

**Sistema de dosificación de fertilizantes y control de  
riego para cultivos hidropónicos de hortalizas**

Duvan Andrés Ruiz Acevedo

Helmer Enrique Ruiz Acevedo

Asesor

Andrés David Suarez Gómez

Universidad Nacional Abierta y a Distancia-UNAD  
Escuela de Ciencias, Básicas, Tecnología e Ingenierías ECBTI  
Ingeniería Electrónica

2026

## Resumen

En el presente trabajo se desarrolla la implementación de un sistema de control para la dosificación de fertilizantes en cultivos hidropónicos de hortalizas, al igual que la medición de parámetros clave como sólidos disueltos totales (TDS) y pH de la solución nutritiva con la cual se alimenta el cultivo, el objetivo del proyecto es el de optimizar el uso de recursos y tiempo empleado en el control del estado del cultivo mejorando así la eficiencia y haciéndolo más práctico y de fácil manejo. El sistema se basa en el monitoreo en intervalos establecidos de variables clave como TDS, pH, temperatura y humedad a través de sensores ubicados estratégicamente dentro del cultivo los cuales envían información precisa a las tarjetas de control lo que permite ajustar de forma precisa y en tiempo real la dosificación de nutrientes y mantener las condiciones óptimas para el buen desarrollo del cultivo, reduciendo así la intervención manual y errores que puedan cometer los agricultores además de la disminución del tiempo empleado en la realización de estas tareas de medición.

***Palabras Clave:*** hidropónico, optimizar, nutrientes.

### **Abstract**

This paper develops the implementation of a control system for fertilizer dosing in hydroponic vegetable crops, as well as the measurement of key parameters such as total dissolved solids (TDS) and pH of the nutrient solution used to feed the crop. The project's objective is to optimize the use of resources and time spent monitoring the crop's condition, thus improving efficiency and making it more practical and easy to manage. The system is based on monitoring key variables such as TDS, pH, humidity, and moisture at established intervals through sensors strategically located within the crop. These sensors send the necessary information to the control cards. This allows for precise, real-time adjustments of nutrient dosages and maintenance of optimal conditions for proper crop development. This reduces manual intervention and errors by farmers, as well as reducing the time spent on these measurement tasks.

***Keywords:*** hydroponics, Optimization, Nutrients.

## Tabla de Contenido

Planteamiento del Problema.....	13
Formulación del problema .....	14
Objetivos .....	16
Objetivo General .....	16
Objetivos Específicos .....	16
Justificación.....	17
Marco Referencial .....	19
Marco Conceptual .....	19
Marco teórico .....	35
Antecedentes .....	36
Antecedentes Internacionales .....	36
Antecedentes Nacionales.....	37
Metodología .....	40
Enfoque metodológico .....	40
Tipo de investigación .....	40
Diseño metodológico.....	40
Técnicas e instrumentos .....	42
Variables del estudio.....	42
Validez y confiabilidad .....	43
Desarrollo o Implementación .....	44
Diseño del Sistema.....	44
Selección de Actuadores.....	50
Controlador Principal .....	54
Pantalla de Interfaz.....	56

Sistema de Comunicación .....	57
Servomotor para Sensores .....	59
Sistemas de Alimentación .....	61
Diagrama de Bloques .....	63
Montaje en Protoboard: .....	65
Diseño de la Tarjeta Electrónica.....	66
Montaje Estructura del Invernadero .....	75
Condiciones Óptimas para el Cultivo Hidropónico de Hortalizas .....	80
Pruebas y Ajustes .....	82
Encapsulado, Montaje y Funcionamiento del Sistema .....	84
Diseño Experimental. ....	90
Objetivo del Experimento. ....	91
Diseño Experimental y Repeticiones .....	91
Condiciones Experimentales .....	92
Sistemas Evaluados .....	92
Características de las Mediciones.....	93
Análisis de los Datos.....	93
Justificación del Enfoque Experimental.....	94
Análisis de Resultados .....	95
Crecimiento de las Plantas .....	95
Producción y Peso .....	97
Uso de Agua .....	99
Tiempo de Germinación y Cosecha .....	100
Análisis Estadístico y Consistencia entre Repeticiones .....	102
Interpretación General.....	102

Dificultades Encontradas.....	103
Conclusiones .....	105
Bibliografía.....	106

## Lista de Tablas

<b>Tabla 1</b> <i>Comparación entre el Sensor de pH Seleccionado y otros Sensores Disponibles en el Mercado</i> .....	45
<b>Tabla 2</b> <i>Comparación entre el Sensor de TDS Seleccionado y otros Sensores Disponibles en el Mercado</i> .....	46
<b>Tabla 3</b> <i>Comparación entre el Sensor de humedad y Temperatura Seleccionado y otros Sensores Disponibles en el Mercado</i> .....	48
<b>Tabla 4</b> <i>Comparación entre el Sensor Proximidad Seleccionado y otros Sensores Disponibles en el Mercado</i> .....	50
<b>Tabla 5</b> <i>Comparación entre la Válvula Seleccionada y otras Válvulas Disponibles en el Mercado</i> .....	51
<b>Tabla 6</b> <i>Comparación de la Bomba de Dosificación Seleccionada y otras Bombas Disponibles en el Mercado</i> .....	52
<b>Tabla 7</b> <i>Comparación entre la Electrobomba de agua Seleccionada y otras Electrobombas Disponibles en el Mercado</i> .....	54
<b>Tabla 8</b> <i>Comparación entre el Microcontrolador Seleccionado y otros Microcontroladores Disponibles en el Mercado</i> .....	55
<b>Tabla 9</b> <i>Comparación entre la Pantalla de Interfaz de Usuario Seleccionada y otras Pantallas Disponibles en el Mercado</i> .....	56
<b>Tabla 10</b> <i>Comparación entre el Módulo de Comunicación Seleccionado y otros Módulos Disponibles en el Mercado</i> .....	58
<b>Tabla 11</b> <i>Comparación entre el Servomotor Seleccionado y otros Servomotores Disponibles en el Mercado</i> .....	60
<b>Tabla 12</b> <i>Comparación entre la Fuente de Alimentación Seleccionada y otras Disponibles en el Mercado</i> .....	62
<b>Tabla 13</b> <i>Parámetros Recomendados para el Crecimiento Adecuado del Cultivo</i> .....	80
<b>Tabla 14</b> <i>Fórmulas de la Solución Nutritiva en Cultivos Hidropónicos de Hortalizas</i> .....	82

<b>Tabla 15</b> <i>Experimentos</i> .....	91
<b>Tabla 16</b> Variables Medidas.....	93
<b>Tabla 17</b> Promedios de Altura Semanal.....	96
<b>Tabla 18</b> <i>Peso de Cada Planta</i> .....	98
<b>Tabla 19</b> <i>Consumo de Agua en Cada Sistema</i> .....	99
<b>Tabla 20</b> <i>Duración del Cultivo desde la Germinación Automatizado y Manual</i> .....	101

## Lista de Figuras

<b>Figura 1</b> <i>Cultivo Hidropónico (imagen ilustrativa)</i> .....	19
<b>Figura 2</b> <i>Control de Riego (imagen ilustrativa)</i> .....	20
<b>Figura 3</b> <i>Automatización y Control del Cultivo (imagen ilustrativa)</i> .....	21
<b>Figura 4</b> <i>Arduino Nano (imagen ilustrativa)</i> .....	22
<b>Figura 5</b> <i>Bomba de Agua (imagen ilustrativa)</i> .....	23
<b>Figura 6</b> <i>Servomotor (imagen ilustrativa)</i> .....	24
<b>Figura 7</b> <i>Sensor de pH para Arduino (imagen ilustrativa)</i> .....	25
<b>Figura 8</b> <i>Sensor de TDS para Arduino (imagen ilustrativa)</i> .....	26
<b>Figura 9</b> <i>Sensor de Humedad y Temperatura DTH22 (imagen ilustrativa)</i> .....	27
<b>Figura 10</b> <i>Válvula Solenoide de Agua (imagen ilustrativa)</i> .....	28
<b>Figura 11</b> <i>Sensor de Proximidad HC-SR04 (imagen ilustrativa)</i> .....	30
<b>Figura 12</b> <i>Bomba Peristaltica (imagen ilustrativa)</i> .....	30
<b>Figura 13</b> <i>Pantalla LCD (imagen ilustrativa)</i> .....	31
<b>Figura 14</b> <i>Servomotor MG996R (imagen ilustrativa)</i> .....	32
<b>Figura 15</b> <i>Fuente de Alimentación Switching 12V 20A 110V (imagen ilustrativa)</i> .....	33
<b>Figura 16</b> <i>sistema NFT (imagen ilustrativa)</i> .....	34
<b>Figura 17</b> <i>Diagrama de Bloques del Sistema</i> .....	64
<b>Figura 18</b> <i>Pruebas en Protobaord</i> .....	65
<b>Figura 19</b> <i>Simulación en Proteus de la Tarjeta Electrónica</i> .....	66
<b>Figura 20</b> <i>Sistema de Control</i> .....	67
<b>Figura 21</b> <i>Conjunto de Sensores</i> .....	67
<b>Figura 22</b> <i>Etapas de Potencia</i> .....	68
<b>Figura 23</b> <i>Salidas de Potencia</i> .....	69
<b>Figura 24</b> <i>Borneras de Conexión</i> .....	69

<b>Figura 25</b> <i>Diseño de la PCB</i> .....	70
<b>Figura 26</b> <i>Modelado en 3D del Circuito</i> .....	71
<b>Figura 27</b> <i>Revelado de la PCB</i> .....	72
<b>Figura 28</b> <i>PCB Impresa en la Baquela</i> .....	73
<b>Figura 29</b> <i>Tarjeta Arduino Esclavo 2</i> .....	73
<b>Figura 30</b> <i>Tarjeta Arduino Esclavo</i> .....	74
<b>Figura 31</b> <i>Tarjeta Arduino Maestro</i> ... ..	71
<b>Figura 32</b> <i>Sistema de Sensores con Inmercion</i> .....	75
<b>Figura 33</b> <i>Primer Arco del Invernadero</i> .....	76
<b>Figura 34</b> <i>Estructura Principal del Invernadero</i> .....	76
<b>Figura 35</b> <i>Invernadero Techado</i> .....	77
<b>Figura 36</b> <i>Invernadero Terminado</i> .....	78
<b>Figura 37</b> <i>Germinación</i> .....	83
<b>Figura 38</b> <i>Crecimiento de las Hortalizas</i> .....	83
<b>Figura 39</b> <i>Cosecha de las Plantas</i> .....	84
<b>Figura 40</b> <i>Módulo de Control</i> .....	85
<b>Figura 41</b> <i>Sistema de Dosificación</i> .....	86
<b>Figura 42</b> <i>Pruebas Finales</i> .....	87
<b>Figura 43</b> <i>Trasplantado de las Hortalizas</i> .....	88
<b>Figura 44</b> <i>Crecimiento de las Hortalizas</i> .....	89
<b>Figura 45</b> <i>Panorámico del Sistema de Dosificación</i> .....	90
<b>Figura 46</b> <i>Crecimiento de las Plantas</i> .....	97
<b>Figura 47</b> <i>Peso Promedio de la Planta</i> .....	98
<b>Figura 48</b> <i>Consumo de Agua Comparando Sistema Manual y Sistema Automatizado</i> .....	100
<b>Figura 49</b> <i>Tiempo Hasta la Cosecha</i> .....	101

**Lista de Apéndices**

<b>Apéndice A</b> <i>Código Fuente del Sistema de Control</i> .....	110
---	-----

## Introducción

El cultivo hidropónico se ha consolidado como una alternativa sostenible frente a la agricultura tradicional, al permitir el aprovechamiento eficiente del agua y los nutrientes, además de posibilitar la producción en espacios reducidos. Sin embargo, su implementación presenta diversos desafíos técnicos relacionados con la dosificación precisa de fertilizantes, el control del riego y la supervisión de variables ambientales que influyen directamente en el crecimiento y la calidad de las plantas.

En la mayoría de los casos, estos procesos se realizan de manera manual, lo que incrementa el riesgo de errores humanos y limita la uniformidad del cultivo. Esta situación afecta la productividad y eleva los costos operativos, especialmente para agricultores de pequeña y mediana escala que no cuentan con sistemas automatizados accesibles.

Ante esta problemática, surge la necesidad de desarrollar soluciones tecnológicas que integren la automatización en la gestión del riego y la fertilización. En este contexto, el presente proyecto propone el diseño e implementación de un sistema electromecánico automatizado para el control integral de cultivos hidropónicos. Dicho sistema tiene como objetivo optimizar la administración de nutrientes y agua mediante la medición en tiempo real de parámetros ambientales y la adaptación dinámica de las condiciones del cultivo según su etapa de desarrollo.

Con este enfoque, se busca mejorar la eficiencia nutricional, reducir el desperdicio de recursos y facilitar la adopción de tecnologías avanzadas por parte de productores con recursos limitados. Además, la propuesta contribuye al impulso de una agricultura más precisa, sostenible y tecnológicamente accesible.

## Planteamiento del Problema

El cultivo hidropónico se ha posicionado como una alternativa sostenible frente a la agricultura tradicional, gracias a su eficiencia en el uso del agua, la tierra y los nutrientes. En Colombia, esta técnica ha ganado relevancia en la producción de hortalizas debido a la creciente demanda de alimentos frescos y saludables, especialmente en entornos urbanos donde el espacio agrícola es limitado (FAO, 2021).

Sin embargo, uno de los principales desafíos que enfrentan los agricultores hidropónicos es el manejo manual de la dosificación de nutrientes y el control del riego, procesos que requieren alta precisión para garantizar el crecimiento adecuado de las plantas. Cuando estos parámetros se manejan de forma empírica o sin automatización, se producen desequilibrios en la solución nutritiva que afectan directamente la productividad y calidad del cultivo. De acuerdo con Zanjani et al. (2020), un manejo inadecuado de los nutrientes puede reducir la productividad hasta en un 30 %. En Colombia, la Cámara de Comercio de Bogotá (2022) reporta que cerca del 40 % de los agricultores hidropónicos presentan dificultades para mantener la precisión en la dosificación y el control del riego, lo que limita la adopción eficiente de esta técnica.

Aunque en el mercado existen sistemas comerciales automatizados de cultivo hidropónico como los ofrecidos por empresas que proveen kits prefabricados o sistemas modulares (Homecenter, 2024; Mercado Libre, 2024), la mayoría de estas soluciones presentan dos limitaciones principales:

1. Están diseñadas para cultivos de gran escala o con fines comerciales, lo que las hace costosas y poco accesibles para pequeños productores.

2. Operan con configuraciones fijas que no ajustan automáticamente las dosis de nutrientes ni las condiciones de riego según la etapa de desarrollo de las hortalizas, lo que reduce su eficiencia y flexibilidad.

En consecuencia, los agricultores que operan sistemas hidropónicos de forma manual enfrentan problemas como la sobredosificación o deficiencia de nutrientes, la pérdida de uniformidad en el crecimiento, el aumento del consumo de agua y fertilizantes, y la disminución del rendimiento económico.

Frente a esta problemática, surge la necesidad de un sistema automatizado, de bajo costo y fácil implementación, que integre sensores y actuadores para controlar de manera precisa la dosificación de nutrientes y el riego, adaptándose dinámicamente a las necesidades fisiológicas del cultivo. Este tipo de solución permitiría optimizar el uso de recursos, mejorar la productividad y facilitar la adopción tecnológica entre agricultores de pequeña y mediana escala.

### **Formulación del Problema**

El control adecuado de la dosificación de nutrientes y del riego en los sistemas hidropónicos es un factor determinante para garantizar el desarrollo óptimo de las plantas y la eficiencia del cultivo. En este tipo de sistemas, las raíces dependen completamente de la solución nutritiva para obtener los minerales esenciales, por lo que cualquier variación en el riego puede afectar el rendimiento final de las plantas.

A pesar de los avances tecnológicos en el campo de la automatización agrícola, muchos pequeños productores aún dependen de procedimientos manuales y empíricos para preparar y aplicar las soluciones nutritivas. Este manejo tradicional no solo aumenta el margen de error, sino que también limita la capacidad de respuesta ante los cambios en las condiciones ambientales o en las necesidades fisiológicas del cultivo. Como resultado, se presentan

desequilibrios nutricionales, desperdicio de agua y fertilizantes, y una reducción significativa en la productividad.

Por ello, resulta fundamental el desarrollo de un sistema automatizado que permita controlar de manera precisa estos parámetros críticos. La implementación de una herramienta tecnológica de bajo costo y fácil operación representaría una solución práctica y eficiente, capaz de mejorar el rendimiento de los cultivos hidropónicos y promover la sostenibilidad en la producción agrícola.

¿Cómo desarrollar un sistema electromecánico automatizado capaz de controlar de forma precisa la dosificación de nutrientes y el riego en cultivos hidropónicos de hortalizas, adaptándose a las diferentes etapas de crecimiento y reduciendo la intervención manual?

## 2. Objetivos

### Objetivo General

Diseñar e implementar un sistema electromecánico automatizado para la dosificación de fertilizantes y el control del riego en cultivos hidropónicos de hortalizas, que permita optimizar el uso de nutrientes, el tiempo de cosecha y el consumo de agua.

### Objetivos Específicos

Analizar los requerimientos nutricionales y las variables ambientales (pH, temperatura, humedad, TDS) que influyen en el crecimiento de hortalizas cultivadas mediante sistemas hidropónicos.

Diseñar el sistema electrónico y mecánico automatizado para el control preciso de la dosificación de nutrientes y del riego, integrando sensores y actuadores adecuados.

Desarrollar el software de control que permita ajustar dinámicamente las dosis de nutrientes y el riego según la etapa de crecimiento del cultivo.

Evaluar el desempeño del sistema en términos de precisión, eficiencia en el uso de recursos y mejora de la productividad del cultivo.

## Justificación

El cultivo hidropónico representa una alternativa eficiente y sostenible frente a la agricultura tradicional, al permitir la producción de hortalizas con un uso reducido de agua, espacio y fertilizantes. Sin embargo, en Colombia, la adopción de esta técnica se ha visto limitada por la necesidad de realizar manualmente la dosificación de nutrientes y el control del riego, tareas que requieren precisión y conocimientos técnicos especializados. Esta situación genera errores frecuentes en la preparación de soluciones nutritivas, desperdicio de insumos y disminución en la productividad de los cultivos.

Aunque existen sistemas comerciales automatizados para la hidroponía, la mayoría están orientados a grandes productores o presentan altos costos de adquisición e instalación, lo que los hace poco accesibles para agricultores de pequeña y mediana escala. Además, dichos sistemas suelen operar con configuraciones fijas, sin ajustar las dosis de nutrientes ni el riego según la etapa de desarrollo de las plantas, reduciendo su eficiencia.

Ante esta problemática, el presente proyecto propone el diseño e implementación de un sistema electromecánico automatizado que controle la dosificación de fertilizantes y el riego en cultivos hidropónicos de hortalizas. Este sistema integrará sensores y actuadores para monitorear en tiempo real variables como pH, temperatura, humedad y TDS, ajustando automáticamente las condiciones del cultivo de acuerdo con sus requerimientos fisiológicos.

