad y adaptabilidad a distintas configuraciones de cultivo.

#### 4.1.3 Integración de inteligencia artificial y plataformas de gestión

La incorporación de inteligencia artificial (IA) permite anticipar necesidades hídricas, lumínicas o nutricionales en función de patrones de crecimiento. En este sentido, trabajos como los de HashStudioz (2023) destacan el papel de sensores inteligentes y la recolección masiva de datos como base para la automatización predictiva y decisiones agronómicas informadas. Además, se resalta el uso de bases de

datos relacionales para almacenar información meteorológica e hídrica de diferentes estaciones de monitoreo.

La plataforma Node-RED se consolida como una herramienta de gestión eficiente, permitiendo la visualización en tiempo real de variables clave, la configuración de alarmas automáticas y la posibilidad de tomar acciones correctivas a distancia. La interacción con aplicaciones de mensajería como Telegram añade una capa de accesibilidad y control práctico.

#### 4.1.4 Beneficios ambientales de los cultivos verticales

Además de sus ventajas productivas, los cultivos verticales tienen un impacto positivo significativo sobre el medio ambiente. Según Abhishek (2023), este tipo de agricultura permite reducir hasta en un 95% el consumo de agua en comparación con la agricultura convencional, gracias al uso de sistemas hidropónicos y de recirculación cerrada. Además, el cultivo en espacios verticales evita la expansión sobre nuevas tierras agrícolas, contribuyendo a la protección de ecosistemas y la disminución de la deforestación.

Por otro lado, López (2023) sostiene que la ubicación estratégica de las granjas verticales en entornos urbanos reduce las distancias de transporte y, por ende, las emisiones de gases de efecto invernadero. También se eliminan el uso de pesticidas y herbicidas, lo cual disminuye la contaminación del suelo y del agua. Finalmente, estas instalaciones permiten recuperar espacios urbanos abandonados, integrando zonas productivas con el tejido urbano.

Puede concluirse desde este estado del arte que la automatización de cultivos verticales, especialmente con el uso de sistemas rotativos, representa una línea de innovación prometedora que combina eficiencia espacial, energética y agronómica. La integración de sensores, IoT,

plataformas de visualización como Node-RED, y mecanismos de control remoto mediante aplicaciones móviles, conforman un ecosistema tecnológico integral que permite tomar decisiones informadas, mejorar los rendimientos y reducir el uso de recursos. Además, esta tecnología representa una solución ambientalmente sostenible para las ciudades del futuro.

## **4.2 Marco tecnológico**

Los sistemas de cultivo vertical automatizado combinan varios componentes tecnológicos con fundamentos agronómicos y de ingeniería para ofrecer soluciones eficientes en la producción de alimentos. El siguiente marco teórico describe las tecnologías clave que permiten el funcionamiento integral de estas estructuras, haciendo énfasis en sus principios, aplicaciones y posibilidades de integración.

### **4.2.1 Tecnologías involucradas en los sistemas verticales**

Sistemas hidropónicos y aeropónicos.

**Hidroponía:** Cultivo sin suelo utilizando soluciones nutritivas. Las plantas se sostienen mediante sustratos inertes y reciben nutrientes directamente en el agua.

**Aeroponía:** Las raíces se suspenden en el aire y reciben nutrientes mediante una neblina nutritiva.

Ambos sistemas permiten ahorro de agua y reducción del uso de pesticidas. Están ilustrados en el esquema de HashStudioz (2023) donde se observa la comparativa de consumo hídrico frente a la agricultura convencional.

### **4.2.2 Estructuras rotativas o verticales automatizadas**

Son mecanismos diseñados para girar lentamente y permitir una exposición uniforme de todas las plantas a la luz natural o artificial. El sistema EcoY de Dürr (2023)

ilustra este principio, mostrando un anillo vertical motorizado que gira alrededor de una fuente lumínica central.

