



# Universidad **Mariana**

Sistema automatizado para una producción de forraje verde hidropónico en invernadero.

Francisco Duván Cantuca Legarda

Jose David Moncayo Solarte

Santi Sebastián Cerón Delgado

Universidad Mariana

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Mecatrónica

San Juan de Pasto

2024

Sistema automatizado para una producción de forraje verde hidropónico en invernadero.

Francisco Duván Cantuca Legarda

Jose David Moncayo Solarte

Santi Sebastián Cerón Delgado

Informe de investigación para optar al título de: Ingeniero Mecatrónico

M.Sc. Fabio Camilo Gómez Meneses

Asesor

Universidad Mariana

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Mecatrónica

San Juan de Pasto

2024

## **Agradecimientos**

Agradecemos a Dios por brindarnos salud, fortaleza y sabiduría para culminar con éxito este trabajo de grado.

Agradecemos a nuestras familias, por su amor incondicional, comprensión y apoyo constante a lo largo de este proceso académico. La confianza depositada en nosotros ha sido el motor que nos animó a seguir adelante.

A nuestro asesor de tesis, Ing. M.Sc. Fabio Camilo Gómez Meneses, por su dedicación, guía y valiosos aportes que enriquecieron este trabajo. Su disposición a ayudarnos fue fundamental para alcanzar los objetivos planteados.

Finalmente, a cada integrante de este equipo: Francisco Duván Cantuca Legarda, Jose David Moncayo Solarte y Santi Sebastián Cerón Delgado, por la dedicación, esfuerzo y el trabajo en equipo que permitieron la culminación de este proyecto.

## **Dedicatoria**

A Dios, por ser mi guía y fortaleza en cada paso de este camino.

A mi familia, quienes, con su amor incondicional, apoyo y confianza me han inspirado a alcanzar mis metas.

A mis amigos, por ser una fuente constante de motivación y por estar presentes en los momentos de alegría y desafío.

A mis profesores y mentores, por compartir su conocimiento, tiempo y paciencia, contribuyendo de manera invaluable a mi formación.

Y a mí mismo, por la perseverancia y el esfuerzo dedicado a este proyecto, que representa el fruto de años de aprendizaje y dedicación.

Francisco Duván Cantuca Legarda

## **Dedicatoria**

A mi padre Libardo Moncayo, por ser ejemplo de dedicación y perseverancia. Gracias por enseñarme a nunca rendirme y motivarme a ser mejor cada día para poder cumplir con mis sueños.

A mi madre María Solarte, por su amor incondicional, su apoyo y sus palabras de aliento. La fe depositada en mí ha sido la fuerza que me ha impulsado a seguir adelante.

A mis compañeros de equipo, por su compromiso, dedicación y esfuerzo. Este trabajo es reflejo de nuestra unión y perseverancia.

Jose David Moncayo Solarte

## **Dedicatoria**

Primeramente, a Dios, por darme fortaleza en los momentos difíciles y permitirme culminar este proyecto con éxito.

A mi familia, por ser el pilar fundamental en este proceso académico. Su motivación, amor y apoyo incondicional fueron esenciales para mantenerme firme y seguir adelante en los momentos más desafiantes.

Este trabajo refleja el apoyo de cada persona que, de una forma u otra, me ayudó y motivó a no rendirme.

Santi Sebastián Cerón Delgado

## **Contenido**

1. Resumen del proyecto .....	13
1.1. Descripción del problema.....	13
1.1.1. Formulación del problema .....	14
1.2. Justificación.....	14
1.3. Objetivos .....	15
1.3.1. Objetivo general.....	15
1.3.2. Objetivos específicos.....	15
1.4. Marco de antecedentes .....	16
1.4.1. Bases de datos y criterios de búsqueda .....	16
1.4.2. Análisis de los estudios .....	22
1.5. Marco teórico y conceptual.....	23
1.5.1. Forraje Verde Hidropónico (FVH).....	24
1.5.1.1. Componentes en la producción de forraje verde hidropónico.....	24
1.5.1.2. Requerimientos en la producción de forraje verde hidropónico.....	27
1.5.1.3. Ventajas del forraje verde hidropónico.....	29
1.5.1.4. Desventajas del forraje verde hidropónico.....	30
1.5.2. Automatización de procesos.....	30
1.5.2.1. Automatismos.....	30
1.5.2.2. Niveles de automatización.....	31
1.5.2.3. Sistemas de control.....	31
1.5.3. Automatización en invernadero .....	32
1.5.3.1. Microcontrolador.....	32
1.5.3.2. Sensores.....	32
1.5.3.3. Sistema de riego automatizado.....	32
1.5.3.4. Iluminación LED.....	32
1.5.3.5. Internet of things (IoT).....	33
1.6. Metodología .....	34
1.6.1. Tipo de investigación .....	34
1.6.2. Línea de investigación.....	34
1.6.3. Hipótesis de investigación.....	34
1.6.4. Descripción metodológica.....	34
1.6.4.1. Actividades Objetivo 1 .....	36

1.6.4.2. Actividades Objetivo 2.....	37
1.6.4.3. Actividades Objetivo 3.....	37
1.6.5. Validez de la investigación .....	38
1.6.5.1. Validación interna. ....	38
2. Resultados .....	39
2.1. Resultados objetivo 1. ....	39
2.1.1. Selección de tipo de invernadero .....	39
2.1.1.1. Prediseño del invernadero. ....	39
2.1.2. Selección de bandejas.....	40
2.1.3. Diseño de anaquel .....	42
2.1.3.1. Análisis estático de la estructura en Solidworks. ....	44
2.1.4. Selección y dimensionamiento de micro aspersores .....	47
2.1.5. Selección tanque de almacenamiento.....	49
2.1.6. Dimensionamiento del sistema de riego.....	50
2.1.7. Selección bomba hidráulica .....	51
2.1.8. Costos .....	52
2.1.8.1. Estructura invernadero y anaquel .....	52
2.1.8.2. Sistema de riego. ....	53
2.1.8.3. Componentes electrónicos.....	54
2.1.8.4. Costo estimado total del proyecto. ....	54
2.1.9. Costos de sistema a escala.....	54
2.2. Resultados objetivo 2 .....	57
2.2.1. Selección componentes electrónicos .....	57
2.2.1.1. Módulo ESP32. ....	57
2.2.1.2. Sensor de temperatura y humedad DHT 22. ....	57
2.2.1.3. Celda de carga y módulo HX711. ....	58
2.2.1.4. Luces LED impermeables. ....	59
2.2.1.5. Ventiladores. ....	59
2.2.2. Selección de plataforma IoT .....	60
2.2.2.1. ThingSpeak.....	60
2.2.3. Diagramas de flujo .....	60
2.2.3.1. Diagrama de flujo sistema de riego.....	60
2.2.3.2. Diagrama de flujo comunicación a plataforma ThingSpeak .....	61
2.3. Resultados objetivo 3 .....	63



2.3.1. Diseño invernadero a escala .....	63
2.3.2. Diseño anaquel a escala.....	64
2.3.3. Diagrama eléctrico .....	64
2.3.4. Construcción anaquel .....	65
2.3.5. Construcción invernadero .....	67
2.3.6. Sistema de riego .....	68
2.3.7. Implementación del sistema electrónico. ....	69
2.3.7.1. Pantalla display LCD .....	70
2.3.7.2. Sensor DHT22.....	70
2.3.7.3. Celda de carga .....	70
2.3.7.4. Ventiladores .....	71
2.3.7.5. Luces LED.....	71
2.3.8. Envío de datos a ThingSpeak .....	72
2.3.9. Verificación en el monitor serial.....	73
2.3.10. Seguimiento de proceso de germinación para validación .....	73
2.3.10.1. Pre-germinación y lavado.....	74
2.3.10.2. Germinación y comparación entre cultivos.....	75
2.3.11. Análisis comparativo de crecimiento. ....	78
2.3.12. Análisis frente a un cultivo tradicional .....	80
2.3.13. Análisis del sistema diseñado.....	81
3. Conclusiones .....	83
4. Recomendaciones .....	84
Referencias bibliográficas .....	85

## **Índice de Tablas**

Tabla 1. Criterios de búsqueda en IEEE Xplorer. ....	16
Tabla 2. Criterios de búsqueda en ScienceDirect. ....	16
Tabla 3. Criterios de búsqueda en Scopus.....	17
Tabla 4. Tabla comparativa según el tipo de invernadero.....	39
Tabla 5. Plan de riego por bandeja.....	49
Tabla 6. Características bomba hidráulica.....	52
Tabla 7. Costos de la estructura del invernadero.....	52
Tabla 8. Costos del anaquel.....	53
Tabla 9. Costos de las bandejas.....	53
Tabla 10. Costos del sistema de riego.....	53
Tabla 11. Costos de componentes electrónicos.....	54
Tabla 12. Costos totales del proyecto.....	54
Tabla 13. Costos anaquel a escala.....	55
Tabla 14. Costos del sistema de riego a escala.....	55
Tabla 15. Costos de componentes electrónicos del sistema a escala.....	56
Tabla 16. Costo total del sistema a escala.....	56
Tabla 17. Tabla comparativa sensores DHT.....	58
Tabla 18. Datos de la bandeja en el invernadero.....	76
Tabla 19. Datos de la bandeja testigo.....	77

## **Introducción**

La producción de forraje verde hidropónico (FVH) se ha consolidado como una alternativa eficiente y sostenible para la alimentación animal, especialmente en regiones afectadas por condiciones climáticas adversas. En el departamento de Nariño, donde la actividad ganadera representa una parte fundamental de la economía local, la variabilidad climática y la escasez de recursos forrajeros afectan directamente la productividad del sector. Este contexto plantea la necesidad de implementar soluciones innovadoras que garanticen el suministro constante y de calidad de alimento para el ganado.

El presente proyecto tiene como objetivo diseñar e implementar un sistema automatizado para la producción de forraje verde hidropónico en invernadero, empleando tecnologías de monitoreo basadas en el Internet de las Cosas (IoT). Este sistema busca optimizar el control de variables ambientales clave como la temperatura, la humedad, el riego y la iluminación, con el fin de crear condiciones ideales para el crecimiento del forraje. La automatización de estos procesos permitirá mejorar la eficiencia productiva y minimizar la intervención manual, contribuyendo así a la sostenibilidad del proceso.

El alcance del proyecto contempla el diseño, construcción y validación de un invernadero a escala equipado con sensores y actuadores controlados por un microcontrolador ESP32, así como la integración de la plataforma ThingSpeak para el monitoreo remoto de las condiciones ambientales y del crecimiento del cultivo. La validación del sistema se realizará mediante la comparación del rendimiento de cultivos bajo condiciones controladas frente a cultivos tradicionales expuestos a factores climáticos.

Entre las limitaciones del proyecto se consideran los recursos económicos destinados para la implementación a gran escala, la disponibilidad de componentes electrónicos y la estabilidad de la conexión a internet en zonas rurales. Sin embargo, estas restricciones se han abordado mediante el uso de materiales accesibles y tecnologías de bajo consumo energético.

La metodología adoptada incluye el análisis de requerimientos, diseño estructural en software CAD, selección e integración de componentes electrónicos, programación del sistema de control y validación experimental mediante pruebas de cultivo. Este enfoque permite asegurar la viabilidad técnica y operativa del sistema propuesto.

Este estudio representa un avance significativo en la aplicación de tecnologías automatizadas e IoT en el sector agropecuario, ofreciendo una solución innovadora que puede ser replicada y adaptada a diferentes contextos productivos. La implementación de este sistema no solo optimiza la producción de forraje, sino que también contribuye al desarrollo sostenible de la región, fortaleciendo la seguridad alimentaria y la economía de los productores ganaderos.

## **1. Resumen del proyecto**

En este proyecto se desarrolla un sistema automatizado de cultivo de forraje verde hidropónico (FVH) en un invernadero a escala. El forraje que se utiliza para el desarrollo del proyecto son semillas de maíz y trigo, seleccionados por su alta adaptabilidad al cultivo hidropónico. De manera tradicional, este tipo de cultivos se realiza en condiciones no controladas, como en bandejas o directamente en la tierra, lo que implica limitaciones debido a la dependencia del clima, calidad del suelo y demás factores, además de requerir tareas repetitivas como el riego y la supervisión constante.

Como objetivo se tiene desarrollar un sistema que permita mejorar la eficiencia del proceso de producción frente a métodos tradicionales. Esto se logra mediante la implementación del sistema que permite controlar las variables de temperatura y humedad y procesos como el riego y la activación de luz artificial. Adicionalmente, se implementa un monitoreo mediante una plataforma IoT donde se monitorea el cultivo, recolectando valores de temperatura, humedad y peso del cultivo.

El procedimiento requirió identificar los requerimientos de producción, el diseño y programación del sistema de control, y la validación del sistema comparando un cultivo expuesto a condiciones naturales sin control frente a los ubicados en el invernadero. Como resultado, se observa la capacidad del sistema de mantener las condiciones que aseguran la calidad del forraje.

### **1.1. Descripción del problema**

Nariño es una de las microcuencas lecheras más importantes del país, con un aporte aproximadamente del 5% de la producción nacional con más de un millón de litros de leche diarios, actividad donde laboran 45.000 familias entre campesinos, indígenas y medianos productores. Según la gobernación de Nariño (2022), la producción láctea sigue creciendo, pues en tan solo 10 años el incremento ha sido del 25%, sin embargo, uno de los grandes problemas tiene que ver con las afectaciones climáticas que ponen en riesgo la alimentación de la ganadería, debido a los prolongados veranos, heladas, granizadas o inundaciones, con lo cual, escasea la oferta de forrajes y pasturas generando sobre costos, disminución en la producción o venta de los animales. Además, en el departamento de Nariño y sus municipios existen productores de pequeña escala que presentan muchos requerimientos entre ellos el espacio para

la producción ganadera, y debido al problema de espacio para el ganado y para la producción de forrajes, necesitan alquilar lotes donde no tienen la seguridad suficiente y esto resulta en robos del ganado, enfermedades y otros factores.

La producción convencional de forrajes, en las actuales condiciones agroecológicas, considera que la disponibilidad de alimento es limitada a lo largo del año por diversos factores: la baja fertilidad de los suelos, la presencia de plagas y enfermedades, la falta de agua, y las extremas sequías que se incrementan por el cambio climático, lo que genera mayor escasez de alimentos, afecta la productividad animal, y en muchas ocasiones es causa de muerte (Paipa, L., Bernal, L., Conde, A., Quijano, N., & Bula, K, 2020).

Una alternativa en la actualidad para alimentación de ganado es el forraje verde hidropónico que consiste en la germinación de semillas de cereales y leguminosas para hacerlas crecer en un entorno con condiciones ambientales controladas y de esa forma obtener una biomasa vegetal utilizada como forraje con buenas características para el consumo animal.

La propuesta consiste en automatizar un proceso de producción de forraje verde hidropónico en un invernadero que permita a los productores del departamento de Nariño, producir un cultivo de forraje de alta calidad mediante el uso de diferentes sistemas automatizados de riego, luz y lavado.

### ***1.1.1. Formulación del problema***

¿Cómo diseñar y construir un invernadero a escala con un sistema automatizado para mejorar la producción de forraje verde hidropónico que permita el óptimo crecimiento del mismo?