La automatización de estos procesos permitirá optimizar el uso de agua y fertilizantes, reducir la intervención manual y mejorar la uniformidad y calidad del cultivo, contribuyendo a una producción más sostenible y rentable. Además, su enfoque de bajo costo y fácil implementación busca democratizar el acceso a la tecnología agrícola, facilitando la adopción de

la hidroponía entre pequeños productores y fortaleciendo la seguridad alimentaria en contextos locales.

## Marco Referencial

### Marco Conceptual

En el desarrollo del presente proyecto aplicado se tuvieron en cuenta los siguientes conceptos.

### Hidroponía

La hidroponía es un método de cultivo de plantas que prescinde del suelo como medio de sujeción y obtención de nutrientes, utilizando soluciones acuosas ricas en nutrientes como medio de crecimiento. Esta técnica ofrece numerosas ventajas, incluida una mayor eficiencia en el uso de agua y nutrientes, control preciso de las condiciones de crecimiento y la capacidad de cultivar en espacios reducidos (González & Ramírez, 2022).

### Figura 1

*Cultivo Hidropónico (Imagen Ilustrativa)*



*Nota.* Agricultura hidropónica impulsada por IA de visión. Tomado de. Vision AI-powered hydroponic farming enhances plant monitoring. Ultralytics. (2025).

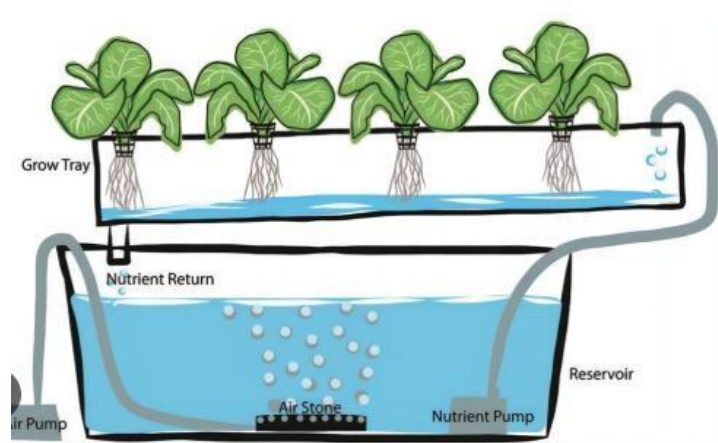
<https://www.ultralytics.com/es/blog/vision-ai-powered-hydroponic-farming-enhances-plant-monitoring>.

## Control del Riego

El control del riego es el proceso mediante el cual se regula la cantidad, frecuencia y duración del suministro de agua que reciben las plantas, con el propósito de garantizar un equilibrio hídrico adecuado para su desarrollo. En los sistemas hidropónicos, este control resulta esencial para mantener la humedad óptima en el sustrato o solución nutritiva, evitando tanto el exceso de agua que puede provocar asfixia en las plantas como la escasez que limita la absorción de nutrientes. Su implementación mediante sensores y sistemas automatizados permite ajustar el riego de acuerdo con las condiciones ambientales y las etapas de crecimiento del cultivo, optimizando el uso de recursos y mejorando la productividad. (Cortés & Behrentz, 2014).

### Figura 2

*Control de riego (Imagen Ilustrativa)*



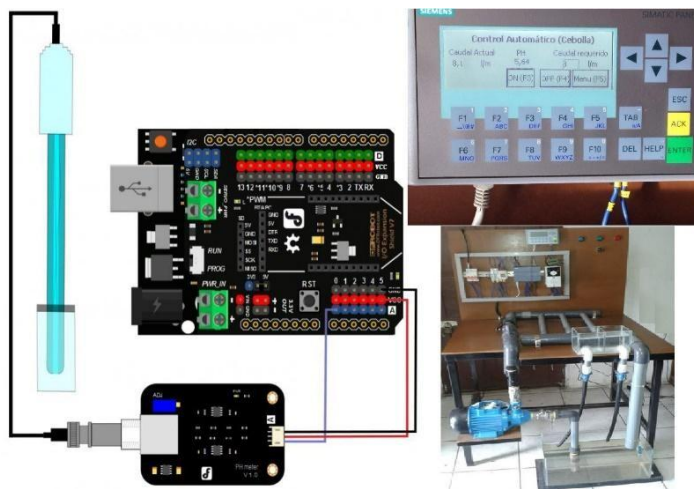
*Nota.* La imagen muestra un control de riego automatizado. Tomado de. Key Notes: Mineral Nutrition. EduRev (2025). <https://edurev.in/t/180225/Key-Notes-Mineral-Nutrition>

## Automatización y Control

La automatización y el control constituyen procesos fundamentales en el desarrollo de sistemas tecnológicos aplicados a la agricultura moderna, particularmente en los cultivos hidropónicos. A través de la integración de sensores, actuadores y controladores programables, es posible supervisar y regular de forma continua variables críticas como la humedad del sustrato, la conductividad eléctrica, el pH y la temperatura de la solución nutritiva. Esta capacidad de ajuste automático permite optimizar la dosificación de nutrientes y el riego, garantizando condiciones estables y precisas para el crecimiento de las plantas. En conjunto, la automatización y el control contribuyen a mejorar la eficiencia operativa, reducir el consumo de recursos y aumentar la productividad del sistema hidropónico. (Castro, 2016).

### Figura 3

*Automatización y Control del Cultivo (Imagen Ilustrativa)*



*Nota.* Se puede ver el sistema de control de un cultivo hidropónico. Tomado de. Kit medición de pH analógico SEN0161 DFRobot. Soluciones Mecatrónicas. (s.f).

<https://solucionesmecatronicas.co/producto/kit-medicion-de-ph-analogo-sen0161-dfrobot/>

## Arduino

Es una plataforma de creación electrónica de código abierto que se basa en hardware y software libre, de fácil manejo y flexible que es utilizado para construir proyectos electrónicos. Esta plataforma permite crear diferentes tipos de microordenadores de una sola placa a los que la comunidad de creadores puede darles diferentes usos que crea necesario. Esta plataforma está formada por placa física o una tarjeta de circuito programable y un software que se instala en el ordenador y es empleado para cargar código del ordenador a la tarjeta física. (Guerrero,2023).

### Figura 4

*Arduino Nano (Imagen Ilustrativa)*



*Nota.* Se puede ver la estructura del Arduino Nano. Tomado de. Beffkkip Mini Nano V3.0 Microcontrolador. Amazon México. (s.f.). <https://www.amazon.com.mx/Beffkkip-Mini-Nano-V3-0-Microcontrolador/dp/B0CM3C3FCZ?th=1>

## Bomba de Agua

Las bombas de agua son máquinas que cuentan con un motor que hacen rotar un elemento conocido como impulsor. Esto es una rueda con aspas que está sumergida y en continuo movimiento, generando una energía centrífuga que desplaza el agua desde un sitio a

otro. Las bombas de agua sirven para evacuar o extraer agua. (BOE. Boletín Oficial del Estado, [s. l.], 2016).

### **Figura 5**

*Bomba de Agua (Imagen Ilustrativa)*



*Nota.* Se puede apreciar una bomba de agua eléctrica. Tomado de. AQUA30W. Evans. (s.f.).

<https://evans.com.mx/spec/index/?sku=AQUA30W>

### **Servomotor**

Un servomotor es un tipo de motor eléctrico que se caracteriza por su capacidad para mantener una posición específica en lugar de girar continuamente como lo hacen los motores convencionales. Estos motores están diseñados para controlar el movimiento con alta precisión y pueden girar hasta un ángulo específico, lo cual los hace ideales para aplicaciones donde se requiere control de posición, velocidad y precisión. (Huang, & Cheng, 2024).

## Figura 6

*Servomotor (Imagen Ilustrativa)*



*Nota.* Servomotor eléctrico metálico. Tomado de. Servomotor con torque de 10 kgf·cm MOT-135 Steren. Walmart México. (s.f.). <https://www.walmart.com.mx/ip/servomotor-con-torque-de-10-kgf-cm-mot-135-steren-mot-135/00750625093015>

## Sensor de pH

Un sensor de pH es un dispositivo utilizado para medir el nivel de acidez o alcalinidad de una solución, expresado en una escala que va de 0 a 14. Este tipo de sensor convierte la actividad de los iones de hidrógeno presentes en la solución en una señal eléctrica que puede ser interpretada por un sistema de control o microcontrolador. Su funcionamiento se basa en un electrodo de vidrio sensible al pH, que genera una diferencia de potencial proporcional a la concentración de iones  $H^+$ . Estos sensores son ampliamente utilizados en sistemas hidropónicos, donde el control del pH resulta fundamental para mantener condiciones óptimas de crecimiento. (Gómez & Martínez, 2023).

**Figura 7**

*Sensor de pH para Arduino (Imagen Ilustrativa)*



*Nota.* Módulo de sensor de pH para Arduino. Tomado de. Mercado Libre Colombia. (s.f.).

<https://www.mercadolibre.cl/modulo-y-sensor-de-ph-4502c-para-jardin-fermentacion-arduino/p/MLC32490360>

**Sensor TDS**

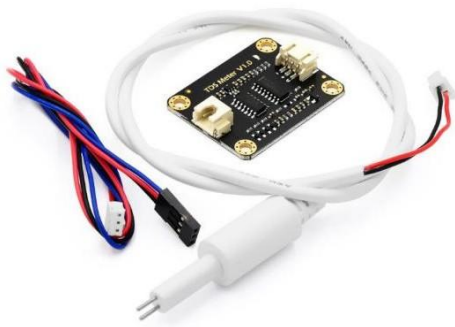
El sensor de TDS (Total Dissolved Solids) es un dispositivo utilizado para medir la cantidad total de sólidos disueltos presentes en una solución líquida, principalmente sales minerales, iones y compuestos orgánicos. Su principio de funcionamiento se basa en la medición de la conductividad eléctrica del agua, ya que la presencia de partículas disueltas incrementa su capacidad de conducción. A mayor concentración de sólidos disueltos, mayor será el valor de conductividad registrado por el sensor.

El dispositivo convierte esta lectura en una unidad de medida expresada comúnmente en ppm (partes por millón) o mg/L, que permite evaluar la pureza del agua y la concentración de

nutrientes en soluciones utilizadas en sistemas hidropónicos. El control adecuado de los valores de TDS es esencial para garantizar un suministro equilibrado de nutrientes y evitar problemas de sobreconcentración o deficiencia en las plantas. En el contexto agrícola, los sensores de TDS resultan indispensables para el monitoreo continuo de la calidad del agua y la eficiencia de los sistemas de riego y dosificación automatizados. (Benassi, 2018).

### **Figura 8**

*Sensor de TDS para Arduino (Imagen Ilustrativa)*



*Nota.* Sensor para medir los sólidos disueltos totales del riego en el cultivo. Tomado de. Módulo sensor de calidad de agua TDS V10. Mercado Libre Colombia. (s.f.).

[https://articulo.mercadolibre.com.ve/MLV-915001858-modulo-sensor-de-calidad-de-agua-tds-v10-medidor-de-agua-\\_JM](https://articulo.mercadolibre.com.ve/MLV-915001858-modulo-sensor-de-calidad-de-agua-tds-v10-medidor-de-agua-_JM)

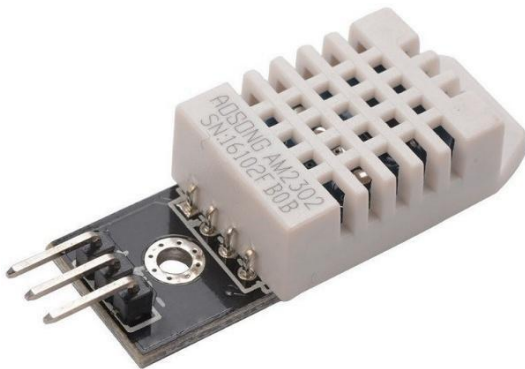
### **Sensor DTH22**

El sensor DHT22 es un dispositivo utilizado para medir la temperatura y la humedad ambiental con alta precisión. Este sensor convierte las variaciones en la humedad relativa y la temperatura en señales eléctricas que pueden ser interpretadas por un sistema de control o microcontrolador. Su funcionamiento se basa en un sensor capacitivo para la humedad y un

termistor para la temperatura, proporcionando datos digitales a través de un protocolo de comunicación sencillo. Los sensores DHT22 son ampliamente utilizados en proyectos de automatización, monitoreo ambiental y sistemas de control climático, donde es crucial mantener condiciones ambientales estables para procesos o cultivos. (Gómez & Martínez, 2023).

### **Figura 9**

*Sensor de Humedad y Temperatura DHT22 (Imagen Ilustrativa)*



*Nota.* Sensor para medir humedad y temperatura en el cultivo. Tomado de. Sensor de humedad DHT22. Mercado Libre Colombia. (s.f.). <https://www.mercadolibre.com.co/sensor-de-humedad-dht22-proyectos--arduino-raspberry/up/MCOU2432157604>

### **Válvula Solenoide de Agua 12V ½**

La válvula solenoide de agua 12V ½ es un dispositivo electromecánico utilizado para controlar el flujo de agua en sistemas automatizados. Funciona mediante una bobina eléctrica que, al ser energizada, mueve un émbolo o disco interno para abrir o cerrar el paso del agua. Este tipo de válvula permite el control remoto y automático del flujo, siendo fundamental en sistemas de riego, hidroponía y aplicaciones industriales. La válvula opera con una tensión de 12 voltios,

lo que la hace compatible con sistemas electrónicos y microcontroladores para una fácil integración y gestión eficiente del agua. (Gómez & Martínez, 2023).

### ***Figura 10***

*Válvula Solenoide de Agua (Imagen Ilustrativa)*



*Nota.* Esta válvula es la encargada de suministrar agua al tanque de almacenamiento. Tomado de. Válvula solenoide 1/2" 24 V DC. 3D Robotics Corp. (s.f.).

<https://3droboticscorp.com/producto/valvula-solenoide-1-2-24-v-dc/>

### ***Sensor de Proximidad HC-SR04 (Ultrasónico)***

El sensor de proximidad HC-SR04 es un dispositivo utilizado para medir distancias mediante ondas ultrasónicas. Funciona emitiendo un pulso ultrasónico que se refleja en el objeto cercano y es recibido por el sensor, calculando el tiempo transcurrido para determinar la distancia al objeto. Este sensor proporciona mediciones precisas y rápidas, con un rango típico de 2 cm a 400 cm. Es ampliamente utilizado en proyectos de robótica, automatización y sistemas de control, donde se requiere detección de obstáculos o medición de distancia sin contacto físico. Su

salida digital es fácilmente interpretable por microcontroladores para aplicaciones en tiempo real. (Gómez & Martínez, 2023).

### **Figura 11**

*Sensor de Proximidad HC-SR04 (Imagen Ilustrativa)*



*Nota.* Este sensor es utilizado para medir el nivel de agua en el tanque, enviando y recibiendo pulsos ultrasónicos. Tomado de. Sensor de distancia ultrasónico HC-SR04. Dinastía Tecnológica. (s. f.). <https://dinastiatecnologica.com/producto/sensor-de-distancia-ultrasonico-hc-sr04/>

### **Bomba Peristáltica**

La bomba peristáltica es un dispositivo mecánico utilizado para transportar líquidos de manera precisa y controlada, mediante la compresión secuencial de un tubo flexible que genera el movimiento del fluido. Su funcionamiento se basa en un rotor con rodillos que aprietan el tubo, impulsando el líquido sin que este entre en contacto con partes mecánicas, lo que la hace ideal para manejar líquidos sensibles o corrosivos. Este tipo de bomba es ampliamente empleada en laboratorios, sistemas de dosificación, aplicaciones médicas y procesos industriales donde se

requiere un flujo constante y controlado. La bomba puede ser controlada fácilmente por sistemas electrónicos para ajustarse a las necesidades específicas del proceso. (Hinotek, 2025).

### **Figura 12**

*Bomba Peristáltica (Imagen Ilustrativa)*



*Nota.* Esta bomba peristáltica suministra y dosifica líquidos en el sistema. Tomado de. Bomba dosificadora de líquidos para dispositivos de laboratorio / acuario 5 W 60 ml/min 12 V. Walmart México. (s. f.). <https://www.walmart.com.mx/ip/mini-bomba-peristaltica-pequena-bomba-dosificadora-de-liquidos-para-dispositivos-de-laboratorio-de-acuario-5w-60ml-min-12v/00690100085890>

### **Pantalla LCD 16x2 (con I2C)**

La pantalla LCD 16x2 con interfaz I2C es un módulo de visualización que permite mostrar hasta 16 caracteres en dos filas. Gracias a su comunicación mediante el protocolo I2C, reduce significativamente la cantidad de pines necesarios para su conexión con

microcontroladores o sistemas embebidos, facilitando la integración en proyectos electrónicos. Este tipo de pantalla es ampliamente utilizada en aplicaciones que requieren mostrar información de forma clara y sencilla, como en dispositivos electrónicos, sistemas de monitoreo, y proyectos de automatización. La interfaz I2C también permite controlar varias pantallas o dispositivos usando solo dos líneas de comunicación, optimizando recursos y simplificando el cableado. Su bajo consumo energético y facilidad de programación la convierten en una opción muy popular en el desarrollo de prototipos y productos finales. (Hinotek, 2025).

### **Figura 13**

*Pantalla LCD (Imagen Ilustrativa)*



*Nota.* Esta pantalla es la encargada de mostrar todos los datos del cultivo al usuario. Tomado de. Módulo LCD 1602 con luz de fondo amarillo verde. Mercado Libre Colombia. (s. f.). <https://www.mercadolivre.com.br/modulo-de-tela-lcd-1602-com-luz-de-fundo-amarelo-verde/p/MLB2034230276>

## Servo MG996R

El servo MG996R es un actuador electromecánico ampliamente utilizado en proyectos de robótica, automatización y control de movimiento. Cuenta con un motor de alta velocidad y torque, capaz de ofrecer una fuerza considerable para mover cargas moderadas con precisión. Este servo opera mediante señales PWM para controlar la posición angular del eje, permitiendo movimientos suaves y exactos en un rango típico de 0 a 180 grados. Su construcción robusta y engranajes metálicos proporcionan durabilidad y resistencia en aplicaciones exigentes. Además, el MG996R es compatible con la mayoría de los microcontroladores y plataformas de desarrollo, facilitando su integración en sistemas embebidos y proyectos de control remoto. (Hinotek, 2025; RobotShop, s.f.).

### Figura 14

*Servomotor MG996R (Imagen Ilustrativa)*



*Nota.* Servomotor eléctrico metálico. Tomado de. Servomotor con torque de 10 kgf·cm MOT-135 Steren. Walmart México. (s.f.). <https://www.walmart.com.mx/ip/servomotor-con-torque-de-10-kgf-cm-mot-135-steren-mot-135/00750625093015>

### Fuente de Alimentación Switching 12V 20A 110V

La Fuente de Alimentación Switching 12V 20A 110V es un dispositivo electrónico diseñado para convertir la corriente alterna de la red eléctrica en una corriente continua estable y regulada de 12 voltios con una capacidad de hasta 20 amperios. Este tipo de fuente es altamente eficiente gracias a su tecnología de conmutación, que reduce el desperdicio energético y permite un tamaño compacto y bajo calentamiento. Es ideal para proyectos que requieren un suministro constante y confiable de energía, como sistemas de automatización, robótica y dispositivos electrónicos que operan con voltajes de 12V. Además, cuenta con protecciones integradas contra sobrecarga, cortocircuito y sobretensión, garantizando la seguridad y durabilidad del equipo conectado. Su compatibilidad con voltajes de entrada estándar (110V o 220V AC) la hace versátil para distintos entornos eléctricos. (Hinotek, 2025; RoosTech Electrónica, s.f.).