#### 4.2.3 Automatización robótica y logística interna

Swisslog (2023) propone soluciones automatizadas como carriers y shuttles, que transportan bandejas de cultivo entre zonas de luz, riego y cosecha. Estos sistemas permiten operaciones ininterrumpidas con bajo consumo energético.

#### 4.2.4 Sensores y dispositivos IoT

Se emplean sensores de temperatura, humedad relativa, pH, CE y concentración de CO<sub>2</sub>, conectados a plataformas de monitoreo remoto. Estos sensores pueden estar basados en microcontroladores como ESP8266 o Raspberry Pi, configurados bajo protocolos MQTT o LoRaWAN.

Ilustración recomendada: Diagrama de arquitectura IoT basado en Node-RED (Pérez, 2023).

#### 4.2.5 Plataformas de control y gestión

Software como Node-RED o ThingSpeak permite el procesamiento de datos en tiempo real, generación de alarmas, control remoto mediante aplicaciones como Telegram, y almacenamiento en la nube.

#### 4.2.6 Inteligencia artificial y análisis predictivo

Sistemas de aprendizaje automático se usan para anticipar requerimientos nutricionales o de riego, mediante la recolección y análisis de datos históricos. HashStudioz (2023) proporciona ejemplos de cómo los sensores inteligentes y la IA contribuyen al manejo de cultivos.

Ilustraciones sugeridas con referencia de autoría

- Sistema EcoY: estructura rotativa vertical automatizada (Dürr, 2023).
- Arquitectura IoT para cultivo vertical: esquema de red basada en Node-RED y LoRaWAN (Pérez, 2023).
- Módulo logístico de bandejas: automatización con shuttles para transporte interno (Swisslog, 2023).
- Comparativa de sistemas de riego: eficiencia del sistema hidropónico y aeropónico (HashStudioz, 2023)

### **4.3 Conclusión**

Los sistemas de cultivo vertical automatizado representan un ecosistema tecnológico complejo que articula estructuras físicas, sensores, conectividad IoT, inteligencia artificial y plataformas de visualización. La integración de estas tecnologías no solo aumenta la eficiencia productiva, sino que también contribuye a la sostenibilidad ambiental y la seguridad alimentaria.

## 5 Metodología

### 5.1 Tipo de proyecto

Esta investigación aplicada pertenece al tipo de proyecto tecnológico-experimental, ya que se centra en el diseño, construcción y prueba de un sistema automatizado de invernadero utilizando materiales reciclados (botellas PET) y tecnologías de monitoreo y control (sensores, riego automatizado, módulo ESP32).

Justificación según las variables involucradas: las variables principales que intervienen en el proyecto son:

- Variables tecnológicas: diseño estructural del invernadero, uso de materiales reciclados (botellas PET), sistemas de riego automatizado, sensores ambientales, microcontroladores (ESP32), comunicación remota.
- Variables ambientales: temperatura, humedad, condiciones del cultivo, consumo de agua.
- Variables agrícolas: riego y fertirriego.

Clasificación del tipo de proyecto: Proyecto de innovación tecnológica: porque incorpora tecnologías actuales (IoT, sensores, automatización) con un enfoque de sostenibilidad (reutilización de botellas PET).

Proyecto experimental: porque implica la prueba y evaluación empírica de un sistema construido, donde se monitorean resultados concretos como el crecimiento vegetal y la eficiencia hídrica.

Proyecto de desarrollo aplicado: porque busca aplicar conocimientos científicos y tecnológicos para resolver un problema práctico, en este caso, mejorar la producción agrícola con bajo costo y sostenibilidad.