## **1.2. Justificación**

El forraje verde hidropónico es el resultado del proceso de germinación de granos de cereales o leguminosas (maíz, sorgo, cebada, trigo, alfalfa etc.) sobre charolas, para una producción de 15kg de forraje es suficiente un espacio de 4 m<sup>2</sup>. Se realiza durante un periodo de 7 a 14 días, captando la energía del sol y asimilando los minerales de la solución nutritiva. Con la implementación de un cultivo hidropónico se puede evitar el uso del suelo, con esto, se controla en un área donde se instale, el crecimiento del forraje y se va a renovar según se necesite.

Económicamente hablando este tipo de cultivos es muy accesible debido a la reutilización de agua, disminuyendo el costo de producción del forraje verde hidropónico. La reutilización del agua también es útil ya que, al saber el volumen de agua necesario para el proceso de riego podremos cuidar tanto el agua como el medio ambiente.

El departamento de Nariño se caracteriza por tener ecosistemas aptos para sistemas lecheros debido a que un gran porcentaje de familias que viven en la zona rural tienen relación con estas especies. Sin embargo, en la actualidad se presentan inconvenientes derivados de los efectos negativos del cambio climático y de los requerimientos agronómicos para la producción de forraje dificultando así, la obtención de material para el consumo animal (González, E., Ceballos, J., & Benavides, O, 2015).

Este proyecto se enfoca en mejorar el sistema de producción de un cultivo hidropónico de forraje, mediante la automatización en invernadero, planificando de mejor manera el sistema productivo simulando las condiciones ambientales requeridas para una óptima cosecha, con esto se espera optimizar el uso del agua y otros recursos, así mismo, mejorar la calidad y valor nutricional del producto, al hacer todo esto evitamos que la producción de forraje dependa exclusivamente del clima del sector y la calidad del suelo.

### **1.3. Objetivos**

#### ***1.3.1. Objetivo general***

Desarrollar un sistema automatizado para la producción de forraje verde hidropónico en invernadero a escala mediante la implementación de tecnologías de monitoreo basadas en IoT.

#### ***1.3.2. Objetivos específicos***

- Identificar los requerimientos de producción y de automatización de un forraje verde hidropónico.
- Diseñar un sistema de control y automatización para controlar las variables que afectan el desarrollo del forraje (Temperatura, luz y humedad).
- Evaluar el sistema automatizado frente a un cultivo tradicional para implementarlo en invernadero a escala con el fin de que permita mantener un ambiente óptimo para la producción de forraje verde hidropónico en el municipio de San Bernardo.

## 1.4. Marco de antecedentes

### 1.4.1. Bases de datos y criterios de búsqueda

Para la búsqueda de artículos se utilizan las bases de datos IEEE Xplorer, ScienceDirect y Scopus donde se aplican criterios de búsqueda de artículos publicados en los últimos 5 años y de artículos más citados, luego se ordenan de acuerdo a su relevancia, como se indica en las tablas 1, 2 y 3.

**Tabla 1**

*Criterios de búsqueda en IEEE Xplorer.*

<b>Cadenas de búsqueda</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hydroponic AND System AND Automatic</li> <li>• Fodder AND Temperature</li> <li>• Hydroponic AND System AND Greenhouse</li> <li>• Hydroponic AND Smart AND Control</li> </ul>
<b>Periodo de búsqueda</b>	2018 – 2023
<b>Idioma</b>	Inglés
<b>Filtro por área temática</b>	Agriculture Internet of Things (IoT) Greenhouses

**Tabla 2**

*Criterios de búsqueda en ScienceDirect.*

<b>Cadenas de búsqueda</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fodder AND Hydroponic AND Automatic AND Greenhouse AND Production</li> <li>• Review AND Fodder AND Controlled AND Environment</li> <li>• Hydroponic Fodder AND Process AND Cow</li> <li>• Review AND Hydroponic Fodder AND Temperature</li> <li>• Hydroponic AND System AND Automatic</li> <li>• Automatic Greenhouse AND Hydroponic AND Internet of Things</li> </ul>
<b>Periodo de búsqueda</b>	2018 – 2023
<b>Idioma</b>	Inglés



<b>Filtro por área temática</b>	Agricultural and Biological Sciences Engineering Computer Science
---------------------------------	---

**Tabla 3**  
*Criterios de búsqueda en Scopus*

<b>Criterios de búsqueda</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hydroponic AND System AND Automatic AND IoT</li> </ul>
<b>Periodo de búsqueda</b>	2018-2023
<b>Número de documentos encontrados sin filtros</b>	28
<b>Idioma</b>	Solo artículos en inglés
<b>Filtro por área temática</b>	Computer Science Engineering Agriculture
<b>Tipo de documentos</b>	Artículos
<b>Número de documentos encontrados con filtros</b>	6

En los últimos años el cultivo de Forraje Verde Hidropónico (FVH) ha sido un tema de interés en áreas como la agricultura y la ingeniería debido a su aplicación y beneficio en áreas con poca facilidad de siembra de alimentos. Si bien el cultivo hidropónico en espacios controlados no es algo nuevo, ha ido tomando fuerza por el cambio de clima que se sufre en el planeta debido al calentamiento global, el crecimiento de la población es un problema también ya que se requiere más comida para alimentar a la gente y esto hace que muchos terrenos donde se puede sembrar se use para construir edificios. Es por esto que se han realizado estudios que se enfocan en espacios controlados automatizados donde se tienen cultivos hidropónicos esto no solo permite el óptimo desarrollo del cultivo, sino que también mejora la calidad del mismo al estar expuesto a condiciones óptimas que pueden ser controladas mediante una serie de sensores.

Para Ahamed et al. (2023), la temperatura ideal del aire para el forraje verde hidropónico es de 16 a 27 °C, y la humedad relativa debe estar entre el 60 % y el 80 %. La luz LED se usa

comúnmente para iluminación artificial con un espectro de luz rojo y azul para reducir el período de cosecha. El periodo de iluminación suele oscilar entre 12-18 horas al día. Los LED marcan un avance significativo sobre las opciones de iluminación convencionales debido a varios beneficios. Una combinación de luces LED rojas y azules ha demostrado ser la más imperativa para la fotosíntesis. La luz roja abarca fotones de energía inferior, que las plantas utilizan fácilmente durante la fotosíntesis. Al mismo tiempo, la luz azul favorece la apertura de las estomas de las plantas durante la fotosíntesis. Para una exploración detallada y profunda de este efecto, se han realizado varios experimentos utilizando la combinación de luces rojas y azules para diferentes cultivos. Las técnicas avanzadas como el funcionamiento basado en IoT y la optimización de los entornos térmicos interiores (temperatura, humedad relativa, iluminación LED) son fundamentales para la sostenibilidad de la producción de forraje en ambiente controlado (CEFP). La tecnología de monitoreo basada en IoT podría integrarse para hacer que el sistema de producción sea más eficiente, automático y menos laborioso. Cabe señalar que la comunicación inalámbrica puede experimentar pérdidas repetidas de conexión debido a obstáculos aleatorios o puede interrumpirse dependiendo de la ubicación cerca de plantas de alta densidad o metal.

En cuanto al consumo de energía reportó que un invernadero de alta tecnología requiere alrededor de 8-15 kWh de electricidad para producir 600kg de forraje hidropónico, lo que puede reducirse usando una red más básica para el invernadero. Algunos sensores usados fueron BME280 (temperatura del aire, humedad y presión atmosférica), DS18B20 (temperatura del suelo), fotorresistor LDR (sensor de luz), SX239 (humedad del suelo) y módulos NEO-7 GNSS. Cuenta con un nodo sensor que se beneficia de los potentes microcontroladores ESP32 y Atmega328P integrados con códigos personalizados para una alta eficiencia y un consumo de energía ultra bajo para un procesamiento más robusto y rápido. El nodo sensor ha sido probado con éxito en múltiples aplicaciones de ambientes controlados automatizados y ha medido, registrado y transferido datos sin interrupciones.

La comunicación inalámbrica entre estas placas transmisoras y el receptor (Gateway) se realiza a través de la tecnología LoRa la cual, es una tecnología de comunicación líder para la transferencia inalámbrica de datos de largo alcance con bajo consumo de energía en la agricultura, lo que permite que la distancia entre el emisor y los dispositivos de monitoreo sea de unos pocos metros a 100 km o más. Y, por último, propone que uno de los grandes retos son los costos operativos y de capital para los sistemas de producción: la producción de frutas y verduras en las instalaciones de ambientes controlados (invernaderos, granjas verticales) enfrenta altos costos operativos y de capital, principalmente la iluminación complementaria y

los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC). Un censo reciente de sistemas automatizados en ambientes controlados a nivel global muestra que alrededor del 50% de los productores no son rentables para cultivar frutas y verduras en sistemas agrícolas de ambiente controlado debido a los altos costos operativos y de capital. El precio del forraje suele ser más bajo que el de las frutas y hortalizas cultivadas en los sistemas automatizados en ambiente controlado. Por lo tanto, la inversión de capital, la depreciación y los costos operativos serían las principales preocupaciones de CEFP. Por lo tanto, la reducción de los costos de capital y operación sería esencial para lograr la sostenibilidad económica y ambiental en CEFP.

De la misma manera, se han realizado numerosos estudios relacionados con el Forraje Verde Hidropónico (FVH) en un ambiente controlado en los cuales se han tenido en cuenta temas como: Tipos de control, sensores eficientes y conectividad.

Teniendo en cuenta esto, Andrianto et al. (2020) en su estudio propone desarrollar y evaluar invernaderos inteligentes para cultivo hidropónico. Se espera que el sistema de invernadero inteligente que han desarrollado pueda ser una solución alternativa para aumentar la producción agrícola y producir plantas sanas y libres del uso de pesticidas. Para realizar esto, utilizan un Arduino Mega 2560, ESP-01, sensores de temperatura y humedad DHT11, sensor de temperatura resistente al agua DS18B20, sensor de resistencia LDR de luz fotosensible, sensor TDS analógico (placa y sonda), módulo sensor de detección de valor de pH líquido (placa pH + sonda de electrodo de pH), ventilador, rociador, bomba y válvula. El programa comienza con el proceso de inicialización, establece una conexión a Internet a través de una conexión Wi-Fi y establece una conexión a la base de datos en tiempo real en Firebase. Después de eso, el ESP-01 recibe datos del Arduino Mega2560 y los envía a la base de datos en tiempo real en Firebase, luego el ESP-01 lee los datos de estado del actuador de la base de datos en tiempo real en Firebase y los envía al Arduino Mega2560. Adicional a esto, desarrollan una aplicación para Android para monitorear las condiciones ambientales del invernadero, como temperatura, humedad, condiciones de luz y pH. Además, esta aplicación también se puede utilizar para controlar actuadores como ventiladores, bombas, lámparas, rociadores y válvulas. Esta aplicación está vinculada a una base de datos en tiempo real en Firebase. Como conclusión de esta investigación se tiene que han desarrollado con éxito un invernadero inteligente basado en IoT para la agricultura hidropónica. El resultado ha demostrado que el sistema de invernadero inteligente para la agricultura hidropónica funciona correctamente y puede medir la temperatura, la humedad, el PH y las condiciones de luz. Además, las condiciones de

encendido/apagado de actuadores como ventiladores, bombas, luces, rociadores y válvulas se pueden controlar a través de la aplicación Android.

En el artículo de Nguyen et al. (2022) se presenta un sistema de monitoreo automático para cultivo hidropónico basado en IoT. Este sistema recopila datos en tiempo real de sensores que detectan condiciones ambientales y nutrientes utilizados en el cultivo hidropónico. Los datos se transmiten a la nube y se almacenan para su análisis. El sistema permite a los agricultores monitorear y ajustar parámetros ambientales y nutricionales, además de controlar bombas y ventiladores a través de una interfaz web desde dispositivos móviles. El sistema consta de sensores, unidades de procesamiento de señales con microcontroladores y un gateway IoT. Los datos se transmiten a través de un protocolo MQTT y se visualizan en una interfaz web. Se utilizaron varios sensores para medir temperatura, humedad, luz, pH y temperatura de la solución nutritiva. Estos sensores se colocaron en el ambiente y el depósito del cultivo hidropónico. En resumen, el sistema permite un monitoreo preciso y control del cultivo hidropónico a través de IoT y la nube. Los resultados revelaron que el sensor AH001 midió la humedad del aire (de 0% a 100% RH) y la temperatura del aire (de -40°C a 60°C). El sensor DOL 16 midió la intensidad de la luz en entornos desafiantes y ofreció dos salidas analógicas de 0-10 V. La sonda de temperatura de acero inoxidable midió la temperatura de la solución de nutrientes y funcionó en diversos líquidos. Estos sensores se ubicaron estratégicamente en el sistema hidropónico. Durante el período de crecimiento de las plantas de lechuga (día 20 a día 40), estos sensores recopilaron datos valiosos para el monitoreo y control del cultivo.

Vincentdo et al. (2023) discute el uso de técnicas hidropónicas para la producción de vegetales y la implementación de un Sistema de Monitoreo y Control Hidropónico basado en ANFIS (Sistema de Inferencia Difusa Adaptativa Neuro). Se presenta un panel de control de aplicaciones web. A pesar del crecimiento de la demanda de producción de vegetales debido a un estilo de vida saludable, Indonesia todavía utiliza métodos de plantación tradicionales en suelo. El cultivo hidropónico ofrece la modernización de la producción de cultivos al proporcionar nutrientes para un crecimiento más rápido y abundante. Sin embargo, lograr niveles precisos de nutrientes en los depósitos de agua puede ser un desafío. Para abordar esto, se han propuesto enfoques que involucran redes neuronales profundas, redes bayesianas y lógica difusa. Este estudio presenta un sistema de control hidropónico basado en IoT y ANFIS, que monitorea y regula los niveles de pH y nutrientes. El algoritmo ANFIS se utiliza para ajustar las bombas de manera precisa en función de los parámetros medidos. Las contribuciones

principales incluyen la creación de un prototipo de hidroponía en interiores basado en IoT, la implementación de modelos ANFIS para un control preciso de nutrientes y pH, y una comparación con el Sistema de Inferencia Difusa (FIS). El sistema recopila datos de sensores de IoT y utiliza modelos de redes neuronales artificiales para su análisis. El control de pH y nutrientes se logra mediante el uso de lógica difusa y ANFIS. Algunos resultados obtenidos fueron que el sistema hidropónico inteligente desarrollado utilizando el método ANFIS ajusta con precisión los niveles de pH y nutrientes, lo que resulta en un mejor crecimiento de las plantas. El controlador difuso creado mediante ANFIS es un 67% más preciso que aquel creado mediante el método difuso de Sugeno. El prototipo del sistema de control hidropónico basado en la técnica de película de nutrientes (NFT) y en IoT en interiores integra sensores conectados a Arduino y Raspberry Pi 4. El panel de control de la aplicación web del sistema proporciona información sobre las tasas de error de los sensores de pH y TDS, lo que permite la evaluación y verificación del sistema. El panel de control de la aplicación web también permite el control remoto y la monitorización del sistema hidropónico.