#### Figura 15

*Fuente de Alimentación Switching 12V 20A 110V (Imagen Ilustrativa)*



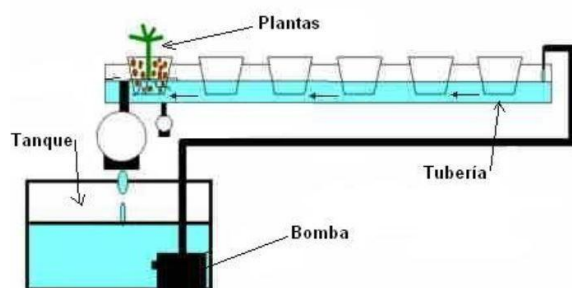
*Nota.* Esta fuente de alimentación switching de 12 V DC y 300 W es la encargada de suministrar voltaje a los componentes electrónicos del cultivo automatizado. Tomado de. 12 V DC 25 A 300 W Switching Power Supply. ATO. (s. f.). <https://www.ato.com/12v-dc-25a-300w-switching-power-supply>

### ***Sistema NFT (Nutrient Film Technique, Técnica de Película Nutritiva)***

Este sistema consiste en un flujo constante de una delgada capa de solución nutritiva que pasa sobre las raíces de las plantas, que están apoyadas en una canaleta o tubo inclinado. Las raíces se encuentran parcialmente expuestas al aire y parcialmente sumergidas en la película de nutrientes. (Resh, 2012).

### **Figura 16**

*sistema NFT (Imagen Ilustrativa)*



*Nota.* Esta imagen representa el sistema de técnica de película nutritiva. Tomado de. El Sistema de Recirculación Nutrient Film Technique NFT. Globalg.A.P. (2021).

<https://www.fertilab.com.mx/blog/223-el-sistema-de-recirculacion-nutrient-film-technique-nft/>

### **Temperatura**

La temperatura es un factor ambiental determinante en el desarrollo de las plantas, ya que influye directamente en su metabolismo y en la tasa de crecimiento. Una temperatura adecuada permite una correcta absorción de nutrientes y favorece los procesos fisiológicos esenciales para el desarrollo del cultivo. Por ejemplo, en Colombia se han encontrado rangos óptimos de temperatura para cultivos en zonas tropicales que favorecen el crecimiento vegetal (FAO/UPRA, s. f.).

## **Humedad**

La humedad relativa del aire influye en la capacidad de las plantas para absorber agua y nutrientes a través de sus raíces. Un nivel inadecuado de humedad puede desequilibrar el balance hídrico de la planta, incrementando el riesgo de enfermedades fúngicas y bacterianas. Estudios en Colombia han mostrado que en la propagación de albahaca la humedad del medio de cultivo tiene un impacto significativo en el desarrollo (Martínez, Torres & Campos, 2005).

## **pH**

El pH del sustrato o de la solución nutritiva es crucial para la disponibilidad y absorción de nutrientes por parte de la planta. Un desequilibrio en el pH puede limitar la asimilación de ciertos elementos esenciales, afectando negativamente el crecimiento y la productividad del cultivo. En cultivos hidropónicos colombianos se destaca la necesidad de un pH controlado (Colombia.com – Vida y Estilo, 2020).

## **TDS (Sólidos Disueltos Totales)**

Los sólidos disueltos totales (TDS) representan la concentración total de sales y nutrientes disueltos en la solución nutritiva. Valores bajos de TDS pueden indicar una deficiencia en el suministro de nutrientes, mientras que niveles excesivos pueden generar toxicidad, dañar las raíces y disminuir el rendimiento del cultivo. En el contexto colombiano, se subraya la importancia de controlar EC/pH en soluciones nutritivas para cultivos hidropónicos (Colombia.com – Vida y Estilo, 2020).

## **Marco Teórico**

Para el desarrollo del presente proyecto aplicado, se consideraron los enfoques, teorías y antecedentes más relevantes que respaldan y explican el objeto de estudio. Este marco teórico

permite comprender el problema desde una perspectiva fundamentada y orienta tanto la metodología como el análisis de los resultados.

## **Antecedentes**

### **Antecedentes Internacionales**

En el presente apartado se expone el estado del arte a partir de la revisión de investigaciones internacionales relevantes en el campo de la automatización en sistemas hidropónicos, la dosificación de fertilizantes y el control de riego. Para la búsqueda de antecedentes, se utilizaron palabras clave en español tales como: “sistemas hidropónicos”, “riego automatizado”, “dosificación de fertilizantes”, “agricultura inteligente”, “automatización agrícola” y “manejo de soluciones nutritivas”, con el fin de ampliar el alcance de la revisión.

Las búsquedas se realizaron en bases de datos académicas reconocidas como Scopus, ScienceDirect, IEEE Xplore, Google Académico, Scielo, y Redalyc, considerando publicaciones entre los años 2015 y 2024. Se priorizaron artículos científicos, tesis, libros especializados y ponencias indexadas. Esta metodología permitió identificar tendencias, enfoques tecnológicos y brechas en el desarrollo de soluciones automatizadas para la agricultura hidropónica, sirviendo como base teórica y técnica para el desarrollo del presente proyecto.

A nivel internacional, se encuentra la tesis de maestría titulada “Desarrollo de un sistema hidropónico para la producción de hortalizas en condiciones urbanas” realizada por García, A., y Rodríguez, J. Este estudio explora la viabilidad de utilizar sistemas hidropónicos en áreas urbanas para la producción sostenible de hortalizas, destacando la importancia de la hidroponía como una técnica innovadora que permite el cultivo de vegetales sin el uso de suelo. Los autores presentan cómo el cultivo de hortalizas mediante hidroponía es una alternativa para afrontar los desafíos del crecimiento poblacional y la escasez de tierras agrícolas en áreas urbanas.

Además, la investigación menciona que los sistemas hidropónicos no solo permiten una mayor eficiencia en el uso del agua y los nutrientes, sino que también reducen la exposición a plagas y enfermedades comunes en cultivos tradicionales. A lo largo del estudio, se citan fuentes como Smith & Brown (2012), quienes destacan la ventaja de los sistemas hidropónicos para el cultivo de vegetales en condiciones controladas, lo que permite optimizar el crecimiento de las plantas en espacios limitados.

Este tipo de investigaciones es fundamental para promover prácticas agrícolas innovadoras que respondan a los retos de la urbanización creciente y la demanda de alimentos frescos y saludables. La hidroponía, al ser un método eficiente de cultivo, representa una excelente alternativa para la producción de alimentos sin la necesidad de grandes extensiones de terreno.

A nivel internacional, países como Países Bajos, Japón e Israel han implementado con éxito sistemas hidropónicos a gran escala, integrando tecnologías avanzadas como sensores, inteligencia artificial y sistemas automatizados de riego y fertilización, con el fin de maximizar el rendimiento agrícola y reducir el uso de recursos naturales. Estas experiencias demuestran que la hidroponía no solo es viable, sino estratégica para garantizar la seguridad alimentaria en contextos urbanos y con limitaciones hídricas (FAO, 2022; Pérez et al., 2021).

### **Antecedentes Nacionales**

A nivel nacional, se encuentra la tesis de maestría titulada *Diseño de un sistema hidropónico para el cultivo de hortalizas en condiciones urbanas*, realizada por Gómez, A., y Sánchez, P., que aborda la importancia de la agricultura urbana y la implementación de sistemas hidropónicos como una solución sostenible para el cultivo de hortalizas en ciudades. Este trabajo tiene como propósito resolver las dificultades que enfrentan las áreas urbanas para acceder a

alimentos frescos y saludables, promoviendo prácticas agrícolas sostenibles. A lo largo del estado del arte, los autores citan diversas investigaciones nacionales e internacionales que abordan el desarrollo de cultivos hidropónicos y su relevancia para la seguridad alimentaria en entornos urbanos.

Se menciona también el trabajo de Ríos, L. (2017) en su tesis *La hidroponía como alternativa agrícola en Colombia*, quien resalta el potencial de los cultivos hidropónicos para mejorar la producción de hortalizas en zonas urbanas y rurales. Ríos, a través de sus investigaciones, muestra cómo la hidroponía puede contribuir a la reducción del uso de tierra, optimización del consumo de agua y disminución de los costos asociados con la agricultura tradicional. También se señala la viabilidad de estos sistemas para pequeñas y medianas empresas agrícolas, lo que beneficia tanto a los productores como a los consumidores locales.

Adicionalmente, Ramírez, C., y Benítez, M. (2018), en su estudio desarrollado en la Universidad Nacional de Colombia, titulado *Evaluación técnica de un sistema hidropónico automatizado para cultivos de hortaliza en clima templado*, evidencian mejoras en la eficiencia del uso del agua y el crecimiento uniforme de las plantas en comparación con métodos tradicionales. Esta investigación demuestra la aplicabilidad de sistemas hidropónicos con tecnologías accesibles para productores locales.

Otro aporte relevante es el trabajo de Torres, J. (2019), de la Universidad de Antioquia, quien en su tesis *Viabilidad económica de la hidroponía en comunidades rurales del suroeste antioqueño*, analiza el impacto económico y social de estos sistemas en comunidades agrícolas con acceso limitado a tierra y recursos hídricos. El estudio concluye que, con la capacitación adecuada, la hidroponía puede convertirse en una fuente de ingresos estable para familias campesinas.

Además, se destaca la investigación internacional de Martínez, G., y Rodríguez, J. (2015), titulada *Hidroponía: un enfoque innovador para la agricultura urbana*, que aporta al conocimiento de cómo los sistemas hidropónicos pueden ser aplicados en entornos urbanos para generar cultivos de alta calidad, sin necesidad de grandes extensiones de tierra. Esta investigación ha servido como un referente importante en Colombia, ya que ofrece ejemplos prácticos de implementación y el uso de la tecnología en el desarrollo de cultivos sostenibles.

## **Metodología**

### **Enfoque Metodológico**

El presente proyecto aplicado adopta un enfoque mixto (cuantitativo y cualitativo), de tipo aplicado y experimental, orientado al diseño, desarrollo e implementación de un sistema automatizado para el control del riego y la dosificación de fertilizantes en cultivos hidropónicos de hortalizas.

El componente cuantitativo se refleja en la medición y análisis de variables ambientales y nutricionales (pH, TDS, temperatura y humedad), así como en la evaluación de la eficiencia del sistema mediante datos numéricos recolectados durante las pruebas experimentales.

El componente cualitativo se evidencia en la observación del comportamiento del cultivo y en la valoración de la funcionalidad práctica del sistema en condiciones controladas.

### **Tipo de Investigación**

La investigación se clasifica como proyecto tecnológico de desarrollo experimental, ya que su propósito es la creación de un prototipo funcional basado en principios de automatización agrícola. Este tipo de estudio busca validar una solución tecnológica que responda a una necesidad real del sector agrícola, aplicando conocimientos de ingeniería electrónica y control automático.

### **Diseño Metodológico**

El desarrollo del proyecto se estructura en cuatro fases principales, que abarcan desde la investigación preliminar hasta la validación del prototipo:

#### ***Fase 1. Investigación Preliminar***

En esta etapa se realizó una revisión documental de fuentes académicas y técnicas relacionadas con:

Sistemas de cultivo hidropónico y sus variables críticas. Estrategias de control de riego y dosificación de fertilizantes.

Tecnologías de automatización agrícola (sensores, actuadores, controladores y protocolos de comunicación).

El propósito de esta fase fue establecer los fundamentos teóricos y técnicos necesarios para el diseño del sistema, identificando los parámetros óptimos de operación y los requerimientos del cultivo.

### ***Fase 2. Diseño del Sistema***

Con base en la información obtenida, se elaboró la arquitectura conceptual del sistema automatizado, definiendo los bloques funcionales, la interacción entre componentes y las variables a monitorear.

Durante esta etapa se determinaron las estrategias de control, el flujo de datos, la interfaz de usuario y la lógica de funcionamiento general.

### ***Fase 3. Implementación del Prototipo***

En esta fase se integraron los componentes electrónicos, mecánicos y de control que conforman el sistema. Se programó el microcontrolador con los algoritmos necesarios para:

- Medir y procesar las señales de los sensores (pH, TDS, distancia, humedad y temperatura).
- Activar las bombas y válvulas para el control del riego y la dosificación de fertilizantes.
- Transmitir datos al módulo de comunicación y a la interfaz de usuario.
- El montaje se realizó inicialmente en protoboard para pruebas preliminares y

posteriormente se ensambló en una tarjeta PCB definitiva.

#### ***Fase 4. Pruebas y Validación***

Finalmente, se efectuaron pruebas experimentales en un módulo de cultivo hidropónico tipo NFT, con el fin de evaluar el desempeño del sistema en condiciones reales.

Las pruebas se enfocaron en:

- Verificar la precisión de las mediciones de pH y TDS.
- Evaluar la respuesta del sistema ante variaciones de las condiciones ambientales.
- Medir la eficiencia en el uso de agua y fertilizantes.
- Comparar los resultados con métodos de control manual.

Los datos recolectados se procesaron estadísticamente para determinar el impacto del sistema en la productividad y sostenibilidad del cultivo.

#### ***Técnicas e Instrumentos***

Para el desarrollo del proyecto se emplearon los siguientes instrumentos y herramientas:

**Instrumentos de Medición.** sensores de pH, TDS, DHT22 y HC-SR04.

**Instrumentos de Control.** microcontrolador Arduino, actuadores (bombas peristálticas, válvula solenoide, electrobomba, servomotor).

**Software de Programación y Simulación.** Arduino IDE, Proteus, Fritzing, y herramientas de diseño PCB.

**Instrumentos de Análisis.** hojas de cálculo y software estadístico para la evaluación de los resultados experimentales.

**Variables del Estudio.** Las variables consideradas se clasifican en dos categorías:

**Variables Independientes.** pH, TDS, nivel de agua, temperatura y humedad.

**Variables Dependientes.** crecimiento de las plantas, consumo de agua, uniformidad del cultivo y tiempo de cosecha.

El control automatizado de las variables independientes permitió evaluar su efecto directo sobre los indicadores de productividad y eficiencia.

### **Validez y Confiabilidad**

La validez del sistema se garantiza mediante la comparación de las mediciones obtenidas por los sensores con instrumentos de referencia calibrados.

La confiabilidad se determinó a través de la repetición de pruebas bajo las mismas condiciones experimentales, verificando la consistencia de los resultados en diferentes réplicas.

## **Desarrollo o Implementación**

### **Diseño del Sistema**

Con base en los requerimientos definidos, el sistema se diseña teniendo en cuenta lo siguiente:

### **Selección de Componentes**

La selección de estos componentes se hizo de una manera muy cuidadosa tomando en cuenta los requerimientos del cultivo y eligiendo el componente más adecuado y que mejor se desempeñe a la hora de la instalación y puesta en funcionamiento.

### ***Sensor de pH***

Monitorea el pH de la solución nutritiva, asegurando que se mantenga dentro de los rangos adecuados para los cultivos hidropónicos.

La tabla 1 tiene como objetivo comparar distintas opciones de sensores de pH disponibles en el mercado, destacando sus características técnicas, costo y aplicabilidad. Su relevancia radica en sustentar la elección del sensor más adecuado para el monitoreo preciso del pH en sistemas hidropónicos, lo cual es esencial para garantizar el desarrollo óptimo de los cultivos.

**Tabla 1**

*Comparación Entre el Sensor de pH Seleccionado y otros Sensores Disponibles en el Mercado*

Modelo / Referencia	Rango (pH)	Exactitud ( $\pm$ pH)	Resolución (pH)	Costo (COP)	Voltaje de operación (V)
PH-4502C	4 - 8	$\pm 0.10$	0.01	\$114.000	5.0V
HandyLab 100	3 - 11	$\pm 0.20$	0.01	\$122.920	3.7V
HM Digital PH-200	5 - 9	$\pm 0.30$	0.01	\$190.999	3.7V

*Nota.* Comparación de sensores de pH. Adaptado de. DFRobot (2024.), SI Analytics (2024.) y HM Digital (2024.).

[https://www.xylem.com/siteassets/brand/si-analytics/resources/manual/imported/int/imported-int/handy-lab-100\\_ph-meter\\_650-kb\\_english-pdf.pdf?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.xylem.com/siteassets/brand/si-analytics/resources/manual/imported/int/imported-int/handy-lab-100_ph-meter_650-kb_english-pdf.pdf?utm_source=chatgpt.com)

Se eligió el sensor de pH para Arduino (PH-4502C) porque ofrece una exactitud de  $\pm 0.1$  pH, superior a la de los otros sensores analizados ( $\pm 0.2$  pH y  $\pm 0.3$  pH respectivamente), lo que permite un control más exacto del pH, fundamental para mantener condiciones óptimas en cultivos hidropónicos.

### ***Sensor de TDS***

El sensor TDS mide la conductividad eléctrica del agua, ya que los sólidos disueltos en el agua aumentan su capacidad de conducción. Cuantos más sólidos hay en el agua, mayor es su conductividad. El sensor convierte esta medición de conductividad en un valor de TDS, generalmente expresado en ppm (partes por millón) o mg/L. (Benassi, 2018).

La Tabla 2 tiene como objetivo comparar diferentes sensores de TDS disponibles en el mercado, considerando su rango de medición, precisión, costo y características técnicas. Su

relevancia radica en respaldar la elección del sensor más adecuado para medir la concentración de sólidos disueltos en soluciones nutritivas dentro de sistemas hidropónicos, lo cual es clave para mantener la calidad del agua y asegurar un desarrollo saludable de los cultivos.

**Tabla 2**

*Comparación entre el Sensor de TDS Seleccionado y otros Sensores Disponibles en el Mercado*

Sensor	Referencia	Rango de medición	Precisión	Costo (COP)	Voltaje de operación(V)
TDS para Arduino ESP32	TDS Meter V1.0	0-1000 ppm (hasta 2000 ppm)	±2%	\$63.440	3.3V – 5.0V
TDS de Sólidos Disueltos Gravity para Arduino	SEN0244 (DFRobot)	0-1000 ppm	±2%	\$119.900	3.3V – 5.5V
TDS A07 para Arduino	TDS-A07	0-1000 ppm	±2%	\$153.313	5.0V

*Nota.* comparación de sensores de TDS. Adaptado de. DFRobot (2024.), Keyestudio (2024.) y otros distribuidores de sensores TDS para Arduino. [https://wiki.dfrobot.com/gravity\\_analog\\_tds\\_sensor\\_\\_\\_meter\\_for\\_arduino\\_sku\\_sen0244](https://wiki.dfrobot.com/gravity_analog_tds_sensor___meter_for_arduino_sku_sen0244)

El sensor TDS para Arduino ESP32 (TDS Meter V1.0) fue seleccionado por ser fácil de integrar con la plataforma, ofrecer un amplio rango de medición de sólidos disueltos (TDS) y contar con funciones avanzadas de conectividad. También destaca por tener un precio accesible en relación con las prestaciones que brinda.

### ***Sensor de Temperatura y Humedad Ambiental***

Controla las condiciones ambientales que pueden influir en el crecimiento de las plantas y la evaporación de la solución nutritiva.