## 5.2 Método

- **Diseño del sistema:** Se realizará un diseño detallado del invernadero, incluyendo la disposición de las botellas PET, la distribución de los sistemas de riego y los puntos de monitoreo de variables ambientales.
- **Construcción del invernadero:** Se llevará a cabo la construcción del invernadero utilizando las botellas PET como material principal para las paredes, asegurando una estructura sólida y resistente.
- **Instalación de sistemas:** Se instalarán los sistemas de riego automatizado, los sensores de variables ambientales y el módulo ESP32 para habilitar la comunicación remota.
- **Pruebas y ajustes:** Se realizarán pruebas para verificar el funcionamiento correcto de todos los componentes y se realizarán ajustes según sea necesario para optimizar el rendimiento del sistema.
- **Evaluación y seguimiento:** Se llevará a cabo un seguimiento continuo del rendimiento del cultivo, monitoreando variables como el crecimiento de las plantas, la calidad de los productos y el consumo de agua, con el fin de evaluar la eficacia del sistema y realizar mejoras adicionales si es necesario.

## 5.3 Instrumentos de recolección de información

### 5.3.1 Fuentes primarias

Se utilizaron fuentes primarias encontradas en la biblioteca de la Institución Universitaria Pascual Bravo, tales como; Gómez García (Industria 4.0 en la agricultura del futuro: automatización de un invernadero). Incertis Carro, F. (Control de invernaderos con

computador).Medrano Anchila, J. L (Implementación de un sistema de riego automatizado). De La Plaza, J. L., & Mochón, J.

### 5.3.2 Fuentes secundarias

Se utilizaron fuentes obtenidas de google scholar, revistas digitales tales como DYNA , Cintex ; y artículos de las bases de datos Elsevier, y sciencedirect.

## 6 Resultados

### 6.1 Construcción de un sistema mecánico con rotación vertical

Para la elaboración de este sistema mecánico, el cual será utilizado para la producción de verduras se utilizaron materiales de reciclables y de bajo costo, tales como Angulo de una pulgada (1”) de segunda mano para la construcción de la estructura principal , rines de bicicleta usados , para la base giratoria y tubos de aluminio para sostener el conjunto y en ellas colgamos las botellas PET para utilizarlas como maceta de cultivo, en ellos se depositó cascarilla de arroz y tierra , sembrando allí lechuga ; y para el sistema de riego varilla corrugada doblada para sostenerlo, el sistema de movimiento se llevó a cabo con un motor paso a paso NEMA 17 y un driver para manejar nuestro motor, como puede verse en la Ilustración 1



*Ilustración 1 Sistema giratorio bidimensional*

Fuente. Propia

## 6.2 Construcción de un invernadero utilizando materiales reciclables

En la construcción del invernadero se utilizó botellas PET de 3 litros recicladas, previamente lavadas y preparadas, como principal elemento de cobertura. Estas botellas fueron cortadas, unidas y ensambladas de forma vertical para formar paneles que permiten el paso de la luz y al mismo tiempo brindan protección contra factores climáticos externos.

La estructura del invernadero se elaboró utilizando tubos de PVC de 1/2 pulgada, los cuales proporcionan un marco liviano, resistente y fácil de armar. Este tipo de material, además de ser económico, es duradero y no requiere herramientas especializadas para su montaje. Las botellas PET se fijaron al armazón de PVC con amarras plásticas y alambre, asegurando su estabilidad sin comprometer la ventilación natural del invernadero. El techo tipo domo se elaboró con varilla de 1/4 de segunda mano y plástico de invernadero transparente para así permitir un poco de paso de luz, como se observa en la Ilustración 2



*Ilustración 2 Invernadero Verde. Elaborado con botellas PET*  
Fuente. Propia

### 6.3 Implementación del sistema de monitoreo remoto de variables ambientales

Con el fin de supervisar en tiempo real las variables críticas para el crecimiento óptimo de las plantas, se desarrolló un sistema de monitoreo remoto basado en el microcontrolador ESP32. Este fue elegido por su bajo consumo energético, doble núcleo de procesamiento, y capacidades integradas de conectividad inalámbrica. Su versatilidad permite recibir datos desde múltiples sensores y enviarlos a plataformas en la nube o interfaces gráficas locales, lo que optimiza la toma de decisiones. Esta prestación del ESP32, permitió desarrollar la visualización del monitoreo de las variables (Dashboard) utilizando la plataforma NODE-RED y el protocolo de comunicaciones MOSQUITO. La comunicación con internet de la plataforma de adquisición de datos ESP32 se realizó mediante un modem conectado a la red de celulares “Claro”. La plataforma de adquisición de datos ESP32 y de comunicaciones remotas puede verse en la