El estudio de Chowdhury et al. (2020) se enfoca en desarrollar un sistema hidropónico vertical automático para el cultivo en interiores, especialmente diseñado para hogares con espacio limitado. Este sistema se basa en un microcontrolador central que se comunica con sensores para supervisar y ajustar de manera precisa los parámetros del cultivo, reduciendo al mínimo la necesidad de intervención humana. Un aspecto fundamental destacado en el estudio es la importancia de la iluminación LED para el crecimiento de las plantas. Se menciona que las plantas no requieren el espectro completo de luz para su desarrollo, sino que absorben selectivamente la luz necesaria en el espectro. Se subraya la necesidad de proporcionar un espectro de luz con alta intensidad de luz roja para el cultivo de verduras de hojas verdes y otro espectro con alta intensidad de luces azules y rojas para plantas con flores y FVH. Además, se enfatiza que las luces LED deben estar encendidas durante un período de 16 horas al día para optimizar el crecimiento de las plantas. Para controlar la iluminación LED, se emplea un relé conectado al microcontrolador central, que se comunica con diversos sensores para gestionar todos los aspectos del sistema de cultivo, reduciendo así la necesidad de intervención manual. Se puede concluir que el rendimiento del sistema se ilustró mediante una interfaz de IoT en el sitio web de Thingspeak y una aplicación móvil. Proporcionó notificaciones en tiempo real, acceso remoto y monitoreo de los parámetros del sistema. Además, el sistema ofrecía una amplia gama de información esencial para los investigadores de plantas y permitía el control remoto de todo el sistema. El sistema demostró su funcionalidad y su potencial para expandirse

a gran escala, brindando oportunidades a las personas de la región para producir alimentos según sus necesidades.

Shrivastava et al. (2023) se centra en el diseño y desarrollo de un sistema robótico automático para la agricultura hidropónica vertical utilizando IoT y análisis de big data. En el mundo digital actual, el crecimiento de los países en desarrollo ha mejorado drásticamente gracias a la influencia de los agricultores y los procesos agrícolas innovadores. Sin embargo, los métodos tradicionales de cultivo requieren mucho tiempo y mano de obra y no siempre se mantiene el nivel de nutrientes necesario. Para superar estas limitaciones se ha implementado la agricultura hidropónica vertical, que permite cultivar más cultivos, vegetales y frutas sin necesidad de suelo. El sistema hidropónico vertical se implementa con sensores de IoT para monitorear continuamente el estado y la salud de los cultivos. Cuando los niveles de nutrientes o agua disminuyen, el sistema los proporciona de manera constante. El artículo también describe la estructura y el funcionamiento del sistema, incluyendo el control del flujo de agua, la monitorización de la temperatura y la humedad, y el reciclaje del agua. Se presentan los resultados y se discute el rendimiento del sistema, destacando su eficiencia en comparación con los métodos tradicionales. Además, se mencionan las posibles aplicaciones futuras y la importancia del análisis de big data para la toma de decisiones en la agricultura. Los resultados fueron que el sistema controlado y monitoreado por sensores de IoT midió de manera efectiva factores importantes como el tiempo requerido para completar el proceso y el rendimiento proporcionado por el sistema. El suministro de agua a las plantas se regulaba automáticamente y se analizaban los niveles de agua en las tuberías. El uso del agua se mantenía de manera continua y las aguas residuales se reciclaban. El rendimiento del sistema dependía de las acciones tomadas por el usuario y del rendimiento proporcionado por el sistema.

#### ***1.4.2. Análisis de los estudios***

Tomando en cuenta las problemáticas por las cuales los cultivos hidropónicos son necesarios se tomaron como base los anteriores estudios, con el fin de analizar las diferentes maneras en que pueden ser utilizados los distintos sensores y actuadores para el invernadero automatizado, los cuales serán tomados a cuenta para la elaboración de este proyecto.

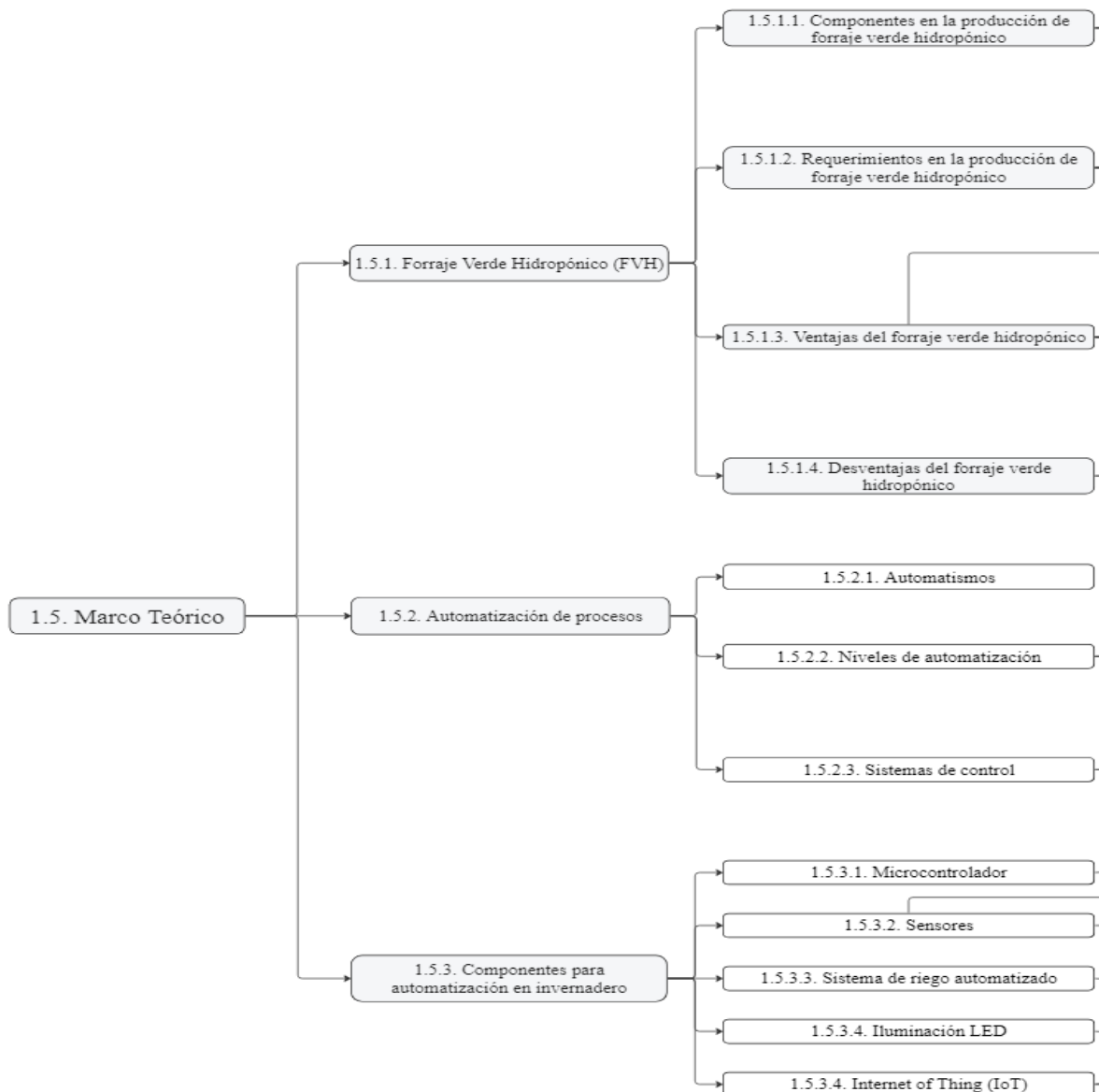
Además, se considerarán las variables para la temperatura, humedad y demás, con el fin de realizar un adecuado proceso de cultivo, aunque algunas variables pueden variar por la zona en la que se realizará el proyecto y el tipo de planta que se desee sembrar. En especial, se tendrá

en cuenta la investigación de Chowdhury et al. (2023) con énfasis en la iluminación LED con un espectro de luz rojo y azul con el fin de adaptar esto al invernadero automatizado y que la planta presente una mejora en el proceso de fotosíntesis. En un principio ambos estudios tienen como objetivo desarrollar un sistema automatizado en un ambiente controlado y determinar si puede ser una alternativa para incrementar la producción de la agricultura en áreas donde sea difícil el proceso de siembra de plantas.

## 1.5. Marco teórico y conceptual

A continuación, en la Figura 1 se presenta la taxonomía del marco teórico.

**Figura 1**  
*Taxonomía de la investigación.*



### **1.5.1. Forraje Verde Hidropónico (FVH)**

El forraje verde hidropónico (FVH) es una tecnología de producción de biomasa vegetal obtenida a partir del crecimiento inicial de las plantas en los estados de germinación y crecimiento temprano de plántulas a partir de semillas viables. El FVH o “green fodder hydroponics” consiste en un pienso o forraje vivo, de alta digestibilidad, calidad nutricional y muy apto para la alimentación animal (FAO, 2001).

Es el resultado del proceso de germinación de granos de cereales que se realiza durante un periodo de 8 a 15 días, captando energía del sol y utilizando los nutrientes contenidos en la propia semilla. La producción de germinados está considerada como un sistema hidropónico, debido a que éste se realiza sin suelo, lo que permite producir a partir de semillas colocadas en bandejas, una masa forrajera de alto valor nutritivo, consumible al 100 %, con una digestibilidad de hasta 90 %, limpio y libre de contaminaciones (Tarrillo, 2008).

#### **1.5.1.1. Componentes en la producción de forraje verde hidropónico.**

**1.5.1.1.1. Invernadero.** Gutiérrez (2002), citado en Gómez (2007); plantean que el diseño del invernadero debe adaptarse según la cantidad deseada de forraje diario, teniendo en cuenta un margen de seguridad. Se sabe que se requieren 4 m<sup>2</sup> para producir 15 kg de forraje al día. Además, es importante ubicarlo cerca del establo para facilitar el suministro de forraje a los animales, su manejo y una supervisión constante. La efectividad de las instalaciones de agua y luz también influye en su ubicación. En áreas con climas fríos, se recomienda construir un invernadero hermético con doble pared de plástico para regular la temperatura, especialmente durante la noche. Además, se aconseja que el piso sea de concreto, ya que esto evita problemas como encharcamientos, la proliferación de hongos y enfermedades. Esto es esencial para mantener una adecuada higiene en la explotación ganadera.

Las dimensiones de un invernadero no convencional se determinan en función de la cantidad de forraje necesaria para la alimentación de los animales. Se aconseja que tenga un ancho mínimo de 3 metros y un máximo de 9 metros, con una longitud que no exceda los 30 metros. En cuanto a la altura, se recomienda que oscile entre 3 y 4 metros en el centro y entre 2 y 2.6 metros en los laterales, lo cual favorece el crecimiento adecuado de las plantas. Se plantean formas básicas en las que se pueden construir estas estructuras, que son las siguientes: a dos aguas, en forma de túnel, invernadero plano.

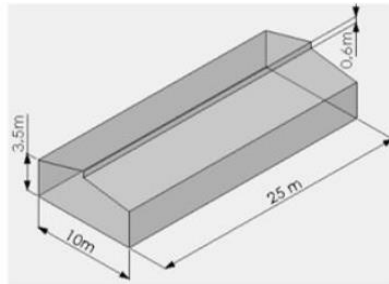


Los invernaderos de dos aguas o tipo capilla son apropiados tanto para explotaciones intensivas en espacios reducidos como para operaciones a gran escala, especialmente para cultivos de menor tamaño. Se destacan por su idoneidad en el cultivo de forrajes verdes hidropónicos debido a la eficiente utilización del espacio que ofrece su estructura. Estos invernaderos pueden variar en dimensiones, abarcando anchos de 4 a 8 metros y longitudes de hasta 20 metros, con una altura de aproximadamente 3 metros (Antonio & Mejía, 2022).

Entre las ventajas más notables de este tipo de invernaderos se incluye la facilidad para incorporar sistemas de ventilación cenital y la capacidad para drenar eficazmente el agua de lluvia (Cermeño, 2005).

### Figura 2

*Invernadero tipo capilla*

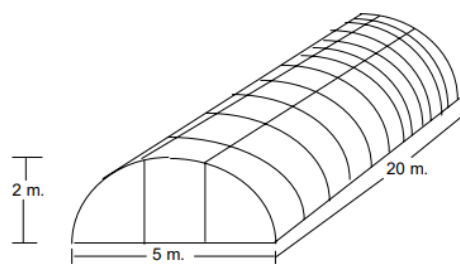


Fuente: Leslie & Reyes, 2016

Los invernaderos tipo túnel se utilizan en cultivos que no necesitan una extracción significativa de aire, lo que ayuda a reducir las pérdidas de calor. Normalmente, se emplea para cultivar plantas de tamaño pequeño y mediano, así como en operaciones de cultivo intensivas. Se distingue por su diseño de cubierta y su estructura completamente fabricada en metal. Su popularidad está en aumento debido a su mayor eficacia en la gestión de los elementos climáticos, su alta resistencia a vientos fuertes. (Antonio & Mejía, 2022).

### Figura 3

*Invernadero tipo túnel.*



Fuente: Alvarado y Urrutia, 2003

Por último, los invernaderos planos se emplean en regiones con escasa precipitación y se caracteriza por su diseño cúbico, que facilita la entrada de abundante luz. Su techo es plano y presenta una gran resistencia al viento. No se recomienda su uso en áreas con fuertes lluvias o alta humedad, ya que no es eficaz en la evacuación del agua de lluvia. Una de sus ventajas más notables radica en su costo de instalación reducido (Cermeño, 2005).

La estructura vertical se compone de pilares perimetrales sólidos fabricados generalmente en madera o acero galvanizado, que suelen ser de forma cilíndrica y tienen una inclinación hacia afuera de aproximadamente 30 grados con respecto a la vertical. Estos pilares se ubican en los lados y esquinas del invernadero y están sujetos en la parte superior. Su función principal es mantener tensas las cuerdas de alambre de la cubierta. Además, el invernadero cuenta con soportes internos intermedios (Capcha & Torres, 2015).

#### **Figura 4**

*Invernadero plano.*



Fuente: Cermeño, 2005

**1.5.1.1.2. Estanterías.** Las bandejas utilizadas en el cultivo de forraje pueden estar hechas de diferentes materiales, como madera, metal o PVC. La altura de esta estructura debe ser diseñada de manera que sea cómoda para llevar a cabo las tareas relacionadas con el cultivo. Cada módulo de esta estructura deberá contar con pendientes para facilitar el drenaje de la solución nutritiva en todas las direcciones. (Gómez, 2007).

**1.5.1.1.3. Bandejas.** Se trata de bandejas de plástico que se obtienen al cortar longitudinalmente envases desechables y luego se utilizan para revestir estantes antiguos de muebles. Estos estantes pueden ser de fibra de vidrio, madera pintada o madera revestida de plástico, y en ocasiones se fabrican especialmente para esta finalidad. (López, 2005).

### 1.5.1.2. Requerimientos en la producción de forraje verde hidropónico.

**1.5.1.2.1. Selección de semillas.** Debido a que la producción de FVH depende de la obtención de alimentos ricos en proteínas, se suelen emplear semillas capaces de generar forrajes con un contenido proteico que oscila entre el 10% y el 22%. Las variedades más comunes incluyen el maíz, la cebada y el trigo. En investigaciones sobre la producción de FVH a partir de cebada, se ha observado que, a los 16 días desde la siembra y utilizando efluente de piscigranja de truchas como fertilizante nitrogenado, se obtuvo un contenido de proteína bruta del 16.98%. (Osnayo, 2014). Se han llevado a cabo investigaciones comparativas para evaluar el contenido proteico de FVH generado a partir de semillas de avena y trigo. Los resultados indican que el FVH de trigo, sembrado en bandejas con una densidad de siembra de 600g por bandeja y cosechado a los 12 días, presenta un contenido de proteína cruda superior, alcanzando un 17.8%. Por otro lado, el FVH de avena muestra un contenido proteico máximo del 15% en bandejas con una densidad de siembra de 400g por bandeja y cosechado a los 10 días. (Soto, Reyes, & Ahumada, 2012).