La Tabla 3 tiene como objetivo presentar una comparación entre distintos sensores de temperatura y humedad ambiental disponibles en el mercado, analizando su precisión, rango de medición, costo y otras especificaciones técnicas. Su relevancia radica en justificar la elección del sensor más adecuado para monitorear las condiciones ambientales dentro de un sistema hidropónico, lo cual es fundamental para mantener un entorno estable y favorable para el desarrollo de los cultivos.

**Tabla 3**

*Comparación entre el Sensor de Humedad y Temperatura Seleccionado y otros Sensores*

*Disponibles en el Mercado*

Sensor	Referencia	Rango de medición	Precisión	Costo (COP)	Voltaje de operación(V)
DHT22	DHT22 / AM2302	Humedad: 0-100% RH, Temp: -40 a 80°C	Humedad: $\pm 2-5\%$ RH, Temp: $\pm 0.5^\circ\text{C}$	\$30.990	3.3V – 6.0V
DHT11	DHT11	Humedad: 20-90% RH, Temp: 0-50°C	Humedad: $\pm 5\%$ RH, Temp: $\pm 2^\circ\text{C}$	\$14.000	3.0V – 5.0V
AM2302	AM2302 (versión encapsulada del DHT22)	Humedad: 0-100% RH, Temp: -40 a 80°C	Humedad: $\pm 2-5\%$ RH, Temp: $\pm 0.5^\circ\text{C}$	\$27.084	3.3V – 6.0V

*Nota.* comparación de sensores de humedad y temperatura. Adaptado de. Adafruit (2024.) y DFRobot (2024.).

<https://datasheetgo.com/dht22-temperature-humidity-sensor/>

El sensor DHT22 fue seleccionado por ofrecer una mejor precisión y un rango de medición más amplio tanto para temperatura como para humedad en comparación con otras opciones analizadas. Estas características lo hacen especialmente adecuado para entornos

agrícolas controlados como los sistemas hidropónicos, donde las variaciones en la humedad relativa y la temperatura pueden afectar directamente la tasa de evaporación de la solución nutritiva y el desarrollo fisiológico de las plantas. Además, su compatibilidad con plataformas como Arduino y su bajo consumo energético facilitan su integración en sistemas automatizados de monitoreo ambiental.

### ***Sensor de Proximidad (Nivel de Agua)***

Este sensor mide el nivel de agua en el tanque principal de almacenamiento de la solución nutritiva. Asegura que siempre haya suficiente agua disponible para el sistema de riego.

La Tabla 4 tiene como objetivo comparar distintas opciones de sensores de proximidad disponibles en el mercado para medir el nivel de agua, considerando su rango de medición, precisión, costo y especificaciones técnicas. Su relevancia radica en fundamentar la elección del sensor más apropiado para garantizar un monitoreo confiable del nivel de solución nutritiva, aspecto crucial para el funcionamiento continuo y eficiente del sistema hidropónico.

**Tabla 4**

*Comparación entre el Sensor Proximidad Seleccionado y otros Sensores Disponibles en el Mercado*

Sensor	Referencias	Rango de medición(cm)	Precisión	Costo (COP)	Tecnología
HC-SR04	HC-SR04	2 - 400	±3 mm	\$14.280	Ultrasónico
Sensor IR	GP2Y0A21YK0F	1 - 80	±5 mm	\$27.370	Infrarrojo
LIDAR VL53L0X	VL53L0X	3 - 200	±3%	\$16.500	Tiempo de vuelo(ToF)

*Nota. comparación de sensores de proximidad. Adaptado de. DFRobot (2024.), Sharp (2024.) y Pololu (2024.).*

[https://cdn.sparkfun.com/assets/a/8/9/c/a/HC-SR04-33\\_Datasheet.pdf?utm\\_source=chatgpt.com](https://cdn.sparkfun.com/assets/a/8/9/c/a/HC-SR04-33_Datasheet.pdf?utm_source=chatgpt.com)

El sensor ultrasónico HC-SR04 es una excelente opción para medir distancias en proyectos de proximidad, ya que combina un bajo costo, buena precisión ( $\pm 3$  mm) y un rango de medición adecuado de hasta 400 cm. Su sencilla integración con Arduino lo convierte en una solución práctica y completa para la mayoría de las aplicaciones.

### **Selección de Actuadores**

Los actuadores controlarán el riego y la dosificación de fertilizantes. Los componentes seleccionados son:

#### ***Válvulas de Control de Agua***

Controlan el paso de agua que se vierte en el tanque principal del cultivo.

La Tabla 5 tiene como objetivo comparar diferentes tipos de válvulas disponibles en el mercado, considerando aspectos como voltaje de operación, presión máxima soportada, costo y facilidad de integración. Su relevancia radica en respaldar la selección de una válvula que permita un control eficiente y automatizado del flujo de agua en sistemas hidropónicos, lo cual es esencial para mantener un suministro constante y preciso en el proceso de riego.

**Tabla 5**

*Comparación entre la Válvula Seleccionada y otras Válvulas Disponibles en el Mercado*

Válvula	Voltaje de operación	Presión máxima (MPa)	Costo (COP)	Tipo de control
Válvula Solenoide de Agua 12V ½"	12V DC	0.02 - 0.8	\$26.000	Eléctrico
Válvula de Bola de Agua ½"	-	0.05 - 1	\$28.900	Manual
Válvula Solenoide de Agua 24V ½"	24V DC	0.02 - 0.8	\$38.000	Eléctrico

*Nota. Comparación de válvulas. Adaptado de. Electrocomponentes (2024.), Bricozone (2024.) y DFROBOT (2024.).*

*<https://www.vhf.cl/electro-valvula-agua-solenoide-24v-multiples-usos>*

La válvula solenoide de agua de 12V ½" es especialmente adecuada para proyectos de automatización, riego o control de flujo, ya que se puede controlar electrónicamente, lo que

permite automatizar el paso del agua. Comparada con válvulas manuales como las de bola o compuerta, esta opción ofrece mayor funcionalidad. Además, su bajo costo y fácil integración con Arduino la convierten en una alternativa eficiente para sistemas modernos (Sánchez, 2017).

### ***Bomba de Dosificación de Fertilizantes***

Dosifica de manera precisa los fertilizantes líquidos en la solución nutritiva.

La Tabla 6 tiene como objetivo comparar distintas bombas de dosificación disponibles en el mercado, evaluando su capacidad de dosificación, método de control del flujo, costo y características técnicas. Su relevancia radica en justificar la elección de una bomba que permita un control preciso y automatizado del suministro de fertilizantes líquidos, lo cual es esencial para mantener el equilibrio nutritivo en sistemas hidropónicos y asegurar un desarrollo óptimo de los cultivos.

**Tabla 6**

*Comparación de la Bomba de Dosificación Seleccionada y otras Bombas Disponibles en el Mercado*

Bomba	Capacidad de dosificación(mL/min)	Control del flujo	Costo (COP)	Precisión de dosificación
Peristáltica	0 - 200	Modulación de ancho de pulso (PWM)	\$96.541	Alta
Diafragma	0 - 100	Manual / relé	\$576.170	Media
Pistón	0 - 50	Manual / relé	\$155.000	Media

*Nota.* Comparación de bombas de dosificación. Adaptado de. DFRobot (2024.), SparkFun (2024.) y distribuidores de componentes electrónicos. <https://www.vhf.cl/electro-valvula-agua-solenoides-24v-multiples-usos>

La bomba peristáltica de 0 a 200 mL/min controlada por PWM es ideal para proyectos que requieren dosificación precisa de fertilizantes líquidos. Permite regular el flujo con exactitud mediante señales PWM, se integra fácilmente con Arduino y puede manejar un caudal constante y controlado. Además, destaca por su bajo mantenimiento, alta fiabilidad y resistencia a productos químicos, lo que la hace especialmente adecuada para sistemas de fertilización automatizada en hidroponía o riego.

### ***Electrobomba de Riego con los Nutrientes***

Esta bomba es la encargada de distribuir el agua en el cultivo con los fertilizantes ya diluidos cada vez que el controlador le dé la orden.

La Tabla 7 tiene como objetivo comparar diferentes electrobombas utilizadas en sistemas de riego automatizado, considerando su caudal, método de control del flujo, costo y especificaciones técnicas. Su relevancia radica en sustentar la elección de una bomba capaz de garantizar un suministro eficiente, constante y programado de solución nutritiva hacia los cultivos, aspecto fundamental para mantener un sistema hidropónico estable y funcional.

**Tabla 7**

*Comparación entre la Electrobomba de Agua Seleccionada y otras Electrobombas Disponibles en el Mercado*

Electrobomba	Caudal(mL/s)	Control del flujo	Costo (COP)	Precisión de flujo
Electrobomba Resun 350 L/h	5.833	Temporizador /válvula / relé	\$50.000	Media
Peristáltica	3.33	PWM	\$96.541	Alta
Diafragma	1.67	manual / relé	\$576.170	Media

*Nota.* Comparación entre electrobombas. Adaptado de. (2024.), DFRobot (2024.) y SparkFun (2024.).

<https://discusroafish.com/products/bomba-sumergible-resun-sp-850-350>

La bomba Resun de 350 L/h es una opción destacada para sistemas de hidroponía o riego automatizado gracias a su alto caudal, funcionamiento silencioso y bajo consumo de energía. Su diseño compacto y sumergible facilita la instalación e integración en distintos tipos de proyectos. Además, permite un control eficiente del flujo mediante el uso de temporizadores, válvulas dosificadoras o relés, lo que la convierte en una solución confiable, práctica y accesible para aplicaciones de pequeña y mediana escala (Jensen & Collins, 1985; Maher et al., 2008).

### **Controlador Principal**

Es el encargado de recibir las señales de los sensores, procesarlas y dar las órdenes a los actuadores.

La Tabla 8 tiene como objetivo comparar diferentes microcontroladores disponibles en el mercado en términos de tamaño, compatibilidad, costo y características técnicas. Su relevancia

radica en respaldar la selección del controlador más adecuado para gestionar el sistema automatizado de riego y fertirrigación, asegurando una integración eficiente con los sensores y actuadores empleados en el sistema hidropónico.

### Tabla 8

*Comparación entre el Microcontrolador Seleccionado y otros Microcontroladores Disponibles en el Mercado*

Microcontrolador	Dimensiones(mm)	Memoria (Flash / RAM)	Costo (COP)	Conectividad
Arduino Nano	45 × 18	32 KB / 2 KB	\$20.000	USB
Arduino Uno	68 × 53	32 KB / 2 KB	\$45.000	USB
ESP32 (DevKit)	55 × 28	4 MB / 520 KB	\$30.000	Wi-Fi/ Bluetooth

*Nota.* Comparación de microcontroladores. Adaptado de. Arduino (2024.) y Espressif Systems (2024.).

<https://store.arduino.cc/products/arduino-nano>

El Arduino Nano es una opción muy equilibrada para proyectos de automatización, como la dosificación de fertilizantes, debido a su tamaño compacto, que permite su instalación en espacios reducidos. Su compatibilidad con una amplia variedad de sensores y actuadores lo hace ideal para controlar bombas, válvulas y medir variables como pH, sólidos disueltos totales y temperatura. Es fácil de programar mediante el entorno Arduino IDE. Además, su bajo costo y el respaldo de una gran comunidad facilitan la implementación y solución de problemas en el desarrollo del proyecto.

## Pantalla de Interfaz

Esta pantalla permite la visualización de información básica como la humedad, pH, temperatura y TDS del sistema.

La Tabla 9 tiene como objetivo comparar distintas opciones de pantallas de interfaz de usuario disponibles en el mercado, considerando su tamaño, tipo de conexión, costo y características técnicas. Su relevancia radica en respaldar la selección de una pantalla que permita al usuario monitorear fácilmente los parámetros críticos del sistema hidropónico en tiempo real, facilitando así la supervisión y el mantenimiento del sistema automatizado.

### Tabla 9

*Comparación entre la Pantalla de Interfaz de Usuario Seleccionada y otras Pantallas Disponibles en el Mercado*

Pantalla	Tamaño	Tipo de interfaz	Costo (COP)	Tipo de visualización
Pantalla LCD 16x2 (con I2C)	16 x 2 caracteres	I2C	\$12.000	Monocromática (texto)
Pantalla OLED 0.96"	128 x 64 píxeles	I2C/SPI	\$22.000	Monocromática (gráfica)
Pantalla TFT 1.8" color	160x128 píxeles	SPI	\$35.000	A color (gráfica)

*Nota.* comparación entre la pantalla de interfaz. Adaptado de. Arduino (2024.), Adafruit (2024.) y DFRobot (2024.).

<https://www.winstar.com.tw/es/products/lcd-display/character-lcd-display-module/16x2-lcd.html>

La pantalla LCD 16x2 es una opción ideal para mostrar datos en proyectos de automatización de fertirrigación, gracias a su equilibrio entre simplicidad, funcionalidad y costo. Permite visualizar en tiempo real valores como pH, TDS, temperatura o el estado del sistema, con un bajo consumo de energía y una interfaz sencilla, especialmente al usar un módulo I2C. Su tamaño facilita una lectura clara a distancia, y su integración con Arduino es muy eficiente, ya que utiliza pocos recursos del microcontrolador, permitiendo dedicar más capacidad a otras tareas del sistema.

### **Sistema de Comunicación**

Esta interfaz es la encargada de suministrar todos los datos del cultivo en tiempo real al celular del usuario sin necesidad que vaya hasta el cultivo.

La Tabla 10 tiene como objetivo comparar distintos módulos de comunicación inalámbrica disponibles en el mercado, considerando su tamaño, compatibilidad, costo y especificaciones técnicas. Su relevancia radica en fundamentar la elección de un módulo que permita transmitir datos del sistema hidropónico en tiempo real al usuario, favoreciendo la supervisión remota en entornos donde el acceso a redes WiFi o internet es limitado o inexistente.

**Tabla 10**

*Comparación entre el Módulo de Comunicación Seleccionado y otros Módulos Disponibles en el Mercado*

Modulo	Versión Bluetooth	Modo de operación	Compatibilidad	Costo (COP)	Alcance(m)
HC-05	2.0	Maestro / esclavo	Android / Arduino	\$15.000	10
HC-06	2.0	Esclavo	Android / Arduino	\$13.000	10
HM-10	4.0	Esclavo	iOS / Android / Arduino	\$25.000	30

*Nota. Comparación de módulos. Adaptado de. DSD TECH (2024.), Seeed Studio (2024.) y Electrocomponentes (2024.).*

*<https://asxarduino.blogspot.com/2019/11/modulo-bluetooth-hc05.html>*

El módulo Bluetooth HC-05 es una opción ideal para implementar comunicación inalámbrica en proyectos de automatización de fertiirrigación, debido a su equilibrio entre simplicidad, funcionalidad y bajo costo. Aunque el alcance de la tecnología Bluetooth es limitado (aproximadamente 10 metros en condiciones óptimas), su uso está justificado porque permite establecer una conexión directa y estable entre el sistema y un teléfono móvil sin depender de redes WiFi o acceso a internet.

Esta característica es especialmente útil en zonas rurales o de cultivo alejadas de centros urbanos, donde la cobertura de internet suele ser limitada o inexistente. En estos contextos,

utilizar tecnologías como WiFi o servicios en la nube no sería viable, mientras que Bluetooth ofrece una solución local, confiable y de bajo consumo energético.

### **Servomotor para Sensores**

Este servomotor es el encargado de ingresar los sensores al agua del tanque principal para que realicen las respectivas mediciones y luego sacarlos para que se limpien y estén óptimos para la siguiente medición.

La Tabla 11 tiene como objetivo comparar distintas opciones de servomotores disponibles en el mercado, considerando su tamaño, torque, velocidad, costo y características relevantes para su integración en sistemas automatizados. Su relevancia radica en respaldar la elección de un actuador que ofrezca un equilibrio entre potencia, precisión y facilidad de integración, necesario para realizar movimientos mecánicos eficientes en sistemas agrícolas automatizados.

**Tabla 11**

*Comparación entre el Servomotor Seleccionado y otros Servomotores Disponibles en el Mercado*

Modelo servomotor	Voltaje de operación (V)	Tamaño	Torque / Velocidad	Costo (COP)	Aplicación recomendada
MG996R	4.8 – 6.0	Grande	10-13 kg/cm a 6V / 0.17s/60°	\$25.000	Robótica y control de carga media/alta
MG90S	4.8 – 6.0	Compacto	2.2 kg/cm a 4.8V / 0.10s/60°	\$15.000	Robótica ligera / servomecanismos
SG90	4.8 – 6.0	Muy compacto	1.8 kg/cm a 4.8V / 0.12s/60°	\$11.000	Prototipado y proyectos pequeños

*Nota.* Comparación de servomotores. Adaptado de. Datos técnicos de fabricantes (Tower Pro, 2024.; Arduino, 2024.)

<https://ssdielect.com/servomotores/1410-servomotor-mg996r.html>

El servomotor MG996R es una excelente elección para implementar mecanismos de automatización en sistemas de fertiirrigación gracias a su tamaño compacto, bajo consumo energético y facilidad de control desde plataformas como Arduino o ESP32. Este servo permite accionar válvulas pequeñas, mover compuertas o ajustar mecanismos con precisión sin requerir estructuras complejas ni fuentes de alimentación robustas. Además, es ampliamente soportado

por librerías y comunidades de desarrollo, lo cual facilita su integración y mantenimiento en entornos educativos o prototipos agrícolas.

### **Sistemas de Alimentación**

El sistema de alimentación es el encargado de proporcionar la energía necesaria para el funcionamiento continuo y confiable de todos los componentes del proyecto, incluyendo sensores, actuadores y el microcontrolador principal. Para ello, se empleó una fuente de alimentación capaz de suministrar distintos niveles de voltaje según los requerimientos eléctricos de cada dispositivo, garantizando estabilidad, seguridad y eficiencia operativa.

La Tabla 12 presenta una comparación de diversas fuentes de alimentación disponibles en el mercado, considerando parámetros como voltaje de salida, corriente suministrada, eficiencia, protección eléctrica y costo. Su propósito es justificar la selección de una fuente que ofrezca un balance adecuado entre capacidad, confiabilidad y compatibilidad con los dispositivos utilizados en el sistema. Este análisis es fundamental para asegurar una operación estable, evitar daños en los componentes electrónicos y garantizar un suministro energético óptimo en aplicaciones automatizadas agrícolas.

**Tabla 12**

*Comparación entre la Fuente de Alimentación Seleccionada y otras Disponibles en el Mercado*

Modelo / Referencia	Tipo de Fuente	Salidas (V / A)	Eficiencia (%)	Potencia (W)	Costo (COP)
Switching 12V 20A 110V	Conmutada (SMPS)	5V–2A / 12V–20A / 110VAC	85 %	240 W	\$95.000
Lineal 12V 10A	Lineal	12V–10A	70 %	120 W	\$120.000
Switching 12V 10A	Conmutada (SMPS)	5V–1A / 12V–10A	83 %	120 W	\$75.000

*Nota.* comparación entre las fuentes de alimentación. Adaptado de. Datos técnicos de fabricantes (Tower Pro, 2024.).

<https://osakaelectronicsltda.com/fuentes-de-voltaje-y-cargadores/fuentes-de-voltaje/fuentes-12vdc/fuente-switchada-conmutada-up-12v-10a-up-120-12.html>

La Fuente Switching 12V 20A 110V representa una opción altamente adecuada para sistemas automatizados como el de fertirrigación, debido a su capacidad de entregar múltiples niveles de voltaje desde una sola unidad y su alta eficiencia energética. Al proporcionar salidas de 5V para sensores y microcontroladores, 12V para bombas peristálticas y manejar entrada 110V AC para la electrobomba, asegura un funcionamiento integral y estable del sistema.