Ilustración 3



*Ilustración 3 ESP32*

Fuente. Propia

A continuación puede observarse en la Ilustración 4 el Dashboard construido



*Ilustración 4 Dashboard construido en la plataforma NODE-RED*

Fuente. Grupo GIIAM -Línea agroambiental Institución Universitaria Pascual Bravo

En la imagen puede observarse los valores en tiempo real de la medición de las variables CO<sub>2</sub>, Temperatura Ambiente, humedad ambiente y humedad del suelo.

### 6.3.1 Sensores utilizados para la medición de variables

#### 6.3.1.1 Sensor de CO<sub>2</sub>:

La medición esta variable se llevó a cabo en el marco del desarrollo del “Sistema inteligente de emulación de sensores de alto costo para la medición de gases a partir de sensores de bajo costo para aplicaciones ambientales”. Este proyecto utiliza un sensor de alto costo y tres sensores de bajo costo de CO<sub>2</sub>, como puede observarse en la Ilustración 5



*Ilustración 5 Sensor CO<sub>2</sub>*

Fuente. Propia

Se aprovecho estos sensores para obtener diferentes mediciones de CO<sub>2</sub> y que también surtieran al proyecto “Sistema inteligente de emulación de sensores de alto costo para la medición de gases a partir de sensores de bajo costo para aplicaciones ambientales” con datos de mediciones en procesos como es el de proyecto que trata este trabajo un cultivo vertical automatizado bajo un invernadero.

Las características de los sensores utilizados son las siguientes:

Sensor de alto costo.

El sensor utilizado fue el Dwyer A-449A: este sensor utiliza tecnología NDIR (infrarrojo no dispersivo) para medir con precisión la concentración de dióxido de carbono en el aire con rango de 0 a 5000 ppm. El modelo A-449A está diseñado específicamente para aplicaciones de monitoreo ambiental en interiores, ofreciendo una salida analógica de 0 –10 V y 4 a 20mA. ideal para integrarse con sistemas de automatización. Su robustez, precisión y estabilidad lo convierten en una excelente opción para monitorear los niveles de CO<sub>2</sub>, una variable crítica para el proceso de fotosíntesis y el bienestar de las plantas.

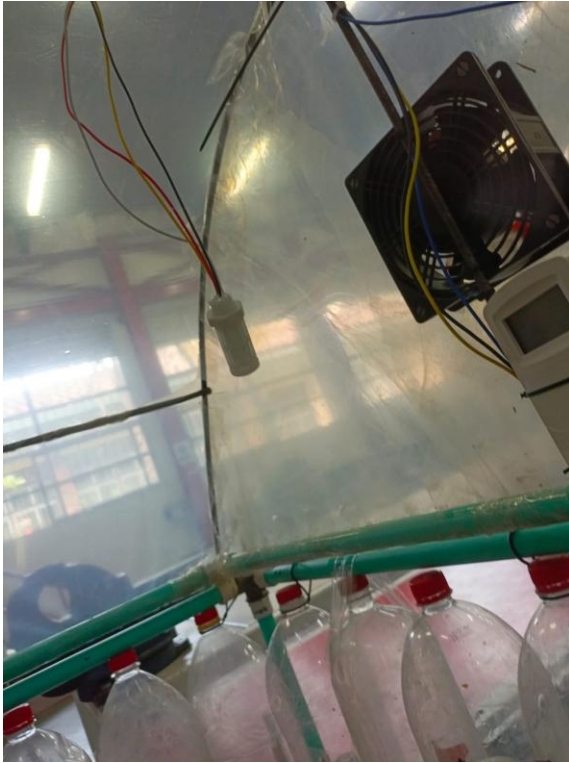
Sensor de bajo costo.