De acuerdo con los datos presentados en la figura 5, se lleva a cabo una evaluación comparativa entre diversas especies de cultivos, considerando los porcentajes de composición de cada especie y la cantidad en gramos por charola.

#### Figura 5

*Producción de biomasa, composición química, proteína cruda (PC), fibra detergente neutro (FDN), fibra detergente ácido (FDA), Extracto etéreo (EE), energía metabolizable (EM) y proteína metabolizable (PM) de forraje verde hidropónico de avena y trigo.*

Densidad (g/charola)	Tiempo (días)	Especie	Biomasa (kg/m <sup>2</sup> )	PC (%MS)	FDN (%MS)	FDA (%MS)	Lignina (%MS)	Celulosa (%MS)	Hemicelulosa (%MS)	EE (%MS)	EM (%MS)	PM (%MS)
400	10	Avena	7,0	17,0	46,8	26,3	3,4	24,1	20,6	9,8	2,4	63
		Trigo	7,0	13,4	50,2	26,3	3,2	19,4	28,1	2,3	2,7	81
	12	Avena	8,0	19,0	49,8	28,7	4,3	25,6	21,1	10,1	2,4	61
		Trigo	7,0	16,5	69,3	22,8	5,8	28,7	35,4	2,0	2,6	77
600	10	Avena	10,0	14,1	45,7	20,1	2,6	20,8	25,6	6,8	2,2	64
		Trigo	10,0	16,3	49,3	20,1	2,6	18,7	28,7	1,3	2,7	82
	12	Avena	12,0	13,0	43,0	21,5	3,4	20,7	21,4	6,6	2,0	61
		Trigo	12,0	17,8	54,9	20,5	5,0	21,1	27,4	2,6	2,7	80
800	10	Avena	13,0	12,3	53,9	23,7	3,9	21,8	30,2	6,9	2,2	74
		Trigo	25,0	16,7	57,3	23,7	2,4	23,8	31,1	1,7	2,7	81
	12	Avena	15,0	13,9	55,3	25,4	3,8	23,8	29,9	8,9	2,1	62
		Trigo	30,0	17,2	55,8	26,2	2,4	23,5	30,5	2,1	2,9	88
Media			13,0	15,6	52,6	24,3	3,6	22,7	27,5	5,1	2,5	73,1
EEM			0,128	0,050	0,844	23,2	0,299	0,484	0,639	0,013	0,022	0,541

Fuente: Soto, Reyes, & Ahumada, 2012

**1.5.1.2.2. Pre-germinación y lavado.** La semilla destinada para la siembra del FVH debe someterse a un proceso de limpieza en una solución compuesta por un 1% de hipoclorito de sodio (lo que equivale a 10 ml de hipoclorito de sodio por cada litro de agua). El propósito de este lavado es eliminar cualquier presencia de hongos o bacterias contaminantes que pudieran

llevar a enfermedades en el forraje. El tiempo de lavado de las semillas no debe ser inferior a 30 segundos ni exceder los 3 minutos. Una vez completado el lavado, se procede a enjuagar las semillas con agua limpia o desclorada. Posteriormente, después de un adecuado lavado, se realiza un proceso de remojo de las semillas en agua desclorada. Este proceso tiene como objetivo activar las semillas y promover su germinación. El remojo se extiende a lo largo de 24 horas, dividido en dos periodos de remojo de 12 horas cada uno, separados por un intervalo de 1 hora para escurrir y airear las semillas. Estos procesos de pre-germinación y germinación aseguran un inicio de crecimiento vigoroso del FVH, ya que se utilizan semillas previamente activadas en las bandejas de cultivo, lo que estimula significativamente la fase inicial de crecimiento. (FAO, 2001).

**1.5.1.2.3. Germinación.** En el proceso de germinación, las semillas se colocan en las bandejas de cultivo. Para establecer la densidad de siembra en la bandeja seleccionada, las semillas se distribuyen de manera uniforme sobre la superficie de la bandeja, de modo que se forme una capa de semillas con un espesor que varíe entre 1 y 1.5 centímetros. Otra manera de determinar la densidad de siembra de las semillas es considerando que las dosis ideales de siembra para las semillas de FVH oscilan entre 2.2 y 3.4  $kg/m^2$ . (FAO, 2001).

Se sugiere que las bandejas de cultivo se mantengan en condiciones de oscuridad con el fin de estimular la germinación del FVH. Aunque este procedimiento no es obligatorio, acelerará el proceso de germinación. Durante este período, es importante regar las semillas con agua desclorada, sin exceder la cantidad de 0.5  $L/m^2$ . Esta cantidad de riego se ajustará gradualmente a medida que las necesidades del cultivo vayan aumentando. El riego de las bandejas debe llevarse a cabo utilizando micro aspersores, nebulizadores o pulverizadores manuales. (FAO, 2001).

**1.5.1.2.4. Crecimiento.** Durante la fase de crecimiento, es esencial colocar las bandejas de cultivo con semillas germinadas en los estantes de desarrollo. En este entorno, es crucial asegurar una disposición adecuada de la iluminación, evitando la exposición directa a los rayos solares. Se recomienda utilizar la luz solar siempre que sea posible, pero en situaciones en las que se cultive en espacios cerrados sin acceso a luz natural se pueden utilizar tubos fluorescentes de manera estratégica durante un máximo de 12 a 15 horas para estimular la fotosíntesis de las plantas, lo que favorecerá la conversión efectiva de savia bruta en savia elaborada, un proceso fundamental para la producción de proteínas. Además, es fundamental

mantener la temperatura en un rango óptimo entre los 18 y 28 °C, para asegurar un crecimiento óptimo de las plantas. (FAO, 2001).

**1.5.1.2.5. Cosecha.** Este proceso se lleva a cabo cuando la plántula ha crecido hasta alcanzar una altura promedio de 25 cm. La duración de este desarrollo varía de 9 a 15 días, dependiendo de factores como la temperatura, las condiciones ambientales, el tipo de invernadero y la frecuencia de riego. Como resultado, se obtiene una densa red de raíces, ya que estas se entrelazan debido a la alta densidad de siembra. (FAO, 2001)

### **1.5.1.3. Ventajas del forraje verde hidropónico.**

Según FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2001) las ventajas son:

**1.5.1.3.1. Ahorro de agua.** En el sistema de producción de FVH las pérdidas de agua por evapotranspiración, escurrimiento superficial e infiltración son mínimas al comparar con las condiciones de producción convencional en especies forrajeras, cuyas eficiencias varían entre 270 a 635 litros de agua por kg de materia seca. Alternativamente, la producción de 1 kilo de FVH requiere de 2 a 3 litros de agua con un porcentaje de materia seca que oscila, dependiendo de la especie forrajera, entre un 12% a 18%. Esto se traduce en un consumo total de 15 a 20 litros de agua por kilogramo de materia seca obtenida en 14 días.

**1.5.1.3.2. Eficiencia en el uso del espacio.** El sistema de producción de FVH puede ser instalado en forma modular en la dimensión vertical lo que optimiza el uso del espacio útil.

**1.5.1.3.3. Eficiencia en el tiempo de producción.** La producción de FVH apto para alimentación animal tiene un ciclo de 10 a 12 días. En ciertos casos, por estrategia de manejo interno de los establecimientos, la cosecha se realiza a los 14 o 15 días, a pesar que el óptimo definido por varios estudios científicos, no puede extenderse más allá del día 12. Aproximadamente a partir de ese día se inicia un marcado descenso en el valor nutricional del FVH.

**1.5.1.3.4. Calidad del forraje para los animales.** El FVH es un succulento forraje verde de aproximadamente 20 a 30 cm de altura (dependiendo del período de crecimiento) y de plena aptitud comestible para nuestros animales. En general el grano contiene una energía digestible

algo superior (3.300 kcal/kg) que el FVH (3.200 kcal/kg) (Pérez, 1987). Sin embargo, los valores reportados de energía digestible en FVH son ampliamente variables.

**1.5.1.3.5. Inocuidad.** El FVH producido de acuerdo a las indicaciones, representa un forraje limpio e inocuo sin la presencia de hongos e insectos. Nos asegura la ingesta de un alimento conocido por su valor alimenticio y su calidad sanitaria. A través del uso del FVH los animales no comerán hierbas o pasturas indeseables que dificulten o perjudiquen los procesos de metabolismo y absorción.

#### **1.5.1.4. Desventajas del forraje verde hidropónico.**

**1.5.1.4.1. Desinformación y sobrevaloración de la tecnología.** Proyectos de FVH preconcebidos como “llave en mano” son vendidos a productores sin conocer exactamente las exigencias del sistema, la especie forrajera y sus variedades, su comportamiento productivo, plagas, enfermedades, requerimientos de nutrientes y de agua, óptimas condiciones de luz, temperatura, humedad ambiente, y niveles óptimos de concentración de CO<sub>2</sub>. Innumerables de estos proyectos han sufrido significativos fracasos por no haberse accedido a una capacitación previa que permita un correcto manejo del sistema (FAO, 2001).

**1.5.1.4.2. Costo de instalación elevado.** Morales (1987), citado en FAO (2001); manifiesta que una desventaja que presenta este sistema sería el elevado costo de implementación. Sin embargo, se ha demostrado (Sánchez, 1996, 1997) que, utilizando estructuras de invernáculos hortícolas comunes, se logran excelentes resultados. Alternativamente, productores agropecuarios brasileños han optado por la producción de FVH directamente colocado a piso sobre plástico negro y bajo micro túneles, con singular éxito. La práctica de esta metodología a piso y en túnel es quizás la más económica y accesible.

### **1.5.2. Automatización de procesos**

#### **1.5.2.1. Automatismos.**

Elementos que generan una serie de movimientos coordinados y repetitivos accionados principalmente por alguna fuente de energía conectada a estos elementos (Betancourt, 2022).

También se da a entender como una ciencia y/o técnica que abarca todo lo relacionado al automático, todo lo que posee control propio, disciplinas que intervienen en el desarrollo de los mismos y de nuevas formas de automatismos (Moreno, 2001).

### **1.5.2.2. Niveles de automatización.**

El grado de automatización de un proceso viene determinado fundamentalmente por factores de tipo económico y tecnológico, por ello podemos encontrar una gama muy amplia y variada, dependiendo de los objetivos a alcanzar. (Moreno, 2001).

*1.5.2.2.1. Nivel elemental.* El sistema se encuentra en un bucle abierto.

*1.5.2.2.2. Nivel intermedio.* El sistema se presenta con un control de pocas variables que sirven de comunicación con el entorno real.

*1.5.2.2.3. Tercer Nivel.* Aparece el control centralizado, multicapa, jerárquico y distributivo.

*1.5.2.2.4. Cuarto Nivel.* Surge la inteligencia artificial y el autoaprendizaje.

### **1.5.2.3. Sistemas de control.**

Los sistemas de control constan de conjuntos de componentes físicos que mantienen una cierta conexión entre sí, con el propósito de trabajar en conjunto de manera autónoma, sin requerir intervenciones externas, supervisando y orientando su funcionamiento en respuesta a las perturbaciones que puedan surgir durante su operación. Establecen un funcionamiento predefinido en el sistema y reducen la posibilidad de errores causados por influencias externas variables. Estos sistemas deben mantener su estabilidad frente a interferencias que intenten modificar el comportamiento normal o previamente establecido del sistema controlado y deben demostrar robustez y eficiencia en su ejecución (Parra, 2019).

*1.5.2.3.1. Lazo abierto.* El sistema de control en lazo abierto es el más básico, ya que no involucra una retroalimentación de las variables controladas hacia el controlador. En este sistema, se ejecuta un proceso sin utilizar la señal de salida para garantizar la estabilidad del sistema, lo que significa que no se compara la señal de salida con la señal de entrada (Parra, 2019).

*1.5.2.3.2. Lazo cerrado.* Lo que se requiere en un sistema de control en lazo abierto para mejorar su precisión y capacidad de adaptación es establecer una conexión o retroalimentación desde la salida hacia la entrada del sistema. Para lograr un control más preciso, es necesario tomar la señal controlada y compararla con la señal de referencia, además de enviar una señal

de corrección proporcional a la diferencia entre la entrada y la salida a través del sistema. Un sistema que incorpora una o más vías de retroalimentación, tal como se ha descrito anteriormente, se conoce como un sistema en lazo cerrado (Kuo, 1996).

### **1.5.3. Automatización en invernadero**

#### **1.5.3.1. Microcontrolador.**

Es un circuito integrado programable que contiene todos los componentes de una computadora. En la memoria se almacena el programa que gobierna el funcionamiento del mismo que, una vez programado y configurado, solo sirve para realizar la tarea asignada. Debido a su reducido tamaño, suele ir incorporado en el propio dispositivo que gobierna (Huamán, 2015).

#### **1.5.3.2. Sensores.**

Un sensor son elementos capaces de detectar y transformar magnitudes químicas o físicas en magnitudes eléctricas, las magnitudes que se pueden detectar pueden ser, humedad, temperatura, iluminación, aceleraciones, gases, entre otros (Delgado, 2021).

**1.5.3.2.1. Sensor de temperatura y humedad DHT.** El DHT es un sensor de temperatura y humedad. Utiliza un sensor capacitivo de humedad y un termistor para medir el aire circundante, y muestra los datos mediante una señal digital en el pin de datos. Es simple de usar, pero requiere sincronización para tomar datos (Camues, 2017).

#### **1.5.3.3. Sistema de riego automatizado.**

El sistema de riego automatizado se utiliza para mejorar la eficiencia en el uso del agua en la agricultura al emplear sensores que evalúan la humedad y temperatura en la zona de raíces de las plantas. La ventaja de activar el riego cuando se detecta una temperatura elevada o falta de humedad es que previene que los cultivos sufran estrés, garantizando así una cosecha óptima. En este sistema, se emplea la técnica de riego por aspersión, y un controlador se encarga de supervisar y gestionar el proceso (Llugsha & Moreno, 2021).

#### **1.5.3.4. Iluminación LED.**

La sigla LED corresponde a "Light Emitting Diode" en inglés, que en español se traduce como "diodo emisor de luz". Este dispositivo semiconductor emite luz con una longitud de onda muy



precisa y definida cuando se polariza en dirección directa, permitiendo que fluya una corriente eléctrica a través de sus extremos. A pesar de que la lente del encapsulado del LED puede presentar coloración, esta característica es puramente estética o de clasificación y no tiene ningún impacto en el color de la luz que emite (Fraile & Gago, 2012).

En el contexto del cultivo de forraje hidropónico, la implementación de luces LED son usadas, a menudo, como fuente de alimentación artificial. El tiempo de exposición luminosa generalmente varía entre 12 y 18 horas al día. Comparadas con los sistemas de iluminación tradicionales, los LEDs representan un avance importante gracias a sus múltiples ventajas. En particular, la combinación de luces rojas y azules se ha identificado como la más efectiva para favorecer el proceso de fotosíntesis. (Ahamed et al. 2023).