Circuito de control

Después de tener claridad y elección de los componentes que se van a utilizar se diseña un diagrama de bloques con el que se tiene una guía de todas las conexiones que se necesitan para tener el proyecto en total funcionamiento.

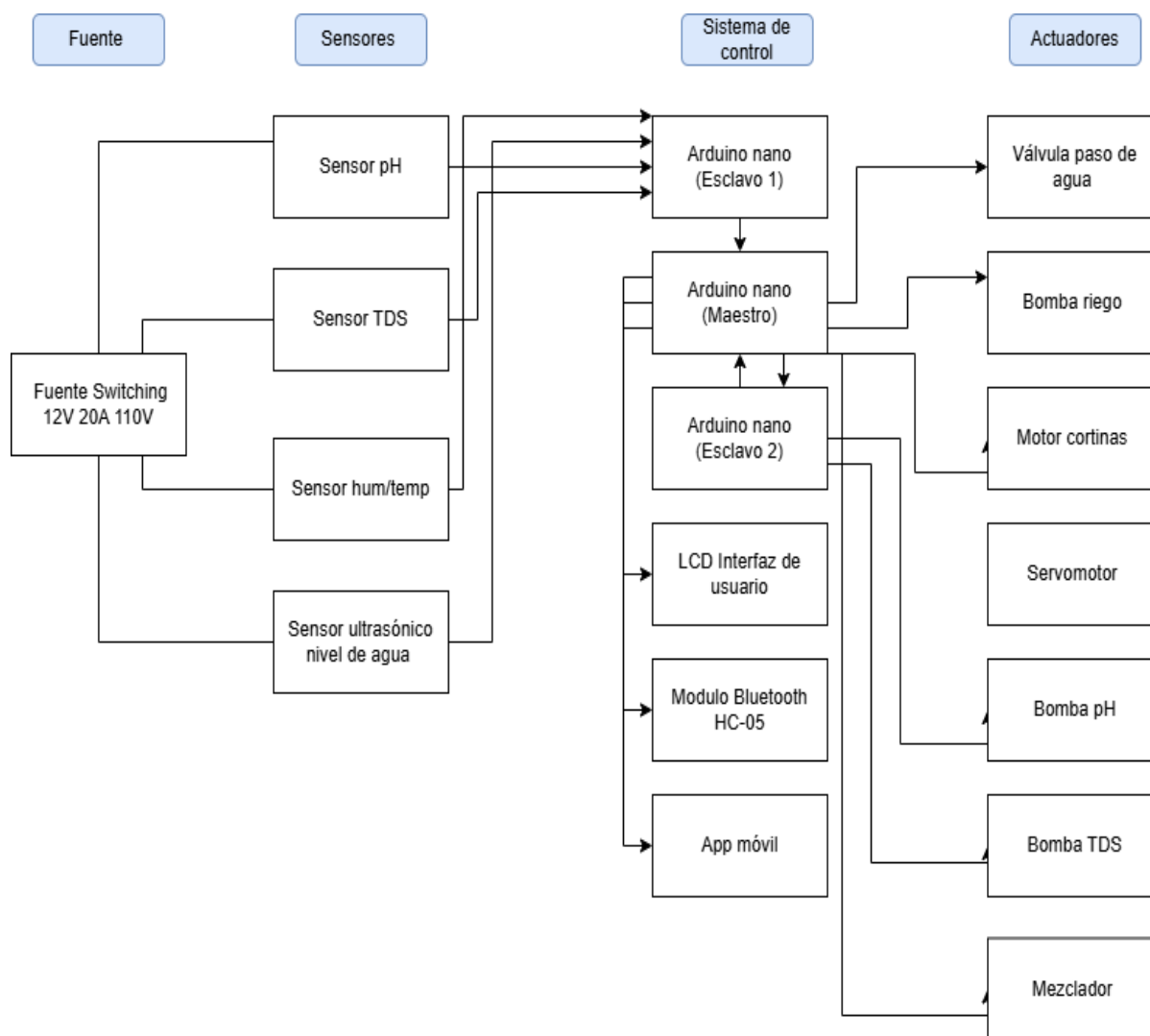
### **Diagrama de Bloques**

La Figura 1 muestra el diagrama de bloques del sistema, compuesto por sensores de pH, TDS, humedad, temperatura y ultrasónico. Los datos son procesados por dos Arduino Nano en configuración esclavo, encargados del control de actuadores como bombas, válvulas, servomotor, motor de cortinas y mezclador.

La información es centralizada en un Arduino Nano maestro, que coordina las acciones y se comunica mediante el módulo Bluetooth HC-05 con una interfaz de usuario en un dispositivo móvil, permitiendo el monitoreo en tiempo real. Este diseño optimiza el suministro de nutrientes, el riego y el control ambiental del sistema.

Figura 17

Diagrama de Bloques del Sistema



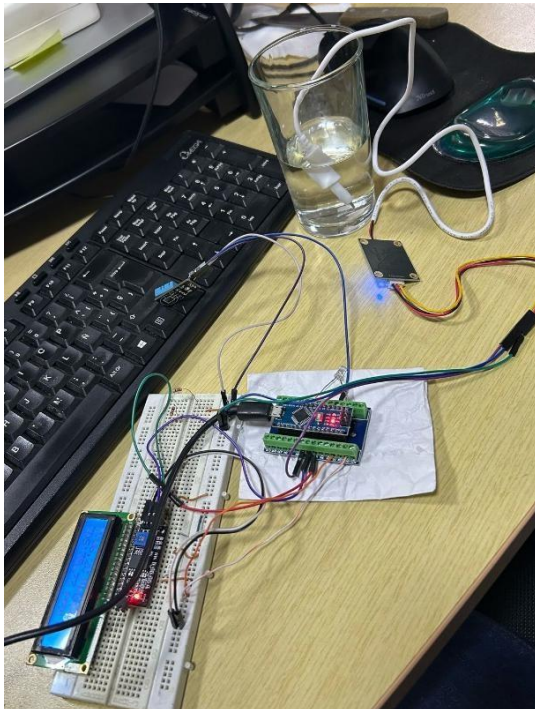
*Nota.* Se observan las conexiones de los dispositivos que conforman el sistema. Elaboración propia.

## Montaje en Protoboard

El montaje en una protoboard es muy importante porque desde este punto se inician a realizar los ajustes que en simulación no se pueden concretar. En la figura 7 se puede apreciar el montaje de los sensores y la pantalla LCD a los cuales se les realiza los ajustes correspondientes, por ejemplo para el sensor de pH se agrega agregar 3 soluciones de diferente pH y se van tomando los valores en voltaje, esto se ingresa a la programación para convertirlo a valor real de pH, para el sensor de TDS, humedad y temperatura se realiza la respectiva programación y se verifica que los datos proporcionados sean reales y se realizan los respectivos ajustes si es necesario.

## Figura 18

### *Pruebas en Protoboard*

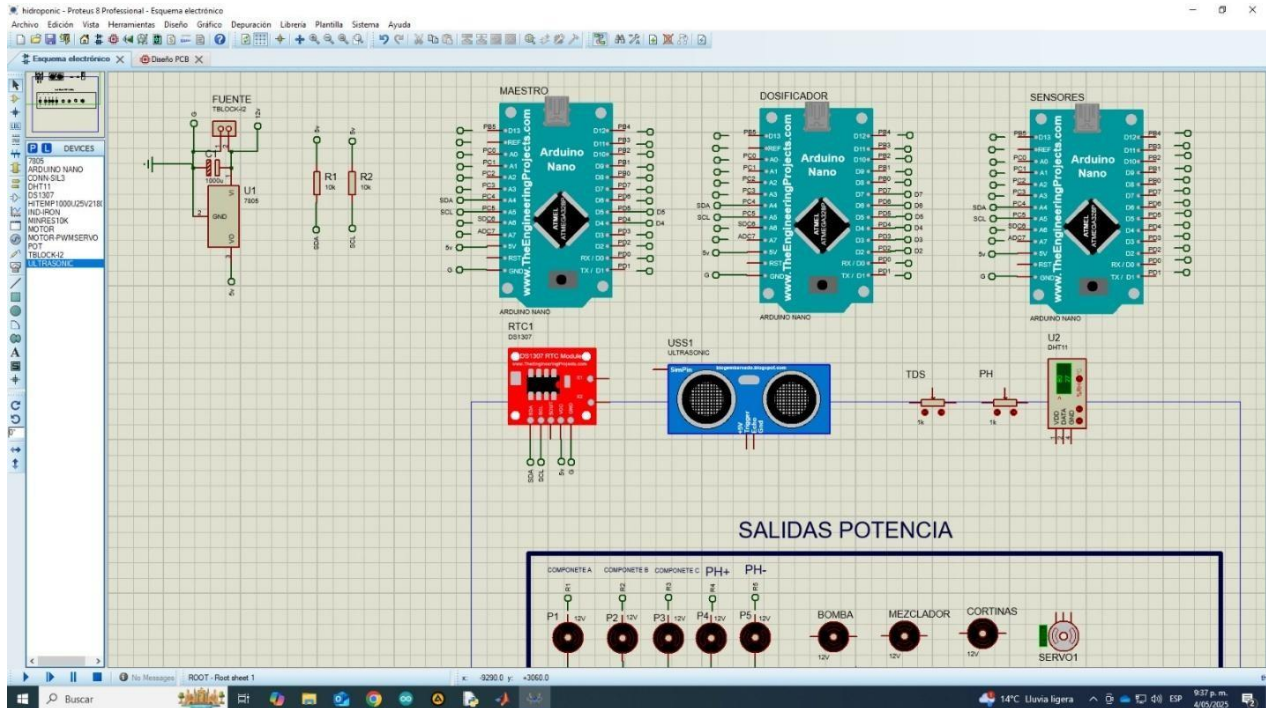


*Nota.* Montaje en protoboard de sensor de pH, TDS, humedad, temperatura y nivel de agua y se les hace las pruebas correspondientes para un buen funcionamiento. Elaboración propia.

## Diseño de la Tarjeta Electrónica

Figura 19

Simulación en Proteus de la Tarjeta Electrónica

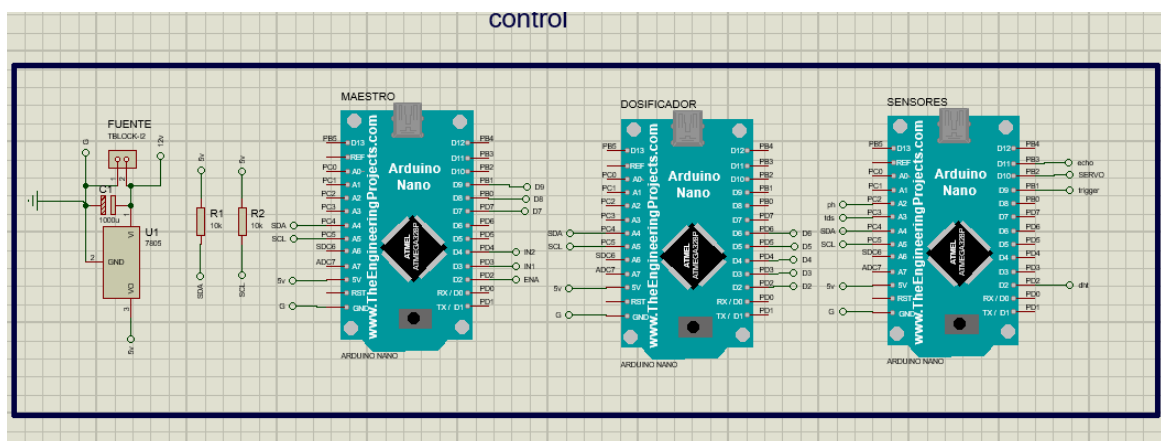


*Nota.* Esta imagen muestra la simulación de los tres Arduino, sensores y actuadores para así iniciar con el diseño de la tarjeta. Elaboración propia.

La Figura 20 muestra el sistema de control, compuesto por tres microcontroladores Arduino Nano: dos configurados como esclavos y uno como maestro, cada uno con su respectiva fuente de alimentación y resistencias de protección. Los Arduinos esclavos reciben y procesan las señales provenientes de los sensores, mientras que el Arduino maestro centraliza la información y envía las órdenes correspondientes a los actuadores para la ejecución de las tareas programadas.

**Figura 20**

*Sistema de Control*

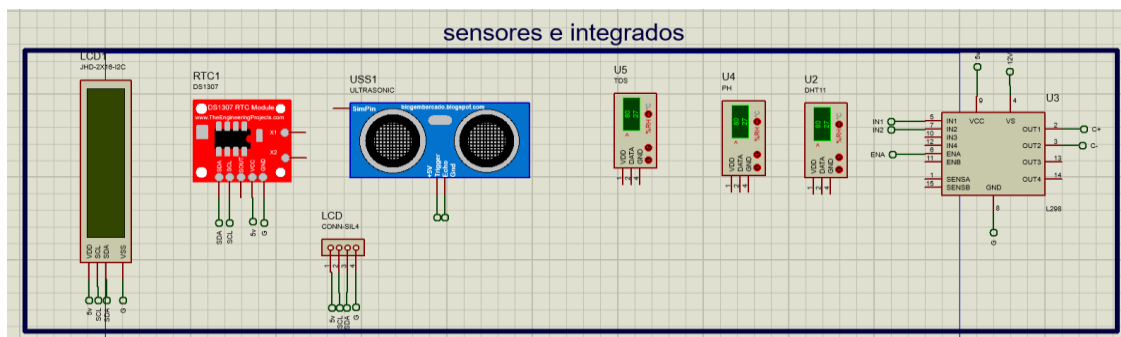


*Nota.* Se observan los tres microcontroladores Arduino Nano que conforman el sistema de control: dos esclavos y un maestro, con sus respectivas conexiones. Elaboración propia.

La Figura 21 muestra el conjunto de sensores instalados en el sistema, encargados de medir parámetros como pH, TDS, humedad, temperatura y nivel de agua. Estos dispositivos realizan la adquisición de datos y los envían al microcontrolador Arduino Nano correspondiente, que en este caso es el esclavo 1, para su procesamiento y posterior uso en las acciones de control.

**Figura 21**

*Conjunto de Sensores*

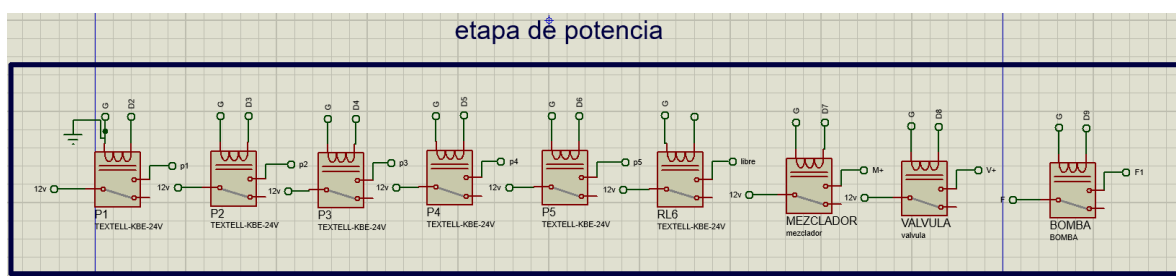


*Nota.* Sensores instalados en el sistema hidropónico, conectados al Arduino Nano esclavo uno. Elaboración propia.

La Figura 22 presenta el diagrama correspondiente a las etapas de potencia del sistema, donde se incluyen los relés utilizados para la activación de cada uno de los actuadores. Estos elementos permiten el control seguro de cargas eléctricas, actuando como interfaz entre la señal de control proveniente de los microcontroladores y el suministro de energía a los dispositivos.

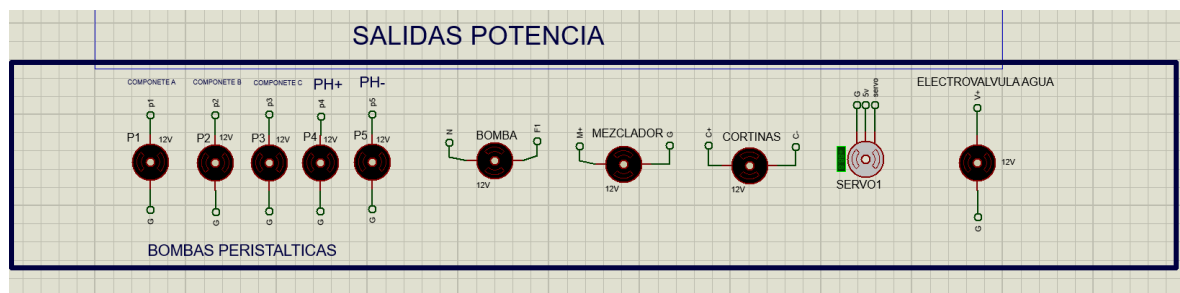
**Figura 22**

*Etapas de Potencia*



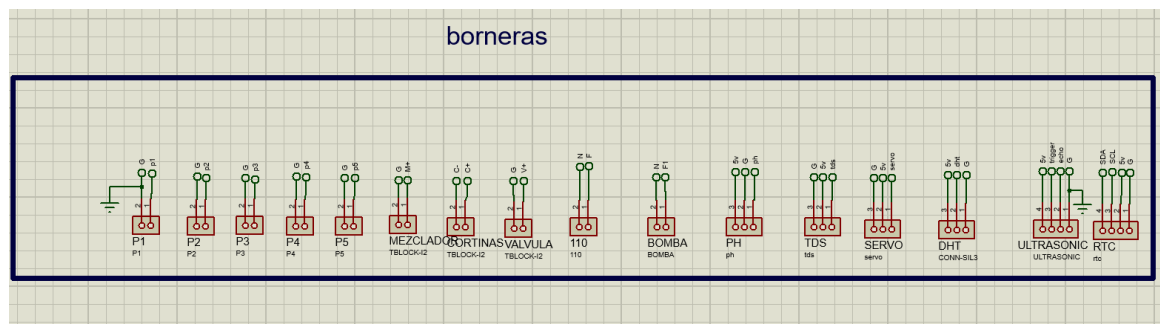
*Nota.* Se observan las etapas de potencia y los relés utilizados para la activación de los actuadores. Elaboración propia.

La Figura 23 presenta las salidas de potencia del sistema, en las que se incluyen las bombas peristálticas encargadas de la dosificación de nutrientes, la electrobomba responsable de impulsar la solución nutritiva hacia el cultivo, un servomotor que introduce los sensores en el tanque de almacenamiento para la lectura de parámetros, un motor para el accionamiento de cortinas y un motor para la agitación de la solución nutritiva en el tanque. Estos elementos constituyen la interfaz física que ejecuta las órdenes de control enviadas por el sistema.

**Figura 23***Salidas de Potencia*

*Nota.* Se observan las salidas de potencia del sistema, incluyendo bombas peristálticas, electrobomba, servomotor, motor para cortinas y motor para agitación de la solución nutritiva. Elaboración propia.

La Figura 24 muestra las borneras utilizadas para la conexión de sensores y actuadores, las cuales permiten una mayor facilidad en las tareas de conexión y desconexión durante labores de mantenimiento o reemplazo de componentes. Este elemento facilita la organización del cableado y contribuye a la seguridad y eficiencia del sistema.