Este sensor utilizado y caracterizado como sensor de bajo costo, es Marca DFROBOT, con principio electroquímico (principio de batería de electrolito sólido) tiene un rango de medición entre 0 Y 10000 PPM CO<sub>2</sub>, se alimenta con un voltaje de 3.7 A 5 Vdc. con una salida Analógica de 2.7 ~ 4.1 V.

La medición utilizada para el control de CO<sub>2</sub> en el invernadero fue la entregada por el sensor de alto costo ya que el proyecto “Sistema inteligente de emulación de sensores de alto costo para la medición de gases a partir de sensores de bajo costo para aplicaciones ambientales” estaba en una etapa de recolección de datos de medición de CO<sub>2</sub>, siendo esa manera que el presente trabajo le aporte para su desarrollo.

#### 6.3.1.2 Sensor capacitivo de humedad de suelo

Permite medir la humedad del sustrato sin degradarse por corrosión. Entrega una señal analógica estable, útil para controlar sistemas de riego automático. Podemos observar los sensores en la Ilustración 6 e Ilustración 7



*Ilustración 6 Sensores de humedad y temperatura de ambiente y CO<sub>2</sub>*  
Fuente. Propia



*Ilustración 7 Sensor de humedad de suelo*  
Fuente. Propia

#### 6.4 Implementación del sistema de automatización

Se implementó sistema de automatización que permita suministrar oportunamente el riego y fertirriego a un cultivo de verduras con rotación vertical: El sistema se compone de dos válvulas solenoides de 12V, controladas electrónicamente para abrir o cerrar el paso de agua y solución nutritiva. Estas válvulas se conectan a una pequeña bomba de agua de 120V, ubicada en un tanque de almacenamiento, la cual permite generar la presión necesaria para distribuir el líquido a través del sistema. La bomba se activa según parámetros definidos previamente (por tiempo o por humedad del suelo), lo que permite automatizar el riego según las necesidades del cultivo.

El sistema de distribución se complementa con manguera de riego y dos goteros, los cuales aseguran una aplicación localizada y controlada del agua y los nutrientes. Para almacenar los líquidos, se utilizaron dos botellas PET recicladas de 3 litros: una para el agua limpia y otra para la solución nutritiva o fertilizante líquido. Ambas se integraron al sistema por medio de conexiones simples, permitiendo alternar entre riego y fertirriego sin complicaciones. La bomba fue sumergida en un pequeño tanque, que actúa como punto de captación del líquido a distribuir.

Este sistema no solo automatiza el proceso de riego, sino que también reduce el desperdicio de agua y fertilizantes, mejora la uniformidad del suministro, y permite mantener una nutrición constante para las plantas. Su integración con un sistema de cultivo con rotación vertical también garantiza una distribución más uniforme de la luz y del riego, favoreciendo un desarrollo equilibrado en todas las plantas del sistema, como se puede evidenciar en el

Ilustración 8



*Ilustración 8 Sistema de riego y Fertirriego*  
Fuente. Propia

## 7 Conclusiones

La utilización de sistemas verticales de producción agrícola bajo invernadero son una alternativa práctica, económica y sostenible para la agricultura urbana, con gran potencial para ser replicada en huertos familiares, escolares o comunitarios, debido a que el ahorro de espacio para el cultivo es una gran ventaja de estos sistemas, al presentar una relación de  $2.5\text{m}^2$  a  $1\text{m}^3$ , cuando la separación entre plantas es de 0.3 m.

La implementación de la automatización del riego y fertirriego mediante componentes accesibles como válvulas, una bomba pequeña, botellas PET recicladas y goteros, representa una solución práctica, económica.