#### **1.5.3.5. Internet of things (IoT).**

El Internet de las cosas (IoT) se refiere a una red de objetos físicos, como dispositivos, instrumentos, vehículos y edificios, que están equipados con componentes electrónicos, circuitos, software, sensores y conectividad a redes. Esto les permite recopilar y compartir datos entre sí. El IoT permite la detección y el control remoto de estos objetos a través de las redes existentes, lo que abre la puerta a una mayor integración del mundo físico en sistemas informáticos, lo que conlleva mejoras en la eficiencia y precisión (Gokhale & Bhat, 2018). La implementación de IoT en este proyecto será únicamente para monitorear algunos datos obtenidos por los sensores a implementar en el invernadero.

Entre las características fundamentales de IoT se encuentran:

1. Interconectividad, es la característica que permite la comunicación con la infraestructura mundial.
2. Servicios relacionados con objetos, se trata de suministrar servicios vinculados con objetos de tipos físicos y virtuales, como medidas de protección a la privacidad.
3. Heterogeneidad, es la interacción entre los dispositivos en diferentes tipos de entornos, así como de ambientes (Llugsha & Moreno, 2021).

## **1.6. Metodología**

### ***1.6.1. Tipo de investigación***

El tipo de investigación de este proyecto es descriptiva ya que se centra en describir las características de un fenómeno. En este caso, implica la descripción detallada de los componentes del sistema automatizado, los métodos de cultivo hidropónico y los resultados esperados.

Este proyecto adopta una metodología cuantitativa, dado que los resultados se presentan en forma de cantidades o porcentajes. Asimismo, este estudio sigue un enfoque experimental, ya que implica la utilización de sensores, actuadores, microprocesadores y software de control.

### ***1.6.2. Línea de investigación***

La investigación está enfocada en la optimización y desarrollo tecnológico, puesto que el propósito de este proyecto en el campo de la agricultura y la ingeniería es el análisis, diseño y acondicionamiento de un sistema automatizado para FVH. Para ello, se tiene en cuenta la selección de métodos de control, tipos de sensores, actuadores para el cultivo hidropónico.

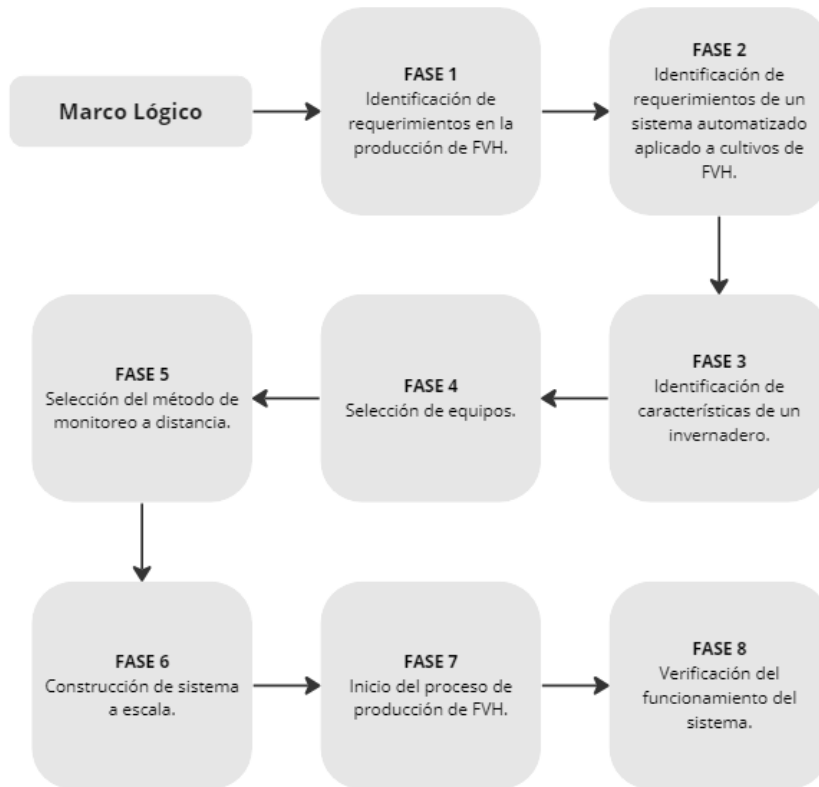
### ***1.6.3. Hipótesis de investigación***

Un sistema automatizado implementado en invernadero para la producción de forraje verde hidropónico permite mejorar el proceso de producción del forraje.

### ***1.6.4. Descripción metodológica***

En un principio se plantea una estructura donde se describe la metodología propuesta para el desarrollo del sistema que permite identificar, implementar y verificar los requerimientos necesarios para el sistema automatizado de un cultivo de forraje verde hidropónico para posteriormente validar su funcionamiento. A continuación, en la figura 6 se observa un diagrama con la descripción metodológica por fases.

**Figura 6**  
*Descripción metodológica*



Las fases 1,2,3 se enfocaron en la investigación de documentos y estudios relacionados con el tema tratado en este proyecto. En la fase 1 se identifica los requerimientos de producción, como las condiciones ideales de agua, luz y temperatura necesarias para el crecimiento del forraje. En la fase 2, se analiza cuáles son las variables que deben controlarse y los actuadores necesarios para su control. En la fase 3 se determina qué tipo de invernadero es el más adecuado de acuerdo a sus características.

En la fase 4, se selecciona los equipos y componentes electrónicos para el sistema automatizado, como sensores, actuadores y el microcontrolador que gestionará todos los elementos.

Durante la fase 5 se elige el método de monitoreo a distancia mediante plataformas IoT, con el objetivo de seleccionar una opción que permita registrar y visualizar las variables para su posterior análisis.

Las fases 6, 7 y 8 son las fases finales donde en la fase 6, se diseña un invernadero y un anaquel a escala en software CAD, también entra el diseño de todo el sistema electrónico del

sistema con los respectivos componentes seleccionados. Luego, se procede a iniciar la construcción e implementación de acuerdo a los diseños planteados. La fase 7 consiste en dar inicio al proceso de producción de forraje, el sistema automatizado se utiliza para mantener las condiciones controladas durante todo el ciclo del cultivo. Por último, en la fase 8 se verifica el funcionamiento del sistema diseñado, evaluando su capacidad para mantener las condiciones ideales de forma continua y respondiendo adecuadamente a las variaciones ambientales. Adicionalmente, se hace una comparación entre un cultivo expuesto a condiciones naturales y otro expuesto a las condiciones del invernadero, realizando un análisis de los datos obtenidos de estos dos forrajes. Con el objetivo de complementar de una manera mejor el desarrollo de las fases, se dispone a realizar unas actividades conforme a los objetivos planteados al inicio de este proyecto.

#### 1.6.4.1. Actividades Objetivo 1

#### Figura 7

##### Actividades objetivo 1.

1.1	Investigar cuales son las semillas adecuadas para cultivo hidropónico.	Funcionamiento de un cultivo de forraje verde hidropónico. Estructura de un cultivo de forraje verde (Partes - Componentes). Comparativo entre tipos de forrajes verdes (Ventajas y desventajas). Semillas de FVH (Tratamiento, tipos de semillas, características).
1.2	Investigar el proceso de preparación previo a la siembra.	Técnicas de preparación de siembra (Rendimientos de producción, fertilización, tiempo). Cálculo de proyección de siembra.
1.3	Consultar cuales son las condiciones ambientales óptimas para una correcta germinación.	Condiciones de germinación y crecimiento de la planta (Horas luz, agua, temperatura).
1.4	Investigar los diferentes métodos de automatización aplicables a cultivos hidropónicos.	Tipos de automatización (Componentes que se utilizan en los invernaderos). Cuadro de componentes electrónicos. Diagrama de bloques de un funcionamiento.
1.5	Consultar cuales son los equipos adecuados para el sistema.	Identificación y la proyección del invernadero. Cálculos de componentes (Mecánico, eléctrico, hídrico, sustratos).
1.6	Investigar métodos de monitoreo a distancia basados en IoT.	Identificar componentes (Cuadro de métodos). Matriz de decisión (Selección del mejor método a implementar). Funcionamiento y programación del método elegido.
1.7	Definir dimensiones del invernadero a escala.	Diseño del invernadero a escala (Planos, modelado). Análisis estructural del sistema. Renderizado y simulación. Elección de materiales (Listado de elementos para el invernadero).
1.8	Establecer los materiales para construcción de invernadero.	Compra de materiales (Presupuesto). Construcción (Desarrollo del invernadero).
1.9	Establecer componentes internos para el invernadero.	Adquisición de los materiales electrónicos.

El primer objetivo implica la ejecución de una serie de actividades diseñadas para lograr un dimensionamiento preciso de invernadero, estanterías y sistemas de riego. Esto permitirá determinar la cantidad exacta de componentes de estructura, tubería y costos necesarios.

#### 1.6.4.2. Actividades Objetivo 2

La consecución de este objetivo implica la elaboración y diseño detallado de los sistemas electrónicos fundamentales para el proyecto. En la siguiente fase de desarrollo, se avanzará en la selección de los componentes electrónicos, identificando y conectando cada componente específico, incluyendo sensores, actuadores, microcontroladores y otras partes críticas del sistema. A continuación, se muestran las actividades del objetivo 2.

#### Figura 8

##### Actividades objetivo 2

2.1	Selección de la tarjeta de control.	Diseño, simulación, programación y construcción.
2.2	Selección de actuadores.	
2.3	Selección de sensores.	Verificar el funcionamiento.
2.4	Crear aplicación o usar una ya existente para monitorear y controlar las variables.	Interfaz del sistema remoto.

#### 1.6.4.3. Actividades Objetivo 3

En el tercer objetivo, se llevó a cabo la implementación del sistema diseñado a una escala más asequible, mediante la construcción de un anaquel y un invernadero a escala. Este paso permitió validar el funcionamiento del sistema en un entorno controlado a menor escala. A continuación, se muestran las actividades del objetivo 3.

#### Figura 9

##### Actividades objetivo 3

3.1	Implementar el sistema de control en invernadero.	Sistema implementado en invernadero a escala.
3.2	Seguir el proceso de germinación.	Probar el funcionamiento a nivel piloto (Escala). Dos pruebas (Forraje sin sistema y Forraje con sistema).
3.3	Verificar si el sistema diseñado cumple con la función de entregar un forraje de calidad.	Extraer datos y análisis estadístico.

Durante esta fase, se recopiló datos cruciales, como la temperatura, humedad relativa y peso del forraje, los cuales fueron monitoreados de manera remota a través de ThingSpeak. Esta

recopilación de datos permitió un análisis detallado del rendimiento del sistema, contribuyendo así a la optimización continua y a la obtención de resultados más precisos en futuras implementaciones a mayor escala. Adicionalmente, se realiza una validación comparando un cultivo expuesto a condiciones naturales frente a otro expuesto a condiciones del sistema en invernadero.

### ***1.6.5. Validez de la investigación***

#### **1.6.5.1. Validación interna.**

La validación se realizará con un invernadero a escala y un anaquel a escala de dos niveles diseñado para 4 bandejas. La validación interna del proyecto se realizará con la verificación de funcionamiento de todo el sistema desarrollado. Adicional a esto, mediante la plataforma ThingSpeak podremos monitorear las variables de temperatura, humedad y el peso de forraje.

En el marco de cada etapa del proceso de cultivo de forraje verde hidropónico, se llevará a cabo una recopilación de datos fundamentales para evaluar el rendimiento del sistema. Estos datos incluirán mediciones de la temperatura y humedad ambiente, así como la altura del cultivo, registrada a medida que progresa a lo largo de los días. Se implementará un protocolo de pesaje regular del forraje en intervalos específicos, permitiendo un seguimiento detallado de su desarrollo. Estos conjuntos de datos se organizarán de manera sistemática en tablas, proporcionando una estructura analítica que posibilitará un análisis exhaustivo de la evolución del cultivo a lo largo del tiempo. Este enfoque detallado no solo respaldará la toma de decisiones operativas, sino que también permitirá la identificación de patrones y tendencias cruciales para la optimización continua del sistema automatizado de cultivo hidropónico.

## 2. Resultados

### 2.1. Resultados objetivo 1.

#### 2.1.1. Selección de tipo de invernadero

Para la elección del tipo de invernadero a escala a diseñar se tendrán en cuenta las ventajas y desventajas, como se ve en la tabla 4.

**Tabla 4**

*Tabla comparativa según el tipo de invernadero*

<b>Tipo de invernadero</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Tipo capilla	Fácil construcción y fácil conservación. Fácil implementación de ventilación. Permite la evacuación del agua lluvia. Permite ventilación vertical.	Si los ángulos de inclinación de los planos del techo son inferiores a 25 grados, esto puede dificultar la adecuada evacuación del agua de lluvia.
Tipo túnel	Buena ventilación. Alta resistencia al viento. Buen control térmico.	Solamente recomendado en cultivos de bajo a mediano porte. Espacio limitado para ciertos cultivos.
Invernadero plano	Construcción económica.	Mala evacuación de agua lluvia. Mala ventilación.

Considerando la información proporcionada en la tabla 4, se opta por diseñar un invernadero tipo capilla de techo curvo debido a su capacidad para brindar un control climático más efectivo, su versatilidad en cuanto a los materiales de construcción y su diseño geométrico que permite una utilización más eficiente del espacio de cultivo para el FVH.

#### 2.1.1.1. Prediseño del invernadero.

Para el prediseño del invernadero tipo capilla de techo curvo se tuvo en cuenta la elección del tipo de invernadero por las ventajas expuestas en la tabla 4, el invernadero contará con el anaquel, bandejas, sistema de riego y demás sistemas. Cuenta con 6 tubos verticales de 4

pulgadas, en su arco cuenta con tubos de 2 pulgadas y en sus laterales se usa tubos cuadrados de 40 mm.

El invernadero cuenta con las siguientes medidas:

Alto: 3 metros

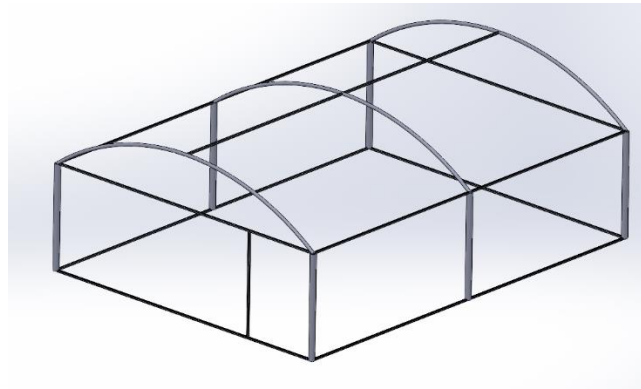
Ancho: 6 metros

Largo: 8 metros

A continuación, en la figura 10 se puede ver el prediseño de la estructura metálica realizada en el software Solidworks.

### **Figura 10**

*Estructura metálica del invernadero.*



#### **2.1.2. Selección de bandejas**

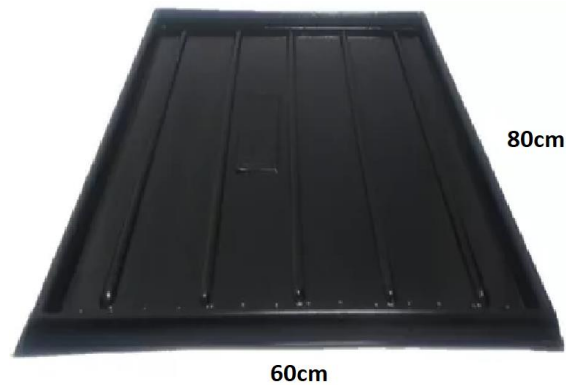
El cultivo de FVH debe llevarse a cabo en superficies planas con una suave pendiente para permitir el drenaje del agua y evitar la formación de estancamientos que puedan propiciar el desarrollo de hongos. En la mayoría de los casos, los cultivos de FVH se realizan sobre bandejas de plástico, aunque también es posible obtener resultados satisfactorios utilizando estructuras de concreto, aunque esto puede aumentar significativamente los costos de implementación.