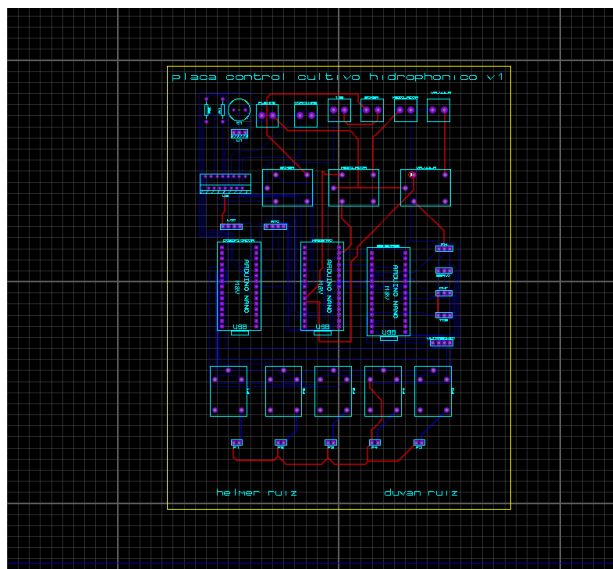
**Figura 24***Borneras de Conexión*

*Nota.* Se observan las borneras destinadas a la conexión de sensores y actuadores para facilitar el mantenimiento del sistema. Elaboración propia.

En la Figura 25 se muestra el diseño del trazado de la placa de circuito impreso (PCB) que integra todos los componentes electrónicos del sistema, tales como sensores, actuadores, microcontroladores, relés y borneras de conexión. La distribución de los elementos fue realizada considerando la eficiencia del espacio y la facilidad de mantenimiento. La placa tiene dimensiones de 15 cm x 20 cm, lo que permite su instalación en un encapsulado compacto y seguro. Se priorizó una disposición que minimice interferencias eléctricas y facilite el flujo de corriente entre las etapas de control y potencia. Para evitar daños por humedad o condensación, se recomienda mantener la PCB en un entorno seco; sin embargo, el encapsulado fue diseñado con sellado hermético que ofrece protección adecuada ante posibles salpicaduras o exposición accidental al agua.

## Figura 25

### *Diseño de la PCB*

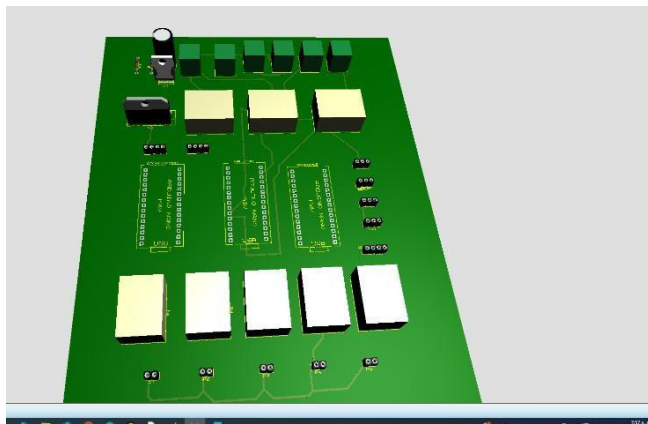


*Nota.* Representación gráfica del circuito impreso donde se visualiza la distribución optimizada de componentes electrónicos para el funcionamiento del sistema. Elaboración propia.

La Figura 26 muestra una representación tridimensional del ensamblaje de la tarjeta electrónica, permitiendo visualizar de forma anticipada la ubicación y conexión física de los componentes sobre la PCB. Este modelado 3D facilita la verificación del diseño antes de la fabricación, asegurando que todos los elementos, como sensores, actuadores, conectores, relés, bombas y el microcontrolador, encajen correctamente en el espacio disponible. También permite prever interferencias físicas o errores de disposición que podrían afectar el montaje final. El modelado sirve como herramienta clave para validar la ergonomía del diseño, optimizar la disposición interna del encapsulado y garantizar una correcta integración entre las partes mecánicas y electrónicas del sistema.

### Figura 26

*Modelado en 3D del Circuito*



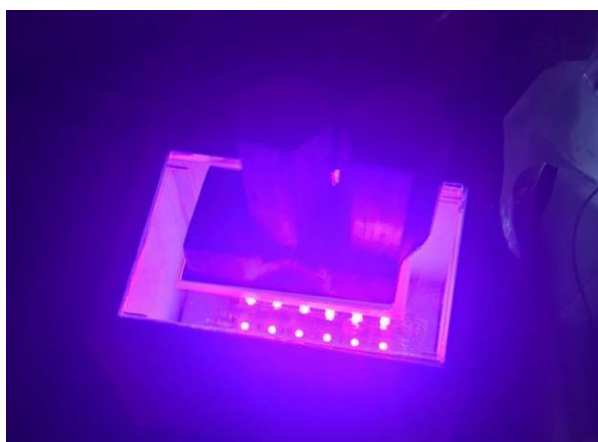
*Nota.* Se realiza un modelado en 3D para dar una idea de cómo van a quedar conectados los componentes cuando se arme la tarjeta electrónica. Elaboración propia.

La Figura 27 muestra el proceso de revelado de la placa de circuito impreso (PCB), una etapa fundamental en la fabricación del sistema electrónico. En esta fase, se utiliza una lámina fotosensible adherida a la superficie de la baquelita, sobre la cual se imprime el diseño del

circuito en una transparencia (fotolito). Esta transparencia se expone a luz ultravioleta (UV) durante un tiempo controlado, lo que endurece selectivamente las áreas del recubrimiento fotosensible. Luego, la placa se sumerge en una solución reveladora que elimina las partes no expuestas a la luz, dejando visible el patrón del circuito. Este proceso permite definir con precisión las pistas conductoras que guiarán las conexiones eléctricas entre los componentes. El correcto revelado garantiza la fidelidad del diseño y la funcionalidad del sistema final.

### **Figura 27**

#### *Revelado de la PCB*



*Nota.* Se imprime y se revela la PCB con ayuda luz ultravioleta. Elaboración propia.

La Figura 28 muestra la placa de circuito impreso (PCB) ya revelada y atacada químicamente, impresa sobre una base de baquelita. Una vez que el diseño del circuito ha sido revelado mediante luz ultravioleta, la placa se somete a un proceso de ataque químico utilizando una solución corrosiva (como percloruro de hierro) que elimina el cobre no protegido por la máscara fotosensible, dejando únicamente las pistas conductoras definidas. Luego, se procede a perforar manualmente los puntos de conexión utilizando una herramienta rotativa (motortool), para

permitir la inserción de los componentes electrónicos. Esta etapa finaliza con una placa lista para el montaje, en la cual las pistas y pads están correctamente delimitados, y los orificios permiten una soldadura precisa y segura

### Figura 28

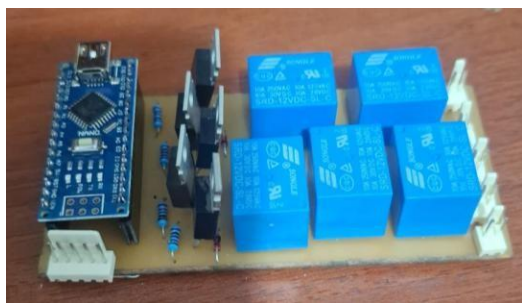
#### *PCB Impresa en la Baquelita*



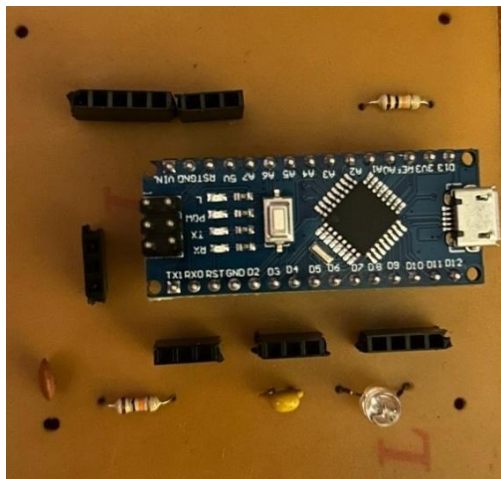
*Nota.* Se agrega la baquelita en ácido, se perfora con ayuda de un motortool y esta lista la para soldarle los componentes. Elaboración propia.

### Figura 29

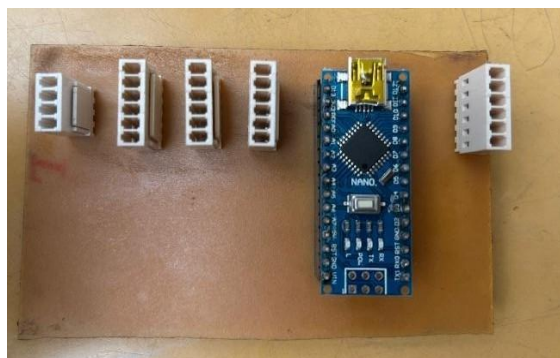
#### *Tarjeta Arduino Esclavo 2*



*Nota.* Esta imagen muestra la tarjeta finalizada del Arduino esclavo 2, encargado de la dosificación mediante bombas peristálticas. Elaboración propia.

**Figura 30***Tarjeta Arduino Esclavo*

*Nota.* Esta imagen muestra la tarjeta finalizada del Arduino esclavo 1, encargado de recibir todas las señales de los sensores y enviar los valores al maestro. Elaboración propia.

**Figura 31***Tarjeta Arduino Maestro*

*Nota.* Esta imagen muestra la tarjeta finalizada del Arduino maestro, encargado de recibir todas las señales de los Arduino esclavo y enviar órdenes a los actuadores. Elaboración propia.

## Figura 32

### *Sistema de Sensores con Inmercion*



*Nota.* Esta imagen muestra un sistema de brazo robótico el cual es el encargado de sumergir los sensores de Ph y TDS al agua. Elaboración propia.

### **Montaje Estructura del Invernadero**

En las figuras 33, 34, 35 Y 36 se puede apreciar la construcción del invernadero el cual fue diseñado con las siguientes medidas, de fondo tiene 4 metros, de ancho tiene 3 metros y de alto cuenta con 2 metros, su construcción está basada en tubos de PVC y uniones, cuenta con una malla que rodea todo el invernadero para impedir que los animales puedan ingresar y consumirse las plantas, también se le agrego una polisombra (malla tejida, generalmente hecha de polietileno, que se usa para crear sombra y proteger contra los rayos UV) al sistema ya que, este invernadero está construido en una zona geográfica de 1500msnm lo que implica calor por consiguiente el uso de la misma se hace apropiado y necesario. Además de esto, se puede apreciar la construcción del sistema de tubos en el cual son sembradas las plantas para su crecimiento y posterior cosecha.

**Figura 33***Primer Arco del Invernadero*

*Nota.* Se muestra el arco inicial para el armado del invernadero el cual tiene unas medidas de 3 metros de ancho por 2 metros de alto. Elaboración propia.

**Figura 34***Estructura Principal del Invernadero*

*Nota.* Se unen los 5 arcos mostrados anteriormente para así formar la estructura del invernadero, a esto se le añade una malla para que los animales no puedan ingresar a consumirse las plantas que se encuentre dentro. Elaboración propia.

**Figura 35***Invernadero Techado*

*Nota.* Se le agrego un platico que cubra toda la parte de la estructura del invernadero para protegerlo del agua y a su vez se le agrego una polisombra (malla tejida, generalmente hecha de polietileno, que se usa para crear sombra y proteger contra los rayos UV). También se armó la estructura conformada por madera y tubos en PVC donde se siembran las hortalizas y a su vez la estructura de la puerta que permite el ingreso. Elaboración propia.

### Figura 36

#### *Invernadero Terminado*



*Nota.* Invernadero totalmente terminado con el sistema en el interior de este y en total funcionamiento. Elaboración propia.

#### ***Esta Fase Implica la Construcción del Prototipo y la Integración de Todos los Componentes***

**Montaje de los Sensores y Actuadores.** Los sensores se instalan en puntos estratégicos, por ejemplo, el sensor de nivel de agua se instala en la parte superior del tanque principal para así enviar el nivel correcto de cuánta agua almacenada, el sensor de temperatura y humedad se instala en la parte media del invernadero para así tener un valor más preciso de todos los ángulos de este, los sensores de Ph y TDS se instalan en el tanque para poder verificar correctamente el agua antes de ser bombeada. La electrobomba es la encargada de suministrar el agua con los nutrientes a todo el cultivo y retornarla al tanque de almacenamiento, las bombas peristálticas son las encargadas de dosificar la solución nutritiva madre y el líquido para subir o bajar el Ph, la válvula es la encargada de impedir o permitir el paso de agua hacia el tanque principal.

#### ***Pruebas Iniciales***

Primero se revisa que cada sensor esté midiendo lo que debe. Por ejemplo, se verifica que el sensor de pH esté dando valores reales, que el de temperatura detecte cambios y que el de

nivel de agua avise cuando el tanque esté lleno o vacío. También se prueban las bombas y la válvula para ver si encienden y apagan cuando se les indica.

### ***Programación y Lógica del Sistema***

Luego se programa el microcontrolador con un código que le dice qué hacer según lo que miden los sensores. Por ejemplo, si el agua tiene un pH fuera del rango adecuado, el sistema decide si debe agregar ácido o una base para equilibrarlo, usando las bombas peristálticas. Si los nutrientes son pocos, el sistema activa otra bomba que añade más solución nutritiva. Todo esto pasa de forma automática, sin necesidad de intervención humana.

### ***Pantalla o Interfaz de Usuario***

Se conecta una pantalla para ver los datos en tiempo real. Esto ayuda mucho porque permite ver lo que está pasando sin tener que inspeccionar cada parte del invernadero.

### ***Calibración de Sensores***

Una vez que el sistema ya está montado y programado, se hacen pruebas más precisas para asegurarse de que los sensores estén calibrados correctamente. Esto significa que las lecturas que dan deben coincidir con la realidad. Por ejemplo, el sensor de pH se compara con una solución conocida para ver si está midiendo bien.

### ***Funcionamiento en Condiciones Reales***

Por último, se prueba todo el sistema en funcionamiento normal dentro del invernadero. Se deja correr durante varios días para ver cómo responde a los cambios del ambiente y cómo mantiene estables los niveles de agua, nutrientes y pH. Durante este tiempo se toman datos, se hacen ajustes si es necesario, y se asegura que todo esté listo para usarse de forma continua.

## Condiciones Óptimas para el Cultivo Hidropónico de Hortalizas

La Tabla 13 presenta los parámetros recomendados para asegurar un desarrollo óptimo de las hortalizas en sistemas de cultivo hidropónico. Estos valores han sido establecidos con base en estudios técnicos y agronómicos que indican las condiciones ideales de pH, temperatura, humedad y concentración de nutrientes en solución (TDS), necesarias para maximizar la absorción de nutrientes, promover un crecimiento saludable y prevenir factores de estrés que puedan afectar la calidad y productividad del cultivo.

**Tabla 13**

*Parámetros Recomendados para el Crecimiento Adecuado del Cultivo*

Parámetro	Valor recomendado	Detalles
pH	5.5 – 6.5	Las hortalizas se desarrollan mejor en un pH ligeramente ácido. Un pH en este rango asegura que los nutrientes sean fácilmente absorbidos por las raíces. Si el pH es muy alto o bajo, puede afectar la disponibilidad de nutrientes
Temperatura del aire	18°C – 22°C	Las temperaturas de 18°C a 22°C favorecen un crecimiento óptimo. Evita temperaturas superiores a 25°C, ya que pueden causar estrés

---

		térmico y afectar el crecimiento de las hojas.
Humedad relativa	50% - 70%	Un rango de humedad de 50% a 70% es ideal para las hortalizas. Evita una humedad demasiado baja, ya que podría causar deshidratación de las hojas, o muy alta, lo que podría favorecer el crecimiento de hongos.
TDS (Total Dissolved Solids)	800 – 1200 ppm	El TDS ideal para las hortalizas es bajo a medio. La concentración de nutrientes debe ser moderada para evitar el sobrealimentación o deficiencia de ciertos nutrientes.

---

*Nota. (Resh, H. M. 2013).*

La Tabla 14 muestra las fórmulas recomendadas de solución nutritiva para distintas etapas del desarrollo de hortalizas en sistemas hidropónicos. Estas dosis, distribuidas en tres soluciones concentradas (A, B y C), varían según la fase del cultivo, desde la germinación hasta la etapa de producción con el objetivo de proporcionar los nutrientes necesarios en las proporciones adecuadas para cada momento del crecimiento. La dosificación se basa en la fórmula  $D = V \times C$  donde  $D$  es la dosis por litro (ml),  $V$  es el volumen total deseado (L) y  $C$  es la concentración por litro (ml/L) la cual permite calcular la cantidad exacta de cada concentrado por litro de agua, asegurando un suministro equilibrado y eficiente de nutrientes.

**Tabla 14***Fórmulas de la Solución Nutritiva en Cultivos Hidropónicos de Hortalizas*

Litros	Solución concentrada A	Solución concentrada B	Solución concentrada C	uso
1L	2.5 cc o ml	2.5 cc o ml	2.5 cc o ml	En producción
1L	2 cc o ml	2 cc o ml	2 cc o ml	Después del trasplante
1L	1 cc o ml	1 cc o ml	1 cc o ml	Cuando salgan las primeras hojas
1L	0.5cc o ml	0.5cc o ml	0.5cc o ml	Germinación

*Nota. (Sonneveld & Voogt, 2009).*

**Pruebas y Ajustes**

Una vez implementado el sistema, se realizan pruebas para verificar su funcionalidad.

***Pruebas en Laboratorio***

Inicialmente, se realiza una prueba controlada en el laboratorio donde se simulan diferentes condiciones de riego como por ejemplo variando muy rápidamente los valores de temperatura y partes por millón, las lecturas de los sensores se ajustan para observar cómo responde el sistema. En la figura 37, 38 Y 39 se puede observar los inicios de la germinación de las hortalizas y cómo fue su evolución aplicando los micronutrientes y en la figura 7 se puede apreciar las pruebas correspondientes que se realizaron en la protoboard.

**Figura 37***Germinación*

*Nota.* Se muestra el inicio de la germinación de las hortalizas para luego ser trasplantadas al invernadero. Elaboración propia.

**Figura 38***Crecimiento de las Hortalizas*

*Nota.* Luego de 15 días aplicando nutrientes manualmente se obtiene este resultado de crecimiento en laboratorio. Elaboración propia.

**Figura 39***Cosecha de las Plantas*

*Nota.* Se puede apreciar cual fue el crecimiento de las plantas luego de 2 meses realizando las pruebas controladas en laboratorio, el cual se observa que ya está listo para consumo. Elaboración propia.

**Encapsulado, Montaje y Funcionamiento del Sistema**

En la Figura 40 se muestra la caja de control del proyecto, la cual alberga el circuito principal junto con la interfaz de usuario (pantalla LCD) y una regleta de conexiones que permite integrar de manera ordenada los sensores y actuadores del sistema. Este módulo ha sido diseñado para permanecer en el interior del invernadero, ya que contiene componentes electrónicos sensibles que deben protegerse del agua y de la exposición directa a la luz solar.

La caja garantiza una organización adecuada del cableado, facilita el mantenimiento del sistema y asegura la protección física de los elementos críticos del control automático.