El monitoreo remoto de variables físicas a través de plataformas en la nube es una herramienta eficaz para supervisar un cultivo vertical.

## **8 Recomendaciones**

Considero que se puede continuar mejorando el diseño rotativo para hacerlo más liviano, resistente y fácil de ensamblar, lo cual facilitaría aun mas su instalación en diferentes tipos de espacios urbanos como por ejemplo terrazas, patios.

Adicionalmente se puede explorar el uso de energía solar como fuente de alimentación del sistema sería un avance significativo hacia una autonomía y sostenibilidad. Esto permitiría su funcionamiento en zonas donde no haya acceso constante a la red eléctrica y fortalecería su impacto ambiental de una manera muy positiva.

Sería de gran importancia promover talleres o actividades de divulgación como talleres o demostraciones prácticas, contribuiría a que este tipo de proyectos lleguen a comunidades rurales. De esta forma, se fortalecería el uso de tecnologías sostenibles en la producción de alimentos.

## 9 Referencias bibliográficas

- Abhishek, A. (2023). *Role of vertical farming in reducing environmental impact*. Vertical Farming Planet. Recuperado de <https://verticalfarmingplanet.com/role-of-vertical-farming-in-reducing-environmental-impact>
- Dürr. (2023). *Sun-powered vertical farming with EcoY*. Recuperado de <https://www.durr.com/en/products/sun-powered-vertical-farming>
- Future Food Production. (2023). *How vertical farms are automated using robotics*. Recuperado de <https://www.futurefoodproduction.com/post/how-vertical-farms-are-automated-using-robotics>
- HashStudioz. (2023). *IoT in Vertical Farming: The Role of Sensors and Automation*. Recuperado de <https://www.hashstudioz.com/blog/iot-in-vertical-farming>
- López, S. (2023). *Sustainability and environmental impact of vertical farming*. WikiFarmer. Recuperado de <https://wikifarmer.com/sustainability-and-environmental-impact-of-vertical-farming>
- MACARONS. (2022). *Modular and Open-source System for Automation in Vertical Farming*. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2210.04975>
- Mora, H., & Rosas, J. (2019). *Diseño, desarrollo e implementación de una red de sensores inalámbricos para agricultura de precisión*. Lima, Perú.
- Pérez, F. J. (2023). *Sistema automatizado de control y monitoreo basado en tecnología LoRaWAN y MQTT para el cultivo de hortalizas bajo invernadero* [Tesis de grado, Universidad Técnica de Ambato].
- Swisslog. (2023). *Flexible Automation for Vertical Farming*. Recuperado de <https://www.swisslog.com/en-us/case-studies-and-resources/blog/vertical-farming>

Villarroel, C., Arteaga, P., & Lira, A. (2019). *Evaluación de desempeño de un invernadero ubicado en el desierto de Atacama, Chile, a través de IoT*. Universidad de Antofagasta.

Vertical Future. (2023). *Bridging the automation gap in vertical farming*. Recuperado de <https://verticalfuture.com/blog/bridging-the-automation-gap-in-vertical-farming>

## 10 Bibliografía

- De La Plaza, J. L., & Mochón, J. (1982). Conservación de productos hortofrutícolas en atmósfera controlada: Regulación electrónica selectiva del proceso. *Mundo Electrónico*, (113), 99–108.
- Gómez García, L. O. (2017). Industria 4.0 en la agricultura del futuro: Automatización de un invernadero. *Mundo Eléctrico (Bogotá)*, 31(110), [junio-agosto].
- Incertis Carro, F. (1982). Control de invernaderos con computador: Cultivos hidropónicos. *Mundo Electrónico*, (113), 59–69.
- Medrano Anchila, J. L., & Rincón Macías, E. (s.f.). *Implementación de un sistema de riego automatizado para una parcela de plantas medicinales y aromáticas en el Centro Acuícola y Agroindustrial de Gaira* (Asesor: L. G. Pacheco Tamayo) [Trabajo de grado].