En este proyecto de diseño de un sistema automático para el cultivo de FVH, se optará por utilizar bandejas de cultivo disponibles en el mercado. Al seleccionar estas bandejas, los principales factores a considerar son el material de fabricación, el tamaño y su disponibilidad en el mercado. En el mercado, las bandejas más comunes que se encuentran son las fabricadas de poliestireno termoformado, diseñadas para soportar una carga de hasta 40 kg de FVH, como se ilustra en la figura 11.



**Figura 11**

*Bandeja seleccionada para cultivo FVH.*



Para calcular la densidad de siembra de las semillas, generalmente se consideran factores como el tamaño de las bandejas, la distancia entre las plantas, la profundidad de siembra y la cantidad de semillas por sitio de siembra. La densidad de siembra es importante para garantizar un adecuado espacio para el crecimiento de las plantas y optimizar el uso de recursos.

- Rendimiento de FVH: 12 a 18 kg por cada kg de semilla.
- Densidad de siembra recomendada: 2.2 kg/m<sup>2</sup> a 3.4 kg/m<sup>2</sup>

Se calcula la densidad de la siguiente forma:

Cálculo del área de cultivo por bandeja ( $A_{bandeja}$ ):

$$A_{bandeja} = L * A$$

$$A_{bandeja} = 0.8m * 0.6m = 0.48m^2$$

Densidad de siembra por bandeja:

$$D_{min} = \left(\frac{2.2 \text{ kg}}{1m^2}\right) * 0.48m^2 = 1.056 \text{ kg por bandeja}$$

$$D_{max} = \left(\frac{3.4 \text{ kg}}{1m^2}\right) * 0.48m^2 = 1.632 \text{ kg por bandeja}$$

Se determinó la densidad de siembra, la cual se establece en relación con la densidad de siembra, que oscila entre 2.2 y 3.4 kg/m<sup>2</sup> por bandeja, de acuerdo con las recomendaciones de la FAO para el sistema de producción de FVH en bandejas.

Rendimiento esperado con densidades de siembra de 1.056 kg de semilla por bandeja:

$$R_{min} = \left( \frac{12 \text{ kg forraje}}{1 \text{ kg semilla}} \right) * 1.056 \text{ kg semilla por bandeja} = 12.67 \text{ kg}$$

$$R_{min} = 12.67 \text{ kg forraje por bandeja}$$

$$R_{max} = \left( \frac{18 \text{ kg forraje}}{1 \text{ kg semilla}} \right) * 1.056 \text{ kg semilla por bandeja} = 19.008 \text{ kg}$$

$$R_{max} = 19.008 \text{ kg forraje por bandeja}$$

Rendimiento esperado con densidades de siembra de 1.632 kg de semilla por bandeja:

$$R_{min} = \left( \frac{12 \text{ kg forraje}}{1 \text{ kg semilla}} \right) * 1.632 \text{ kg semilla por bandeja} = 19.58 \text{ kg}$$

$$R_{min} = 19.58 \text{ kg forraje por bandeja}$$

$$R_{max} = \left( \frac{18 \text{ kg forraje}}{1 \text{ kg semilla}} \right) * 1.632 \text{ kg semilla por bandeja} = 29.37 \text{ kg}$$

$$R_{max} = 29.37 \text{ kg forraje por bandeja}$$

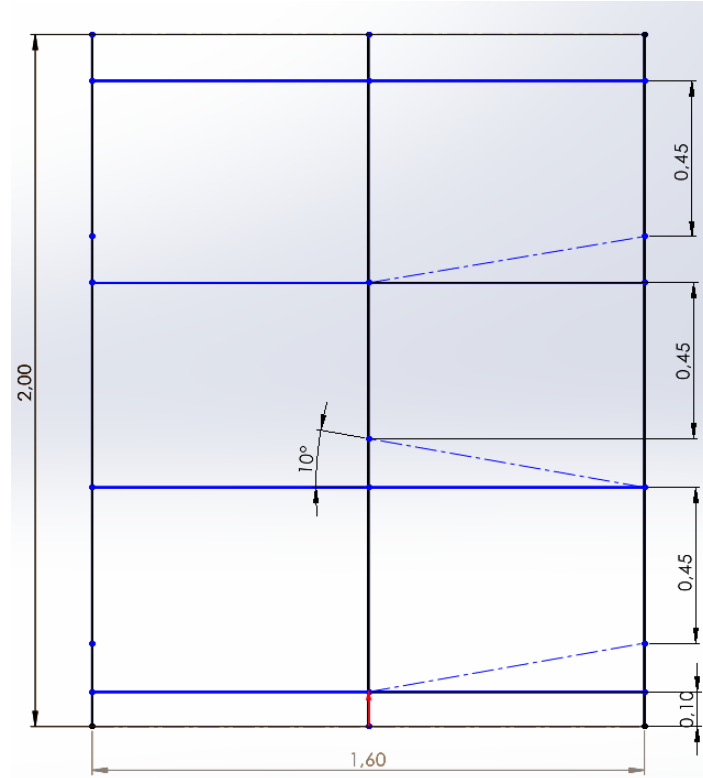
De acuerdo a los cálculos previos, se proyecta que el rendimiento por bandeja oscile entre 12.67 kg y 29.37 kg, considerando la densidad de siembra y el adecuado cuidado del cultivo. Con el objetivo de alcanzar los resultados óptimos en el diseño, se ha optado por seleccionar una densidad de siembra de 1.632 kg de semillas por bandeja, anticipando un rendimiento esperado de 29.37 kg de forraje por cada bandeja.

### **2.1.3. Diseño de anaquel**

El anaquel fue diseñado en el software Solidworks para albergar 36 bandejas, consta de 3 niveles con 12 bandejas por cada uno. En los tubos verticales se utilizó tubería cuadrada en aluminio 30x30x2.6 (mm) y en los tubos horizontales se utilizó tubería cuadrada en acero 20x20x2 (mm), en el espacio donde se ubican las bandejas se utiliza hierro angular 25x25x2 (mm) esto con el fin de que las bandejas se mantengan fijas y no corran el riesgo de caer. La distancia entre bandejas debe estar entre los 40 y 45 cm para que la apertura del cono del aspersor sea aprovechada al máximo, se diseñó de tal forma que las bandejas tuvieran una inclinación de 10 grados de tal forma que permita una circulación de agua y nutrientes óptima.

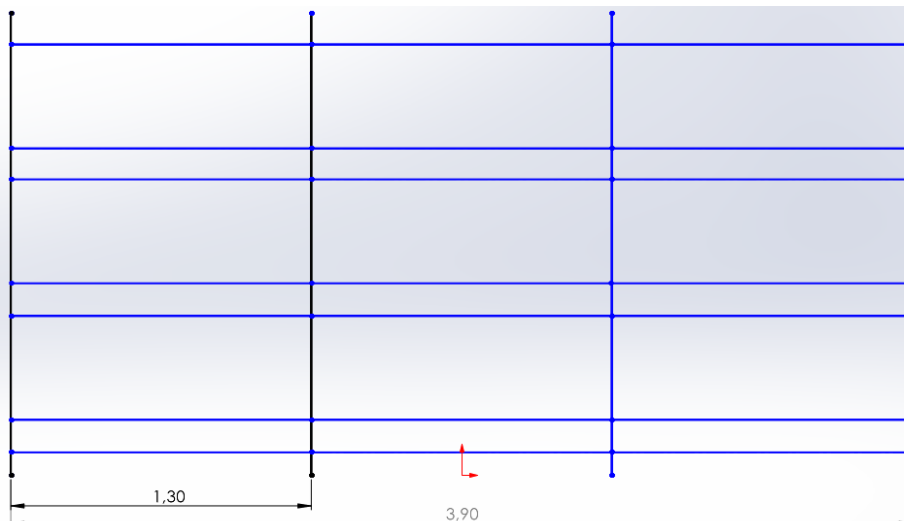
A continuación, en la figura 12 se observa una vista lateral del croquis con el número de niveles con el que cuenta el anaquel y sus respectivas medidas.

**Figura 12**  
*Vista lateral de croquis del anaquel*



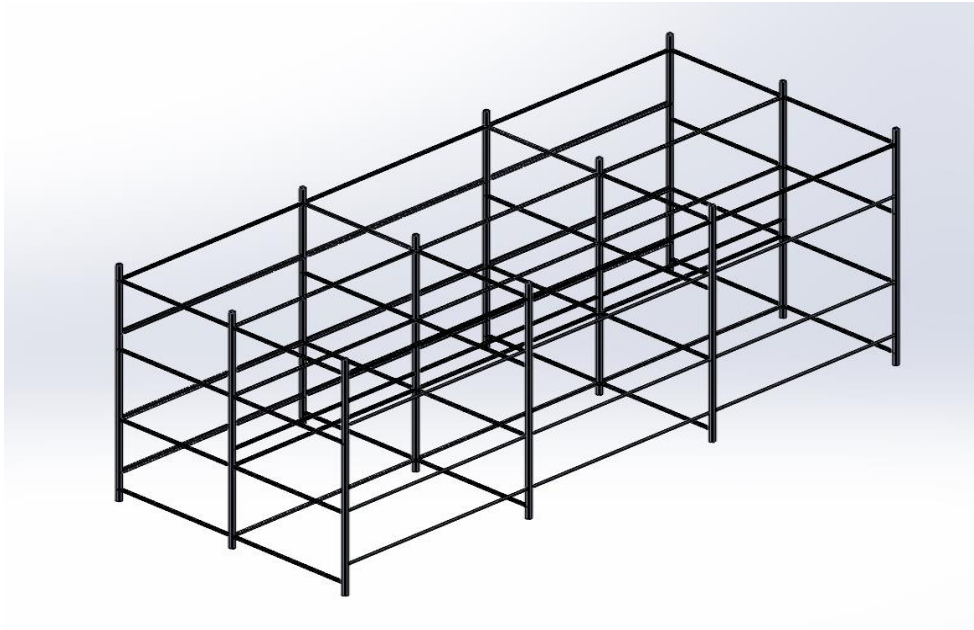
En la figura 13 se observa una vista frontal del croquis donde se observa el largo de la estructura, cada sección horizontal de la estructura tiene capacidad para 2 bandejas, como resultado se tendría 12 bandejas por nivel (6 por cada lado).

**Figura 13**  
*Vista frontal de croquis del anaquel*



Una vez establecidas las dimensiones y realizado el croquis se procede a generar la estructura con los materiales mencionados anteriormente. A continuación, en la figura 14 se puede ver el diseño final del anaquel.

**Figura 14**  
*Diseño del anaquel*



### 2.1.3.1. Análisis estático de la estructura en Solidworks.

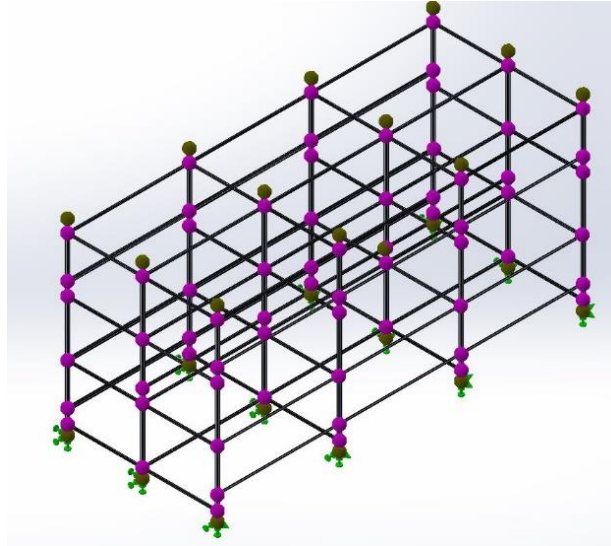
El análisis estático de la estructura se hizo mediante la herramienta “asesor de estudios” en Solidworks. Primeramente, se eligió el material para simular el anaquel, fue seleccionado el aluminio en su aleación 1060 el cual cuenta con las siguientes características mostradas en la figura 15.

**Figura 15**  
*Características del material elegido*

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	6.9e+10	N/m <sup>2</sup>
Coefficiente de Poisson	0.33	N/D
Módulo cortante	2.7e+10	N/m <sup>2</sup>
Densidad de masa	2700	kg/m <sup>3</sup>
Límite de tracción	68935600	N/m <sup>2</sup>
Límite de compresión		N/m <sup>2</sup>
Límite elástico	27574200	N/m <sup>2</sup>
Coefficiente de expansión térmica	2.4e-05	/K
Conductividad térmica	200	W/(m·K)
Calor específico	900	J/(kg·K)
Cociente de amortiguamiento del material		N/D

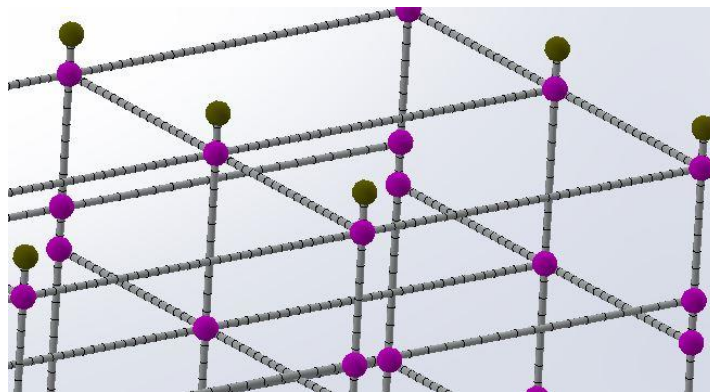
Se eligió este material debido a que es el más fácil de encontrar en el mercado y el menos costoso. Fue necesario aplicar sujeciones fijas a la estructura en la parte de abajo, en la figura 16 se pueden distinguir las flechas de verde las cuales representan estas sujeciones.

**Figura 16**  
*Vista del anaquel con sujeciones*



Se procede a crear una malla en Solidworks para que permita realizar un análisis estático por elementos finitos, lo que permite dividir la geometría del modelo en elementos discretos, facilitando cálculos numéricos precisos de tensiones y deformaciones bajo cargas externas. A continuación, en la figura 17 se puede ver este proceso.