#### **Figura 40**

##### *Módulo de Control*



*Nota.* Encapsulado del módulo de control e interfaz de usuario listo para ser instalado en el invernadero. Elaboración propia.

En la figura 41 se muestra el sistema de dosificación del proyecto, el cual está conformado por cinco recipientes que contienen las soluciones necesarias para el cultivo hidropónico. Tres de estos recipientes almacenan las soluciones nutritivas A, B y C, mientras que los dos restantes contienen las soluciones reguladoras de pH (pH+ y pH-). Cada recipiente está conectado a una bomba peristáltica, encargada de dosificar con precisión el volumen necesario de cada solución, de acuerdo con los requerimientos del cultivo y bajo el control automático del Arduino maestro

**Figura 41***Sistema de Dosificación*

*Nota.* La dosificación es controlada automáticamente por el Arduino maestro, lo que garantiza precisión en el suministro de nutrientes según las necesidades del cultivo. Elaboración propia.

La Figura 42 muestra el sistema automatizado durante las pruebas finales de funcionamiento, realizadas una vez ensamblado por completo. En esta etapa se lleva a cabo la calibración de sensores, bombas peristálticas y actuadores, verificando que cada componente responda correctamente a las órdenes del microcontrolador. También se evalúa la precisión en la dosificación de nutrientes, la estabilidad de las lecturas de pH y TDS, y el correcto encendido de los elementos de potencia como relés, electrobombas y servomotor. Estas pruebas permiten detectar y corregir cualquier desviación o falla antes de pasar a la operación continua del sistema en condiciones reales de cultivo.

**Figura 42***Pruebas Finales*

*Nota.* Sistema en funcionamiento durante la fase de calibración y verificación final. Elaboración propia.

La Figura 43 muestra el proceso de trasplante de las plántulas al sistema hidropónico. En esta etapa, las hortalizas previamente germinadas son colocadas en vasos plásticos perforados, los cuales permiten el libre desarrollo de las raíces hacia la solución nutritiva ubicada en el contenedor inferior. Como medio de soporte y absorción, se utiliza una lámina de algodón, que ayuda a mantener la humedad y facilita el transporte capilar de los nutrientes desde la solución hacia la zona radicular de la planta. Este método garantiza un establecimiento adecuado de las plantas y una transición eficiente desde la germinación al crecimiento activo en el sistema automatizado.

**Figura 43***Trasplanto de las Hortalizas*

*Nota.* Trasplante de las hortalizas al sistema automatizado. Elaboración propia.

La Figura 44 presenta el estado de desarrollo de las hortalizas durante el ciclo de cultivo en el sistema hidropónico automatizado. Se evidencia un crecimiento vigoroso y uniforme, lo que indica que el sistema cumple adecuadamente con las condiciones óptimas para el desarrollo vegetal, como la dosificación precisa de nutrientes, el control del pH, la oxigenación de las raíces y el suministro constante de agua. El aspecto saludable de las plantas refleja una correcta absorción de macro y micronutrientes, así como una adaptación efectiva al medio hidropónico sin suelo. Esta etapa valida experimentalmente la efectividad del diseño y configuración del sistema implementado.

**Figura 44***Crecimiento de las Hortalizas*

*Nota.* Se observa el crecimiento eficiente de las hortalizas, lo que evidencia el buen funcionamiento del sistema hidropónico y la adecuada absorción de nutrientes por parte de las plantas. Elaboración propia.

La Figura 45 muestra una vista panorámica del sistema de dosificación automatizado, ya ensamblado y en funcionamiento continuo. En la imagen se aprecian los distintos módulos que lo componen, incluyendo los recipientes de soluciones nutritivas y reguladoras de pH, las bombas peristálticas encargadas de la dosificación precisa, la estructura de soporte, las conexiones eléctricas, así como el encapsulado del sistema de control electrónico. Esta visualización global permite apreciar la integración funcional del sistema, destacando su diseño compacto, la organización eficiente de los elementos y la facilidad de acceso para mantenimiento. La imagen valida visualmente la operatividad del sistema implementado.

## Figura 45

### *Panorámico del Sistema de Dosificación*



*Nota.* Vista general del sistema de dosificación, con todos sus componentes interconectados y funcionando de manera continua. Elaboración propia.

## Diseño Experimental

Con el objetivo de evaluar de forma rigurosa el desempeño del sistema hidropónico automatizado tipo NFT frente a un sistema convencional de manejo manual, se diseñó un experimento comparativo con múltiples repeticiones, permitiendo medir de forma controlada distintas variables agronómicas clave durante un ciclo completo de cultivo de hortalizas. Esta estrategia experimental busca asegurar que los resultados obtenidos sean confiables, replicables y estadísticamente válidos.

## Objetivo del Experimento

Comparar el rendimiento y la eficiencia de un sistema hidropónico automatizado con uno convencional en términos de crecimiento de las hortalizas, Peso final por planta, Consumo total de agua y Tiempo hasta cosecha.

## Diseño Experimental y Repeticiones

Se implementó un diseño completamente aleatorizado (DCA) con dos tratamientos (automatizado y convencional) y tres repeticiones por tratamiento, siendo cada repetición una unidad experimental independiente compuesta por 5 plantas de *hortaliza*.

La Tabla 15 presenta la distribución de los tratamientos experimentales aplicados en el estudio, con el objetivo de comparar el desempeño de un sistema automatizado frente a uno convencional en el cultivo de hortalizas. Cada tratamiento cuenta con tres repeticiones de cinco plantas, lo que permite mantener condiciones homogéneas y controlar la variabilidad. Esta estructura experimental facilita la obtención de datos comparables y la aplicación de análisis estadísticos más precisos, asegurando la validez de los resultados obtenidos.

**Tabla 15**

*Tabla de Experimentos*

<b>Tratamiento</b>	<b>Repetición 1</b>	<b>Repetición 2</b>	<b>Repetición 3</b>	<b>Total de Plantas</b>
Automatizado (A)	5 plantas	5 plantas	5 plantas	15 plantas
Convencional (B)	5 plantas	5 plantas	5 plantas	15 plantas
Total de plantas	10	10	10	30

*Nota.* Elaboración propia.

## **Condiciones Experimentales**

### ***Ubicación***

Invernadero a 1500 msnm, protegido con plástico, malla y polisombra.

### ***Duración del Experimento***

45 días por ciclo, con intención de repetir en un segundo ciclo para validación temporal.

### ***Tipo de Cultivo***

Hortaliza (cilantro, espinaca, lechuga).

### ***Sistema Utilizado***

Técnica de película de nutrientes (NFT) con recirculación en ambos casos.

## **Sistemas Evaluados**

### ***Sistema Automatizado (A)***

Control de pH, TDS, temperatura, riego y dosificación mediante sensores y bombas peristálticas programadas con microcontrolador Arduino Nano.

### ***Sistema Convencional (B)***

Riego y fertilización realizados manualmente, sin control automatizado de variables.

La Tabla 16 detalla las variables que fueron medidas durante el experimento, junto con sus respectivas unidades, frecuencia de medición e instrumentos utilizados. Estas variables como la altura de planta, peso fresco, consumo de agua y tiempo hasta la cosecha permiten evaluar de manera integral el crecimiento y rendimiento del cultivo bajo diferentes condiciones. La inclusión de instrumentos específicos y métodos de medición estandarizados garantiza la precisión y confiabilidad de los datos obtenidos.

**Tabla 16***Variables Medidas*

Variable	Unidad	Frecuencia de medición	Instrumento
Altura de planta	Cm	Semanal	Regla milimetrada
Peso fresco por planta	G	Final, al cosechar	Balanza digital ( $\pm 1g$ )
Consumo de agua	Litros	Total al final del ciclo	Recipientes calibrados
Tiempo hasta cosecha	Días	Diario	Observación directa

*Nota.* Elaboración propia.

**Características de las Mediciones*****Altura de Planta***

Medida desde la base hasta la hoja más alta.

***Peso Fresco***

Solo masa aérea comestible, sin raíces.

***Consumo de Agua***

Agua efectivamente utilizada, sin incluir pérdidas por evaporación.

***Tiempo de Cosecha***

Se registró el día en que al menos el 80% de las plantas alcanzaron el tamaño comercial esperado en cada repetición.

**Análisis de los Datos**

Se calcularon promedios y desviaciones estándar por tratamiento.

Se aplicó una prueba t de Student para muestras independientes para cada variable clave, con el fin de evaluar si las diferencias observadas fueron estadísticamente significativas ( $p <$

0.05). Además, se calcularon porcentajes de mejora para cada variable del sistema automatizado respecto al convencional.

### **Justificación del Enfoque Experimental**

La incorporación de múltiples repeticiones permite reducir el margen de error y mejorar la validez estadística del estudio. Además, se tiene planeado repetir el experimento en un segundo ciclo productivo, con el mismo diseño, para validar los hallazgos en el tiempo (validación temporal). Este enfoque asegura que los resultados no dependan de condiciones específicas de un solo ciclo.

## **Análisis de Resultados**

Durante la implementación del sistema hidropónico tipo NFT automatizado para el cultivo de hortalizas, se evaluó su desempeño frente a un sistema convencional manual de riego y fertilización. El experimento se realizó utilizando un Diseño Completamente Aleatorizado (DCA) con tres repeticiones por tratamiento, cada una con cinco plantas, para un total de 30 plantas. Esto permitió analizar las diferencias entre tratamientos con mayor rigor estadístico, minimizando los efectos del azar.

### **Crecimiento de las Plantas**

Se realizaron mediciones semanales cada lunes a las 8am de la altura promedio de las plantas en cada repetición.

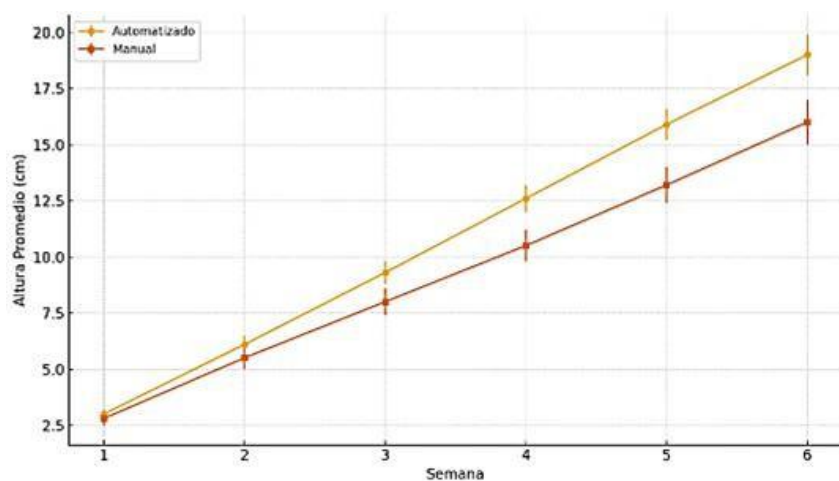
La Tabla 17 presenta los promedios semanales de altura alcanzados por las plantas bajo dos métodos de cultivo: automatizado y manual. Esta información permite comparar el ritmo de crecimiento de las hortalizas a lo largo de seis semanas, evaluando el impacto de cada tratamiento en el desarrollo vertical de las plantas. Los datos incluyen el valor promedio y su desviación estándar, lo que aporta una medida de variabilidad y precisión en los resultados obtenidos.

**Tabla 17***Promedios de Altura Semanal*

Semana	Altura Prom. Automatizado (cm)	Altura Prom. Manual (cm)
1	3.0 ± 0.2	2.8 ± 0.3
2	6.1 ± 0.4	5.5 ± 0.5
3	9.3 ± 0.5	8.0 ± 0.6
4	12.6 ± 0.6	10.5 ± 0.7
5	15.9 ± 0.7	13.2 ± 0.8
6	19.0 ± 0.9	16.0 ± 1.0

*Nota. Elaboración Propia.*

En la figura 46 se puede ver como el sistema automatizado mostró un crecimiento más acelerado en comparación con el sistema convencional durante todas las semanas del ciclo de cultivo. Esta diferencia fue especialmente notable en las etapas intermedias y finales, donde las plantas desarrolladas bajo el sistema automatizado mantuvieron un crecimiento constante y uniforme. Al finalizar el ciclo, las hortalizas presentaron una altura promedio un 18 % mayor, lo cual evidencia una mejora significativa en las condiciones de nutrición, riego y control ambiental proporcionadas por el sistema automatizado. Estos resultados sugieren que la automatización contribuye a optimizar el desarrollo de las plantas al ofrecer una gestión precisa y oportuna de los recursos necesarios para su crecimiento. Elaboración propia.

**Figura 46***Crecimiento de las Plantas*

*Nota.* Se aprecia que el sistema automatizado creció mucho más rápido que el sistema manual.

Elaboración propia.

**Producción y Peso**

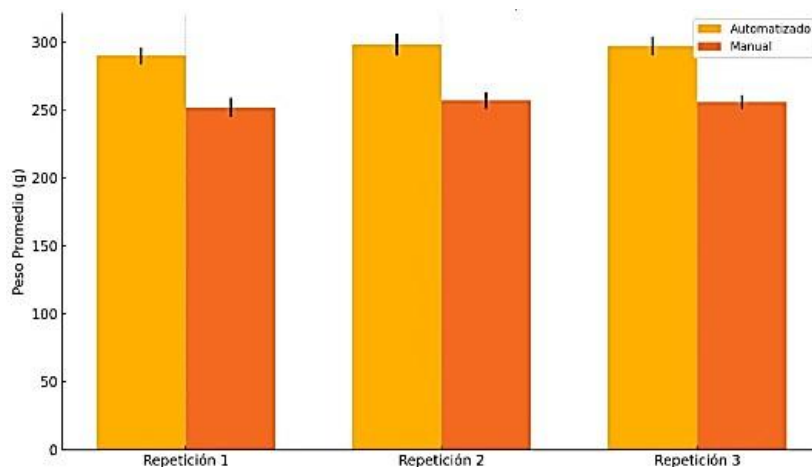
La Tabla 18 muestra el peso promedio por planta obtenido en cada repetición para los tratamientos automatizado y manual, así como el promedio total para cada uno. Esta comparación permite evaluar el efecto de ambos sistemas sobre el rendimiento final del cultivo en términos de peso fresco. Los resultados indican que el sistema automatizado produjo un 15.7% más de peso por planta, y la diferencia fue estadísticamente significativa según la prueba t ( $p = 0.017$ ), lo que respalda la superioridad del tratamiento automatizado en esta variable.

**Tabla 18***Peso de Cada Planta*

Repetición	Peso Prom. Automatizado (g)	Peso Prom. Manual (g)
1	290	252
2	298	257
3	297	256
Promedio total	295	255

*Nota.* Elaboración propia.

La figura 47 compara el peso promedio por planta en cada repetición entre los sistemas de cultivo automatizado y manual. Se observa consistentemente un mayor rendimiento en el tratamiento automatizado, reflejado en barras más altas en las tres repeticiones. Esta visualización complementa los datos de la Tabla 18, destacando no solo las diferencias en peso, sino también su estabilidad a lo largo del experimento.

**Figura 47***Peso Promedio de la Planta*

*Nota.* Se puede apreciar gráficamente que el peso por planta del sistema automatizado siempre fue mejor que el sistema manual. Elaboración propia.

## Uso de Agua

La Tabla 19 presenta el consumo de agua registrado en cada repetición para los sistemas de cultivo automatizado y manual, permitiendo evaluar su eficiencia hídrica. Los resultados muestran que el sistema automatizado utilizó un total de 80 litros frente a los 130 litros del sistema manual, lo que representa una reducción del 38% en el uso de agua. Esta diferencia, respaldada por un valor estadísticamente significativo ( $p = 0.009$ ), evidencia la efectividad del sistema automatizado en el manejo del riego mediante control preciso y recirculación del agua.

**Tabla 19**

*Consumo de Agua en Cada Sistema*

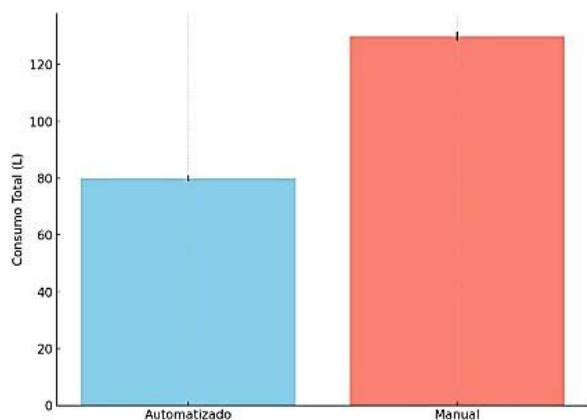
Repetición	Automatizado (L)	Manual (L)
1	27	44
2	26	43
3	27	43
Total	80 L	130 L

*Nota.* Elaboración propia.

La figura 48 ilustra el consumo total de agua por sistema de cultivo, comparando el método automatizado con el manual. Se observa una diferencia clara entre ambos, con el sistema automatizado utilizando considerablemente menos agua que el manual. Esta representación gráfica refuerza los datos presentados en la Tabla 19, destacando la eficiencia hídrica del sistema automatizado, atribuida al control preciso del riego y a la recirculación del agua. La diferencia en consumo fue estadísticamente significativa, lo que evidencia el potencial del sistema automatizado para reducir el uso de recursos sin comprometer el rendimiento del cultivo.

## Figura 48

### *Consumo de Agua Comparando Sistema Manual y Sistema Automatizado*



*Nota.* En el gráfico se puede apreciar que claramente el sistema manual consume más agua que el sistema hidropónico automatizado. Elaboración propia.

## Tiempo de Germinación y Cosecha

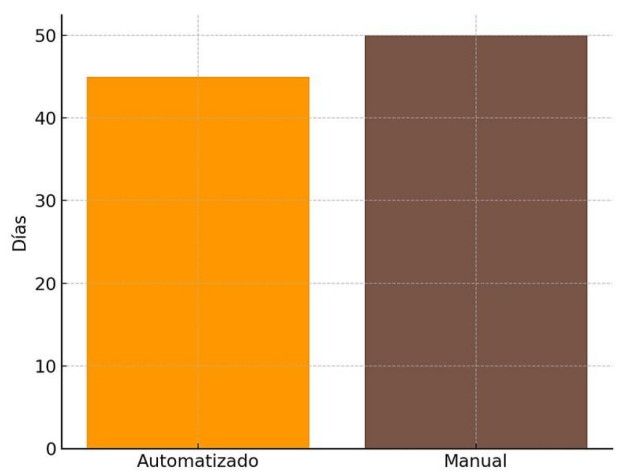
La Tabla 20 muestra la duración del cultivo en ambos sistemas, automatizado y manual, desde la germinación hasta la cosecha. Aunque el tiempo de germinación fue igual en ambos casos (3.5 días), las plantas cultivadas bajo el sistema automatizado alcanzaron la etapa de cosecha cinco días antes que las del sistema manual. Esta diferencia evidencia una mayor eficiencia en el desarrollo del cultivo cuando se emplea automatización, lo que permite reducir el tiempo total del ciclo productivo sin afectar la calidad del cultivo.

**Tabla 20***Duración del Cultivo desde la Germinación Automatizado y Manual*

Variable	Automatizado	Manual
Tiempo de germinación	3.5 días	3.5 días
Tiempo hasta cosecha	45 días	50 días

Nota. Elaboración propia.