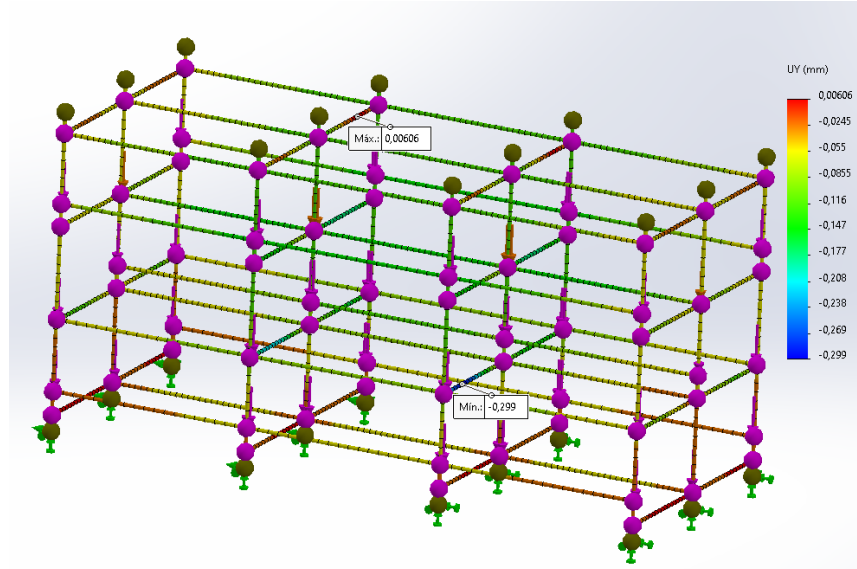
**Figura 17**  
*Vista cercana de la malla*



Una vez se tiene esto se procede a aplicar las fuerzas donde se tuvo en cuenta el peso del forraje cuando este haya alcanzado su punto de cosecha se estableció que, de acuerdo al área de la bandeja y la cantidad de semilla sembrada en la misma, el peso final del forraje puede estar alrededor de unos 25 kg. Teniendo en cuenta esto, se distribuye las fuerzas por los tubos

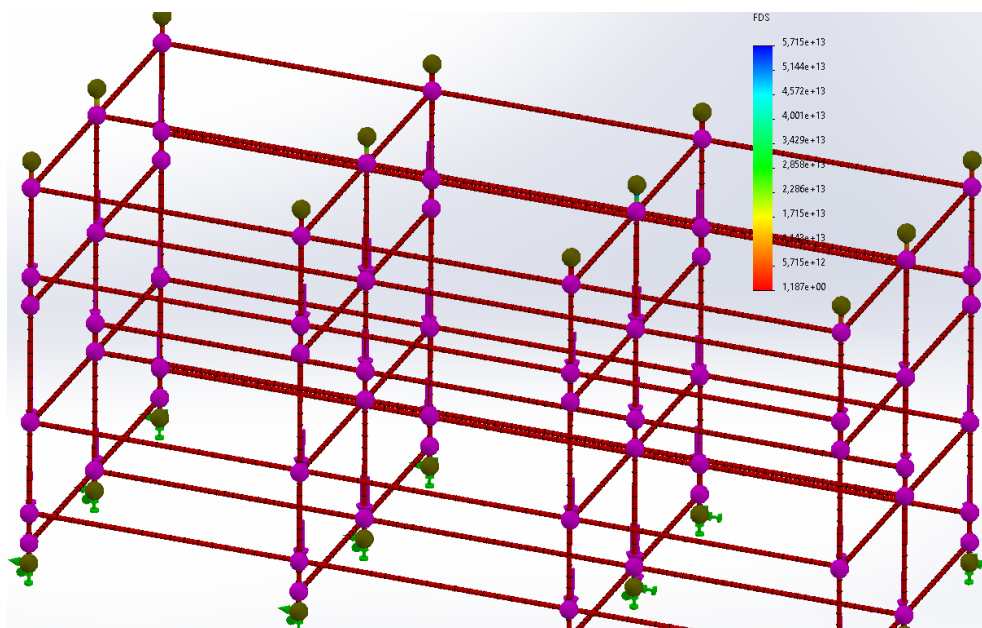
donde se colocan las bandejas. En la figura 18 se muestra la deflexión en el eje Y del anaquel donde se pueden ver sus puntos mínimos y máximos.

**Figura 18**  
*Deflexión eje Y*



En la simulación se pudo apreciar que no sufría un desplazamiento significativo ya que su máximo desplazamiento en el Y fue de  $0.006 \text{ mm}$  y su mínimo fue de  $-0.2 \text{ mm}$ . Se realizó también un análisis de factor de seguridad (FDS) para ver si la estructura colapsaba, se puede ver a continuación en la figura 19 y en la figura 20 que la estructura tiene un FDS de 1.2 lo que expone que la estructura logra aguantar la carga establecida.

**Figura 19**  
*Vista anaquel con resultados FDS*



## Figura 20

### Resultados FDS

Nombre del modelo: Anaquel  
Nombre de estudio: Análisis estático 1(-Predeterminado <Como mecanizada>-)  
Tipo de resultado: Factor de seguridad Factor de seguridad1  
Criterio: Automático  
Distribución de factor de seguridad: FDS mín = 1,2

#### 2.1.4. Selección y dimensionamiento de micro aspersores

Generalmente, se aconseja emplear microaspersión como el método preferido para el riego de plantaciones de forraje verde hidropónico (FVH). Diversas investigaciones y experimentos han demostrado que este sistema produce los resultados más favorables. En cambio, no se aconseja el uso de riegos excesivamente abundantes o técnicas de inundación, ya que podrían ocasionar problemas como la aparición de hongos o el deterioro del tallo y las semillas.

La elección de los microaspersores dependerá de la cantidad de riego requerida, la cual debe basarse en la cantidad recomendada para las plantaciones del FVH. De acuerdo con (FAO, 2001) la necesidad máxima de consumo por unidad de superficie debe oscilar entre 0.9 y 1.5 l/m<sup>2</sup> al día. Para realizar el cálculo de la necesidad de riego máximo de consumo (NA<sub>max</sub>) se tiene en cuenta el área de las bandejas seleccionadas anteriormente (0.48 m<sup>2</sup>) y la cantidad de riego máximo (1.5 l/m<sup>2</sup> día). Una vez se tienen estos datos se procede a calcular NA<sub>max</sub>:

$$NA_{max} = 0.48 \text{ m}^2 * \left( \frac{1.5 \text{ l}}{1 \text{ m}^2} \right)$$
$$NA_{max} = 0.72 \text{ l/día por bandeja}$$

Juárez et al. (2013), exponen que la cantidad de agua para el riego debe ser distribuida a lo largo del día en múltiples aplicaciones. Es aconsejable dividir la cantidad diaria de riego en 6 o 9 intervalos durante el día, y cada uno de estos periodos debería tener una duración inferior a 2 minutos. Para este proyecto se eligió una cantidad de 6 riegos por día. A continuación, se calculará el volumen de riego (VR) teniendo en cuenta el NA<sub>max</sub> y la cantidad de riegos por día:

$$VR = \frac{0.72 \text{ l/día}}{6 \text{ riegos por día}} = 0.12 \text{ l por bandeja}$$

Dado que se busca evitar encharcamientos que puedan propiciar el desarrollo de hongos, se determina la cantidad de agua requerida para cada bandeja de cultivo con riegos de 1 minuto.

Por lo tanto, se calcula la necesidad máxima de consumo por aspersores ( $NA_{aspersores}$ ) teniendo en cuenta el tiempo de los riegos:

$$NA_{aspersores} = \frac{0.12 \text{ l}}{1 \text{ min}} = 0.12 \text{ l/minuto} = 7.19 \text{ l/h}$$

De acuerdo con lo anterior el micro aspersor debe tener un caudal de trabajo cercano a 0.12 *l/min* o 7.1988 *l/h*. El microaspersor o nebulizador que se elija debe ser de un tipo comúnmente disponible en el mercado. Por lo tanto, es recomendable optar por un aspersor de uso comercial. Se observó que los microaspersores más adecuados para el sistema de cultivo, y que se pueden adquirir fácilmente en el mercado, funcionan con un flujo de 40 *l/h*. Por lo tanto, se opta por utilizar un microaspersor para cada par de bandejas de forraje. Se escoge un microaspersor de la empresa AGROCOLOMBIA SAS, una empresa que se dedica a la importación y distribución de diversos sistemas, como el riego por goteo y aspersión, mangueras para riego, equipamiento para minería y acueductos, electro-bombas, motobombas y bombas estacionarias, así como medidores y macro medidores de agua. A continuación, en la figura 21 se observa el micro aspersor seleccionado.

### **Figura 21**

*Nebulizador/Micro aspersor para FVH*



Fuente: AGROCOLOMBIA SAS, s.f

Este micro aspersor tiene las siguientes características:

- Rosca de 1/8
- Presión de trabajo 1.5 - 3 bar
- Distancia riego 1.2-2.2 metros diámetro.
- Caudal 40- 120 *l/h*

Se establece que se debe utilizar un aspersor para dos bandejas, por lo tanto, se utilizarán 18 aspersores para 36 bandejas de cultivo de forraje. Debido a que el caudal es mucho mayor al



necesario se opta por bajar el tiempo de riego a 1 minuto. Según múltiples manuales sobre cultivos de FVH el tiempo entre riego y riego sería cada 2 horas.

### 2.1.5. Selección tanque de almacenamiento

Es importante tener en cuenta que la cantidad de agua requerida para el crecimiento del FVH aumentará a medida que las plantas se desarrollen. Siguiendo las recomendaciones de la Organización de las Naciones Unidas (FAO), la demanda diaria de agua para el FVH oscila entre 0.9 y 1.5  $l/m^2$ . Durante la etapa de germinación, las necesidades de riego son más bajas (0.9  $l/m^2$ ), pero gradualmente aumentarán hasta alcanzar los valores máximos de riego (1.5  $l/m^2$ ). El tanque se elige teniendo en cuenta tanto los requisitos máximos como los mínimos de riego. Se procede a calcular la necesidad máxima y mínima de consumo ( $NA_{max}$ ) y ( $NA_{min}$ ) teniendo en cuenta el área de las bandejas (0.48  $m^2$ ) y la cantidad de riego máxima (1.5  $l/m^2$ ) y mínima (0.9  $l/m^2$ ).

$$NA_{max} = 0.48m^2 * 1.5 l/m^2 = 0.72 l \text{ por día}$$

$$NA_{min} = 0.48m^2 * 0.9 l/m^2 = 0.432 l \text{ por día}$$

Para determinar la cantidad máxima de agua necesaria para el riego de las plantaciones de FVH, se ha desarrollado un plan de riego siguiendo los resultados obtenidos del  $NA_{max}$  y  $NA_{min}$ . Este plan tiene en cuenta la demanda de agua de las plantas en función de los días de crecimiento, además de considerar el flujo estimado por bandeja.

**Tabla 5**

*Plan de riego por bandeja*

Día	Riego ( $l/día$ )
1 a 5 días	0.432 l
5 a 10 días	0.582 l
10 a 15 días	0.72 l

Teniendo en cuenta la información de la tabla 5 se dispone a calcular la necesidad de riego por bandeja ( $NR_{Bandeja}$ ).

$$NR_{Bandeja} = (5 * 0.432) + (5 * 0.582) + (5 * 0.72)$$

$$NR_{Bandeja} = 8.61 l$$

Con lo anterior se puede observar que la necesidad de riego de una bandeja de forraje es de 8.61 l en un ciclo de 15 días. Para calcular la necesidad del cultivo se necesita multiplicar la necesidad de riego de una bandeja por la cantidad de bandejas a implementar en el anaquel.

$$NR_{Cultivo} = 8.61 \text{ l} * 36 \text{ bandejas} = 309.96 \text{ l}$$

Para cumplir con la necesidad del cultivo de 309.96 l se consultó en la empresa Colempaques. A continuación, se mostrará el catálogo con tanques disponibles.

**Figura 22**  
Catálogo tanques para almacenamiento de agua



Fuente: Colempaques, s.f

De acuerdo a la figura 22 se selecciona el tanque de 500 l ya que es el más adecuado para implementar dentro del sistema de cultivo. Además, tendríamos una reserva de casi 200 l para evitar cualquier contratiempo.

### 2.1.6. Dimensionamiento del sistema de riego

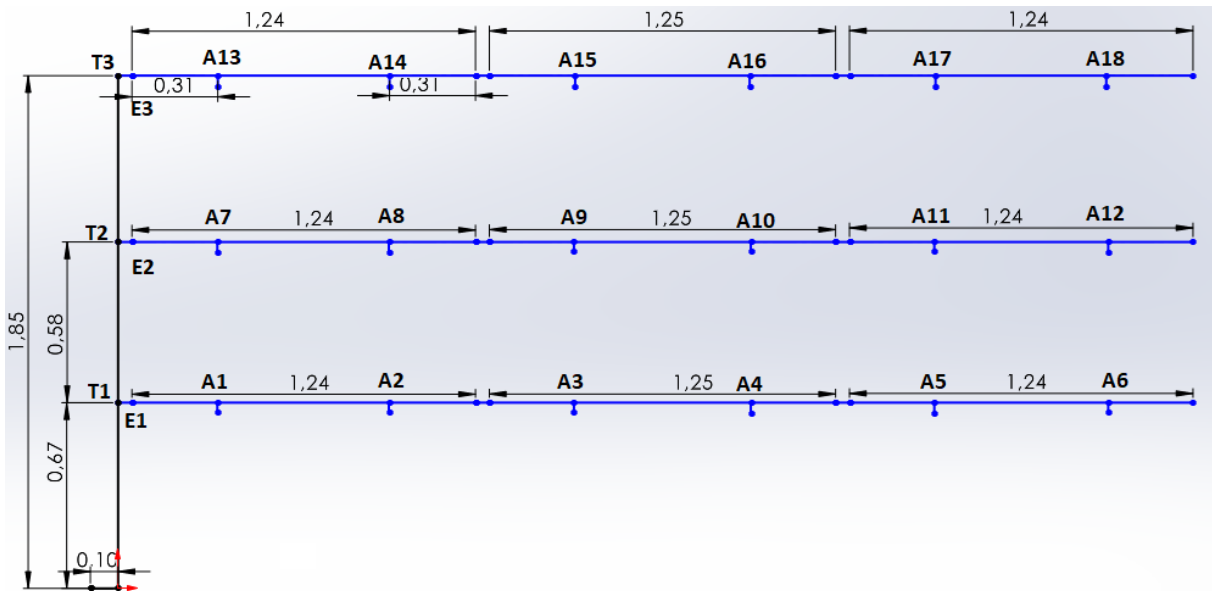
Para determinar la potencia necesaria para el sistema automatizado de riego, es esencial considerar tanto el caudal de trabajo como la distancia máxima que debe ser cubierta. Para calcular el caudal de trabajo ( $Q_{Trabajo}$ ) requerido de la bomba a seleccionar, se deben tener en cuenta tanto el caudal de trabajo de los aspersores (40 l/h) en sí como la cantidad de aspersores (18) que se han elegido.

$$Q_{Trabajo} = 40 \text{ l/h} * 18 \text{ aspersores}$$

$$Q_{Trabajo} = 720 \text{ l/h} = 12 \text{ l/min}$$

Se procede a calcular la distancia de toda la tubería del sistema de riego. A continuación, en la figura 23 se puede ver un croquis con las medidas de las tuberías junto con sus accesorios.

**Figura 23**  
*Croquis de tuberías*



Se puede observar que se usan 3 electroválvulas que se nombra como **E1** hasta **E3**, los aspersores que van desde **A1** hasta **A18** y las tee que van desde **T1** hasta **T3**. Teniendo en cuenta el plano se calcula la distancia total aproximada del sistema que es de 14,31 m. Además, se estableció que las tuberías deberán ser de material PVC de 1 pulgada.

### 2.1.7. Selección bomba hidráulica

Teniendo en cuenta que la distancia y el caudal requerido para el sistema de riego es bajo, se dispone a buscar en el mercado una bomba hidráulica de  $\frac{1}{2}$  hp. A continuación, en la figura 24, se puede observar la bomba seleccionada.