La figura 49 compara el tiempo total requerido para alcanzar la cosecha en los sistemas de cultivo automatizado y manual. Se observa que el sistema automatizado permitió cosechar en 45 días, mientras que el sistema manual necesitó 50 días. Esta diferencia visual refuerza los datos presentados en la Tabla 20, demostrando que el uso de automatización no solo mantiene la eficiencia desde la germinación, sino que también acelera el desarrollo general del cultivo, permitiendo una cosecha más rápida y una posible rotación más eficiente de cultivos.

**Figura 49***Tiempo Hasta la Cosecha*

Nota. Aunque la germinación fue idéntica, el sistema automatizado logró cosecha 5 días antes, lo que representa una reducción del 10% en el ciclo productivo. Esto permite aumentar la cantidad de ciclos anuales, mejorando la productividad total del sistema. Elaboración propia.

### **Análisis Estadístico y Consistencia entre Repeticiones**

Se aplicó prueba t para muestras independientes en las variables clave (altura final, peso y consumo de agua). En todos los casos, las diferencias fueron estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ). Además, los resultados fueron consistentes entre las tres repeticiones, lo que indica reproducibilidad del efecto del sistema automatizado.

### **Interpretación General**

Los datos obtenidos en este estudio demuestran que el sistema hidropónico automatizado ofrece ventajas significativas frente al manejo manual, tanto en términos de rendimiento como de eficiencia de recursos. A continuación, se detallan las principales mejoras observadas, respaldadas por los resultados experimentales:

**Mayor Velocidad de Crecimiento.** Las plantas en el sistema automatizado alcanzaron la cosecha en 45 días, mientras que en el sistema manual lo hicieron en 50 días, es decir, 5 días menos, lo que representa un 10% de reducción en el ciclo de cultivo.

**Mayor Peso por Planta.** El peso promedio por planta en el sistema automatizado fue de 295 g, frente a 255 g en el sistema manual. Esto representa un incremento del 15.7% en el rendimiento. La diferencia fue estadísticamente significativa ( $p = 0.017$ ).

**Menor Consumo de Agua.** El sistema automatizado utilizó 80 litros de agua, mientras que el manual consumió 130 litros durante todo el ciclo. Esto implica un 38% menos de

consumo hídrico. Esta diferencia también fue significativa ( $p = 0.009$ ), indicando una mayor eficiencia del sistema automatizado gracias al control de riego y la recirculación.

**Crecimiento más Acelerado.** La altura promedio de las plantas fue consistentemente mayor en el sistema automatizado en cada semana. Por ejemplo, en la semana 6, las plantas automatizadas alcanzaron  $19.0 \pm 0.9$  cm, mientras que las manuales llegaron solo a  $16.0 \pm 1.0$  cm.

Estos resultados, obtenidos a través de repeticiones controladas y validados mediante análisis estadísticos, confirman que la automatización en sistemas hidropónicos no solo mejora el rendimiento, sino que también promueve una producción más sostenible y eficiente, especialmente en contextos de pequeña y mediana escala.

### **Dificultades Encontradas**

#### ***Obstrucción Parcial de una Válvula de Dosificación en una Repetición, Solucionada con Limpieza Preventiva.***

En sistemas tradicionales, este tipo de obstrucciones suele detectarse tarde, ya sea por la disminución en el crecimiento de las plantas o por la observación directa de los operarios, lo que implica pérdidas en productividad o calidad del cultivo. En nuestro sistema automatizado, aunque se presentó una obstrucción, el monitoreo continuo de variables como el flujo y los niveles de nutrientes permitió detectar anomalías rápidamente. Esto facilitó una intervención temprana con limpieza preventiva.

#### ***Mejora Frente al Sistema Tradicional***

detección rápida y mantenimiento programado, lo que reduce pérdidas.

#### ***Impacto en Entornos Reales***

Aumenta la eficiencia operativa y reduce el riesgo de fallos críticos en sistemas de riego y fertilización.

### ***Ajustes Periódicos en el pH Detectados por Sensores, Corregidos Mediante Bombas***

#### ***Peristálticas***

En los cultivos hidropónicos tradicionales, el pH se mide manualmente con tiras o medidores portátiles, y los ajustes se hacen manualmente varias veces al día, lo que demanda tiempo, experiencia y puede generar errores de dosificación. Nuestro sistema automatizado detectó en tiempo real las desviaciones de pH y las corrigió automáticamente mediante las bombas peristálticas que dosifican solución ácida o alcalina según sea necesario.

#### ***Mejora Frente al Sistema Tradicional***

Intervención automática e inmediata, reducción de errores humanos.

#### ***Impacto en Entornos Reales***

Se asegura una absorción óptima de nutrientes por parte de las plantas, mejorando su desarrollo y reduciendo el desperdicio de fertilizantes.

#### ***Conclusión del Análisis de Dificultades***

Estas dificultades resaltan no solo la importancia del mantenimiento regular, sino también el valor añadido de contar con sistemas automatizados que permiten detectar y resolver problemas antes de que afecten gravemente el cultivo. La comparación con los métodos tradicionales deja claro que la tecnología ofrece mayor precisión, menos dependencia del operario y mejor uso de los recursos.

## Conclusiones

Se diseñó e implementó un sistema electromecánico automatizado para la dosificación de fertilizantes y el control del riego del cultivo hidropónico de hortalizas, el cual permitió integrar sensores, actuadores y un sistema de control electrónico capaz de monitorear y regular variables clave como pH, TDS, temperatura, humedad y nivel de agua, cumpliendo con la funcionalidad planteada en el proyecto.

Se identificaron los rangos adecuados de pH, TDS, temperatura y humedad para el cultivo hidropónico, lo que permitió definir parámetros de referencia utilizados por el sistema de control para la toma de decisiones durante la operación del prototipo.

Se logró desarrollar una arquitectura funcional que integra sensores, microcontroladores, bombas y válvulas permitiendo la automatización del riego y la dosificación de nutrientes de manera controlada.

Se implementó un programa capaz de procesar las señales provenientes de los sensores y activar los actuadores según los valores medidos, permitiendo ajustes automáticos de la dosificación de nutrientes y el riego de acuerdo con las condiciones del sistema.

Los resultados obtenidos durante las pruebas experimentales mostraron un funcionamiento estable del prototipo bajo las condiciones evaluadas, evidenciando una adecuada respuesta del sistema ante variaciones de las variables medidas. Así mismo, se observó una mejora del cultivo frente a un control manual.

Finalmente, el proyecto demuestra que es posible desarrollar un sistema automatizado de control de riego y dosificación de fertilizantes para cultivos hidropónicos utilizando tecnologías accesibles, lo que representa una alternativa viable para apoyar la gestión técnica del cultivo.

## Bibliografía

(Resh, H. M. (2013). Hydroponic Food Production: A Definitive Guidebook for the Advanced Home Gardener and the Commercial Hydroponic Grower. CRC Press.)

Arduino. (2023). Arduino Uno Rev3.

<https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>

Benassi, G. (2018). Design of an EC sensor for hydroponic farming. Sensors and Actuators B: Chemical, 259, 1066-1073.

Biehl, R. R. (2015). Aeroponics: The future of food production in the 21st century. GreenTech Publications.

Bravo, A. (2023). Impacto de los cultivos hidropónicos en la producción urbana y la huella ambiental. Editorial Agroecológica.

Buchanan, M. (2018). LCD 16x2 displays for automation. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 64(7), 5884-5892.

Cámara de Comercio de Bogotá. (2022). Desafíos de la agricultura hidropónica en Colombia: Informe sectorial. Cámara de Comercio de Bogotá. <https://www.ccb.org.co>

Carrera, M., Clavijo, D., Matajira, L., Roa, A., Rueda, A., Saavedra, D. (2018). Guía rápida de citación adaptada del estilo de la American Psychological Association (APA), sexta edición. Pontificia Universidad Javeriana.

[https://comunicacionylenguaje.javeriana.edu.co/documents/3277755/7479204/Gu%C3%ADa+r%C3%A1pida+APA+Centro+de+Escritura\\_Pontificia+Universidad+Javeriana+2018/39db01ef-6990-4862-89f1-f8a1accfc426](https://comunicacionylenguaje.javeriana.edu.co/documents/3277755/7479204/Gu%C3%ADa+r%C3%A1pida+APA+Centro+de+Escritura_Pontificia+Universidad+Javeriana+2018/39db01ef-6990-4862-89f1-f8a1accfc426)

Centro de Escritura Javeriano. (2019). Normas APA, sexta edición. Pontificia Universidad Javeriana. <https://www.javerianacali.edu.co/centroescritura/recursos/manual->

- Dinesh, M. P. (2015). Smart Irrigation System Using IoT for Agriculture. *International Journal of Engineering and Technology*, 7(3), 250-254.
- Dixon, A. (2019). Water moisture sensors in agriculture: A review. *Agricultural Systems*, 172, 102-108.
- FAO. (2021). La producción sostenible de alimentos y la seguridad alimentaria en áreas urbanas. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.  
<https://www.fao.org>
- Graber, M. A., & Rees, J. M. (2018). *Hydroponic systems: A guide for efficient and sustainable food production*. Springer.
- Homecenter Colombia. (s.f.). *Bomba sumergible para fuente Aqua 29 W* [Imagen del producto]. Recuperado el 19 de octubre de 2025, de <https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/637697/bomba-sumergible-fuente-aqua-29w/637697/>
- InfoAgrónomo. (2021, 16 de mayo). *Sustratos para horticultura. Materiales, propiedades, manejo* [Artículo web]. Recuperado de <https://infoagronomo.net/sustratos-para-horticultura-materiales-propiedades-manejo/>
- IPCC. (2022). Informe de evaluación del cambio climático 2022: Efectos, adaptación y vulnerabilidad. Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático.  
<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>
- Jensen, M. H., & Collins, W. L. (1985). *Hydroponic vegetable production (Circular 844)*. University of Arizona.
- Jiang, Z., Li, S., & Zhang, T. (2020). Ultrasonic proximity sensors for water level detection in hydroponics. *Journal of Sensor Technology*, 58(2), 45-52.
- Jones, J. B. (2019). *Hydroponics: A practical guide for the soilless grower (3rd ed.)*. CRC Press.

- Kamoer. (s.f.). *Bomba peristáltica Kamoer CKP-DC-S08 12V bomba de agua PA*. MercadoLibre Colombia. <https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-3209460540-bomba-peristaltica-kamoer-ckp-dc-s08-12-v-bomba-de-agua-pa- JM>
- La Red Electrónica. (2025). *Fuente Conmutada 12V 20A*. Recuperado el 20 de octubre de 2025, de <https://laredelectronica.com/producto/fuente-conmutada-12v-20a/>
- Morales, L., Pérez, S., & Rodríguez, F. (2022). Automatización en la agricultura hidropónica: una alternativa económica y sostenible. *Revista de Innovación Agroalimentaria*, 35(2), 85-97. <https://doi.org/10.1234/ria.2022.01234>
- Polo del Conocimiento. (2022). Hidroponía: Un método eficiente para el cultivo de plantas sin suelo. *Polo del Conocimiento: Revista científico-profesional*, 7(7), 814–826. [https://www.revistas.polo-del-conocimiento.com/articulo\\_123456](https://www.revistas.polo-del-conocimiento.com/articulo_123456)
- Resh, H. M. (2012). *Hydroponic food production: A definitive guidebook for the advanced grower* (7th ed.). Woodbridge Press.
- Resh, H. M. (2013). *Hydroponic food production: A definitive guidebook for the advanced home gardener and the commercial hydroponic grower* (7.<sup>a</sup> ed.). CRC Press.
- RoosTech Electrónica. (s.f.). *Servo Motor MG996R 11kgf – MG996 similar MG995*. Recuperado el 20 de octubre de 2025, de <https://roostech.co/modulos-arduinos/servo-motor-mg996r-11kgf-mg996-similar-mg995/>
- Sánchez, R. (2017). Control systems for irrigation with valves. *Journal of Agricultural Engineering*, 68(3), 101-112.

- SMEAP México. (2022, 22 de abril). *Tipos de sistemas hidropónicos (cultivos en agua y aire)* [Artículo web]. Recuperado de <https://smeapmexico.org/tipos-de-sistemas-hidroponicos-cultivos-en-agua-y-aire/>
- Smith, A. (2020). Peristaltic pumps in liquid fertilizer systems. *Fluid Mechanics Review*, 45(4), 229-234.
- Stream Pumps.** (s.f.). *Solución de bombeo para cultivo hidropónico (1)* [Fotografía]. Stream Pumps. Recuperado el 19 de octubre de 2025, de <https://www.streampumps.es/pump-solutions/hydroponic-culture-pump-solution-es.html>
- Tosun, S. (2020). pH measurement in hydroponic systems. *Journal of Environmental Engineering*, 22(2), 300-305.
- Tower Pro. (s.f.). SG90 9g micro servo motor datasheet. <https://www.towerpro.com.tw/product/sg90-2/>
- Yang, H., & Li, M. (2020). Power supply considerations for microcontroller-based systems. *Energy Conversion and Management*, 207, 112-118.
- Zanjani, M., Hassan, N., & Smith, J. (2020). Challenges in nutrient management in hydroponic systems: Impacts on productivity and efficiency. *International Journal of Agricultural Technology*, 18(4), 302-315. <https://doi.org/10.5678/ijat.2020.18402>
- Zhang, X., et al. (2021). Environmental monitoring for precision agriculture. *Sensors*, 21(4), 1234-1246.
- Zhang, Y., & Liu, H. (2019). *Smart Agriculture with IoT: Applications and Challenges*. Springer.

## Apéndices

### Apéndice A

#### *Código Fuente del Sistema de Control*

*A continuación, se presenta el código completo desarrollado para el sistema de control de riego en cultivos hidropónicos.*

```
#include <Wire.h>
```

```
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
```

```
#include <DHT.h>
```

```
// Configuración de la pantalla LCD I2C
```

```
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);
```

```
// Configuración del sensor DHT11
```

```
#define DHTPIN 2
```

```
#define DHTTYPE DHT11
```

```
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
```

```
// Pines para control del motor y finales de carrera
```

```
const int motorPinA = 9;
```

```
const int motorPinB = 8;
```

```
const int endSwitchOpen = 10;
```

```
const int endSwitchClose = 11;
```

```
// Pin del sensor TDS

const int tdsPin = A3;

float voltage, tdsValue, temperature = 25.0;

// Pin del ventilador

const int ventiladorPin = 7;

bool ventiladorEncendido = false;

unsigned long tiempoVentilador = 0;

// Variables de estado de la cortina

bool cortinaAbierta = false;

void setup() {

  lcd.init();

  lcd.backlight();

  Serial.begin(9600);

  dht.begin();

  pinMode(motorPinA, OUTPUT);

  pinMode(motorPinB, OUTPUT);

  pinMode(endSwitchOpen, INPUT_PULLUP);
```

```
pinMode(endSwitchClose, INPUT_PULLUP);

pinMode(ventiladorPin, OUTPUT);

lcd.setCursor(0, 0);

lcd.print("Sensores Init...");

delay(2000);

lcd.clear();

}

void loop() {

  // 1. **Lectura de sensores**

  float temperatureDHT = dht.readTemperature() - 7;

  float humidity = dht.readHumidity() + 9;

  int sensorValue = analogRead(tdsPin);

  // Calcular el voltaje

  voltage = sensorValue * (5.0 / 1023.0);

  // Calcular el valor de TDS

  float compensationCoefficient = 1.0 + 0.02 * (temperature - 25.0);

  float compensatedVoltage = voltage / compensationCoefficient;

  tdsValue = (133.42 * compensatedVoltage * compensatedVoltage * compensatedVoltage

    - 255.86 * compensatedVoltage * compensatedVoltage
```

```
+ 857.39 * compensatedVoltage) * 0.5;
```

```
// 2. **Mostrar datos en LCD y Serial**
```

```
lcd.clear();
```

```
lcd.setCursor(0, 0);
```

```
lcd.print("T:");
```

```
lcd.print(temperatureDHT, 1);
```

```
lcd.print("C H:");
```

```
lcd.print(humidity, 0);
```

```
lcd.print("%");
```

```
lcd.setCursor(0, 1);
```

```
lcd.print("TDS:");
```

```
lcd.print(tdsValue);
```

```
lcd.print(" ppm");
```

```
Serial.print("Temperatura: ");
```

```
Serial.print(temperatureDHT);
```

```
Serial.print("C Humedad: ");
```

```
Serial.print(humidity);
```

```
Serial.print("% TDS: ");
```

```
Serial.print(tdsValue);
```

```
Serial.println(" ppm");
```

```
delay(3000); // Esperar 3 segundos antes de tomar decisiones
```

```
// 3. **Decisión sobre cortinas**
```

```
if (temperatureDHT > 22 && !cortinaAbierta) {
```

```
    Serial.println("Temperatura alta: abriendo cortina");
```

```
    lcd.clear();
```

```
    lcd.setCursor(0, 0);
```

```
    lcd.print("Abriendo cortina");
```

```
    digitalWrite(motorPinA, HIGH);
```

```
    digitalWrite(motorPinB, LOW);
```

```
    while (digitalRead(endSwitchOpen) == HIGH) {
```

```
        delay(10);
```

```
    }
```

```
    Serial.println("Cortina abierta completamente");
```

```
    lcd.clear();
```

```
    lcd.setCursor(0, 0);
```

```
    lcd.print("Cortina abierta");
```

```
    digitalWrite(motorPinA, LOW);
```

```
    digitalWrite(motorPinB, LOW);
```

```
    cortinaAbierta = true;
}
else if (temperatureDHT < 20 && cortinaAbierta) {
    Serial.println("Temperatura baja: cerrando cortina");
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Cerrando cortina");

    digitalWrite(motorPinA, LOW);
    digitalWrite(motorPinB, HIGH);

    while (digitalRead(endSwitchClose) == HIGH) {
        delay(10);
    }

    Serial.println("Cortina cerrada completamente");
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Cortina cerrada");
    digitalWrite(motorPinA, LOW);
    digitalWrite(motorPinB, LOW);
    cortinaAbierta = false;
}
```

```
// 4. **Control del ventilador por humedad**  
  
if (humidity >= 71) {  
  
    if (!ventiladorEncendido) {  
  
        ventiladorEncendido = true;  
  
        Serial.println("Humedad alta: Encendiendo ventilador");  
  
        digitalWrite(ventiladorPin, HIGH);  
  
        lcd.clear(); // Borrar toda la pantalla antes de mostrar el mensaje  
  
    }  
  
    // Mostrar "Ventilador ON" cada 5 segundos  
  
    if (millis() - tiempoVentilador >= 5000) {  
  
        lcd.clear(); // Asegurar que solo muestre "Ventilador ON"  
  
        lcd.setCursor(0, 0);  
  
        lcd.print("Ventilador ON");  
  
        delay(3000); // Mantener mensaje por 3 segundos  
  
        tiempoVentilador = millis();  
  
    }  
  
}  
  
else {  
  
    if (ventiladorEncendido) {  
  
        ventiladorEncendido = false;  
  
        Serial.println("Humedad normal: Apagando ventilador");  
  
    }  
  
}
```

```
digitalWrite(ventiladorPin, LOW);

lcd.clear(); // Borrar toda la pantalla
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("Ventilador OFF");
delay(2000); // Mostrar por 2 segundos
lcd.clear(); // Limpiar la pantalla después
}
}

delay(2000);
}
```

LINK VIDEO: <https://youtu.be/vO-hbOoyckc>