**Figura 24**  
*Bomba seleccionada*



Fuente: AGROCOLOMBIA SAS, s.f

A continuación, en la tabla 6 se muestran las principales características de la bomba hidráulica.

**Tabla 6**  
*Características bomba hidráulica*

<b>Marca</b>	RAIN
<b>Modelo</b>	QB-60
<b>Potencia</b>	0.5 hp
<b>Voltaje</b>	110/220
<b>Altura máxima de elevación</b>	25 m
<b>Caudal máximo de agua</b>	30 l/min
<b>Caudal mínimo de agua</b>	0.5 l/min
<b>Diámetro de entrada y salida</b>	1 pulg

### 2.1.8. Costos

A continuación, se muestran los costos para la construcción del invernadero, anaquel, sistema de riego y componentes electrónicos.

#### 2.1.8.1. Estructura invernadero y anaquel.

En la tabla 7, se observa los costos para la construcción de la estructura del invernadero que cuenta con tubos de 3 y 4 pulgadas y con tubos cuadrados de 40 mm.

**Tabla 7**  
*Costos de la estructura del invernadero*

<b>Cant.</b>	<b>Longitud. C/U</b>	<b>Producto</b>	<b>Valor Unitario</b>	<b>Valor Total</b>
6	3m	Tubo acero galvanizado 4".	\$ 478.750	\$ 2.872.500
5	3m	Tubo acero galvanizado 2".	\$ 170.750	\$ 853.750
6	6m	Tubo cuadrado acero 40mm.	\$ 125.250	\$ 751.500
			<b>Total</b>	<b>\$ 4.477.750</b>

A continuación, en la tabla 8 se observa los costos estimados de la estructura del anaquel, la cual cuenta con tubería cuadrada en aluminio 30x30x2.6 (mm), tubería cuadrada en acero 20x20x2 (mm) y se utiliza hierro angular 25x25x2 (mm).

**Tabla 8**  
*Costos del anaquel*

<b>Cant.</b>	<b>Longitud. C/U</b>	<b>Producto</b>	<b>Valor Unitario</b>	<b>Valor Total</b>
14	1.83m	Tubo cuadrado aluminio 1".	\$ 119.900	\$ 1.678.600
9	6m	Tubo cuadrado acero ¾".	\$ 24.000	\$ 216.000
4	6m	Hierro angular 25x2.5mm.	\$ 35.550	\$ 142.200
<b>Total</b>				<b>\$ 2.036.800</b>

Por último, en la tabla 9 se observa el costo de las bandejas para FVH.

**Tabla 9**  
*Costos de las bandejas*

<b>Cant.</b>	<b>Unidades</b>	<b>Producto</b>	<b>Valor Unitario</b>	<b>Valor Total</b>
8	5	Bandejas Forraje Verde Hidropónico.	\$ 122.500	\$ 980.000
<b>Total</b>				<b>\$ 980.000</b>

#### 2.1.8.2. Sistema de riego.

En la tabla 10, se muestra los costos del sistema de riego incluyendo tuberías, aspersores, electroválvulas, tanque de almacenamiento y bomba hidráulica.

**Tabla 10**  
*Costos del sistema de riego*

<b>Cant.</b>	<b>Unidades</b>	<b>Longitud. C/U</b>	<b>Producto</b>	<b>Valor Unitario</b>	<b>Valor Total</b>
3	1	6m	Tubo PVC 1".	\$ 31.900	\$ 95.700
3	1	-	Tee PVC 1".	\$ 2.656	\$ 7.968
4	1	-	Tapón 1".	\$ 1.850	\$ 7.400
4	10	-	Microaspersor.	\$ 8.000	\$ 32.000
1	1	-	Tanque 500l.	\$ 377.900	\$ 377.900
1	1	-	Bomba ½ hp.	\$ 109.000	\$ 109.000
3	1	-	Electroválvula.	\$ 35.000	\$ 105.000
<b>Total</b>				<b>\$ 734.968</b>	

### 2.1.8.3. Componentes electrónicos.

A continuación, en la tabla 11 se mostrarán los costos asociados a los componentes eléctricos. De momento, solo se tendrán en cuenta los componentes que se seleccionó anteriormente, aunque estos pueden cambiar o se pueden añadir más conforme se desarrolla el proyecto.

**Tabla 11**  
*Costos de componentes electrónicos*

<b>Cant.</b>	<b>Unidades</b>	<b>Producto</b>	<b>Valor Unitario</b>	<b>Valor Total</b>
1	1	Arduino UNO.	\$ 29.000	\$ 29.000
1	1	Tarjeta de desarrollo ESP32.	\$ 27.000	\$ 27.000
9	4	Celdas de carga + módulo HX711.	\$ 33.500	\$ 301.500
1	1	Módulo sensor DHT11.	\$ 9.500	\$ 9.500
1	1	Tira luces LED impermeables.	\$ 105.000	\$ 105.000
			<b>Total</b>	<b>\$ 472.000</b>

### 2.1.8.4. Costo estimado total del proyecto.

En la tabla 12, se mostrarán los costos de todos los sistemas y componentes del proyecto. Estos costos están sujetos a cambios conforme el proyecto se desarrolla.

**Tabla 12**  
*Costos totales del proyecto*

<b>Producto</b>	<b>Valor Total</b>
Estructura invernadero.	\$ 4.477.750
Anaqueles.	\$ 2.036.800
Bandejas.	\$ 980.000
Sistema de riego.	\$ 734.968
Componentes electrónicos.	\$ 472.000
<b>Total</b>	<b>\$ 8.701.518</b>

### 2.1.9. Costos de sistema a escala

La decisión de llevar a cabo la validación del proyecto en un sistema a escala reducida se basa en la consideración de costos significativamente más bajos. Dada la naturaleza elevada de los

costos asociados con el proyecto a gran escala, se ha optado por implementar una versión más compacta para evaluar su viabilidad y eficacia. La Tabla 13 detalla los costos asociados con el anaquel a escala, y como parte de una estrategia para reducir gastos, se tomó la decisión de cambiar el material utilizado en la fabricación de los tubos cuadrados de 1 *pulg*, pasando de aluminio a acero comercial. Esta estrategia de reducción de costos en la elección del material es una medida pragmática que permite llevar a cabo la validación del proyecto de manera más accesible, sin comprometer la esencia de la investigación y desarrollo del sistema.

**Tabla 13**  
*Costos anaquel a escala*

<b>Cant.</b>	<b>Longitud. C/U</b>	<b>Producto</b>	<b>Valor Unitario</b>	<b>Valor Total</b>
1	6m	Tubo cuadrado acero 1".	\$ 34.900	\$ 34.900
2	6m	Tubo cuadrado acero ¾".	\$ 24.000	\$ 24.000
1	6m	Hierro angular 25x2.5mm.	\$ 35.550	\$ 35.550
<b>Total</b>				\$ 94.450

A continuación, en la tabla 14 se muestran los costos del sistema de riego para el anaquel a escala. En este caso, se reduce el número de materiales utilizados y también se opta por usar un tanque de almacenamiento de menor capacidad para disminuir los costos.

**Tabla 14**  
*Costos del sistema de riego a escala*

<b>Cant.</b>	<b>Unidades</b>	<b>Longitud. C/U</b>	<b>Producto</b>	<b>Valor Unitario</b>	<b>Valor Total</b>
1	1	6m	Tubo PVC 1".	\$ 31.900	\$ 31.900
1	1	-	Tee PVC 1".	\$ 2.656	\$ 2.656
2	1	-	Tapón 1".	\$ 1.850	\$ 3.700
1	10	-	Microaspersor.	\$ 8.000	\$ 8.000
1	1	-	Tanque 150l.	\$ 188.900	\$ 188.900
1	1	-	Bomba ½ hp.	\$ 109.000	\$ 109.000
1	1	-	Electroválvula.	\$ 35.000	\$ 35.000
<b>Total</b>				\$ 379.156	

En la tabla 15, se mostrará los costos de los componentes electrónicos.

**Tabla 15**  
Costos de componentes electrónicos del sistema a escala

<b>Cant.</b>	<b>Unidades</b>	<b>Producto</b>	<b>Valor Unitario</b>	<b>Valor Total</b>
1	1	Arduino UNO.	\$ 29.000	\$ 29.000
1	1	Tarjeta de desarrollo ESP32.	\$ 27.000	\$ 27.000
1	4	Celdas de carga + módulo HX711.	\$ 33.500	\$ 33.500
1	1	Módulo sensor DHT11.	\$ 9.500	\$ 9.500
1	1	Tira luces LED impermeables.	\$ 105.000	\$ 105.000
			<b>Total</b>	<b>\$ 204.000</b>

Por último, en la tabla 16 se observa el costo total del sistema a escala.

**Tabla 16**  
Costo total del sistema a escala

<b>Producto</b>	<b>Valor Total</b>
Anaqueles.	\$ 94.450
Bandejas.	\$ 122.500
Sistema de riego.	\$ 379.156
Componentes electrónicos.	\$ 204.000
<b>Total</b>	<b>\$ 800.106</b>



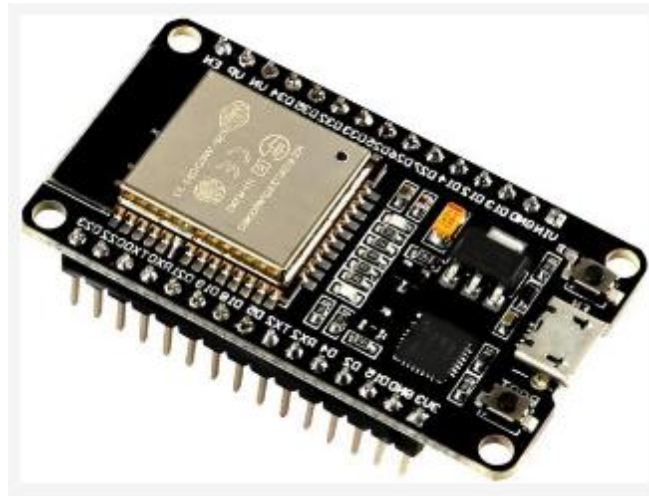
## **2.2. Resultados objetivo 2**

### **2.2.1. Selección componentes electrónicos**

#### **2.2.1.1. Módulo ESP32.**

El ESP32 desempeña un papel crucial en la obtención de datos del sensor de temperatura y humedad y el sensor de peso para su visualización en la plataforma IoT ThingSpeak. Actuando como un microcontrolador, el ESP32 se conecta al sensor, procesa los datos, y utiliza su capacidad de Wi-Fi para establecer conexión a Internet. Posteriormente, transmite los datos procesados a ThingSpeak, donde pueden ser monitorizados y analizados en tiempo real. Este proceso se puede configurar para realizar lecturas periódicas, asegurando una actualización continua de la información recopilada del sensor. Esta tarjeta de desarrollo es la seleccionada para integrar el sistema en su totalidad.

**Figura 25**  
*Módulo ESP32*



*Fuente: Sigmaelectronica, s.f*

#### **2.2.1.2. Sensor de temperatura y humedad DHT 22.**

Para elegir el sensor adecuado, es esencial considerar las variaciones climáticas del municipio de San Bernardo. A lo largo del año, las temperaturas oscilan entre 5.4°C y 26.8°C, con una humedad relativa promedio anual de 78% (Corponariño, 2008). A continuación, en la tabla 18

se puede observar una gráfica comparativa los sensores DHT más comunes que se pueden encontrar en el mercado.

**Tabla 17**  
*Tabla comparativa sensores DHT*

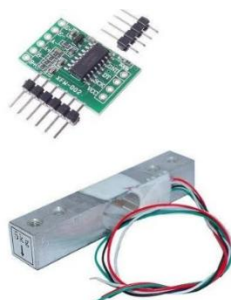
Sensor	DHT 11	DHT 21	DHT 22
Precio (COP)	\$ 9.500	\$ 23.550	\$ 17.000
Voltaje de operación	3V-5V DC	3V-6V DC	3.5V-5.5V DC
Rango de medición de temperatura	0 a 50 °C	-40 a 80 °C	-40 a 80 °C
Precisión de medición de temperatura	+/- 2 °C	<+/- 0.5 °C	+/- 0.5 °C
Resolución temperatura	0.1 °C	0.1 °C	0.5 °C
Rango de medición de humedad	20% a 90% RH	0 a 100% RH	0 a 100% RH
Precisión de medición de humedad	5% RH	2% RH	+/- 3% RH

Teniendo en cuenta la información de la tabla 8, se optó por el sensor DHT22, que tiene un rango de medición de temperatura de -40°C a 80°C y de humedad relativa de 0% a 100%. En contraste, el sensor DHT11 no fue seleccionado debido a que sus rangos de precisión no son lo suficientemente buenos, lo que lo hace innecesario para los objetivos de este proyecto.

### 2.2.1.3. Celda de carga y módulo HX711.

La celda de carga con el módulo HX711 desempeña un papel fundamental en la obtención de datos de peso en un sistema de cultivo de forraje verde hidropónico. Esta configuración permite medir con precisión la masa del forraje verde, lo cual es esencial para monitorear el crecimiento y asegurar un control óptimo en la producción hidropónica.

**Figura 26**  
*Celda de carga y módulo HX711*



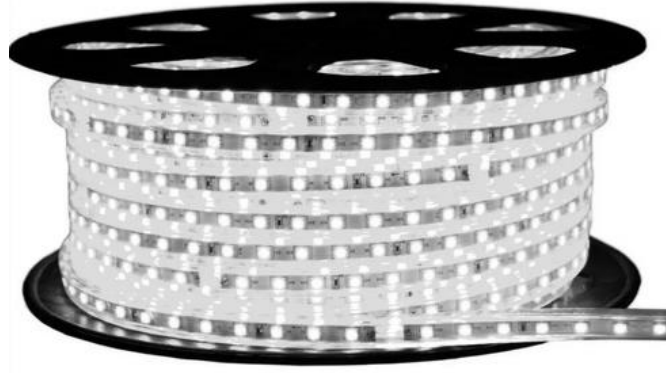
*Fuente: Ferretrónica, s.f*

La celda de carga, al estar integrada en el sistema, registra los cambios de peso a medida que el cultivo crece, proporcionando datos en tiempo real. El módulo HX711 amplifica y digitaliza estas señales de carga, facilitando su interpretación y envío a un sistema de registro o control central.

#### **2.2.1.4. Luces LED impermeables.**

Para este proyecto, la utilización de una cinta LED impermeable cumple una función clave al proporcionar iluminación adicional y personalizable para favorecer el crecimiento óptimo de las plantas.

**Figura 27**  
*Cinta led impermeable*



*Fuente: Edelco, s.f*

Estas cintas, diseñadas específicamente para resistir la humedad, se colocan estratégicamente en el entorno de cultivo para suplementar la luz natural o artificial existente. La luz emitida por la cinta LED simula condiciones ideales para la fotosíntesis, promoviendo un desarrollo saludable de las plantas de forraje.

#### **2.2.1.5. Ventiladores.**

Los ventiladores son esenciales para regular la temperatura y la humedad dentro del invernadero, evitando de esta manera condiciones extremas que podrían dañar el forraje o propiciar el desarrollo de enfermedades. A continuación, en la figura 28 se puede observar el ventilador seleccionado teniendo en cuenta su disponibilidad en el mercado y su precio.

**Figura 28**  
*Ventilador 110v*



*Fuente: Welspec, s.f*

## **2.2.2. Selección de plataforma IoT**

### **2.2.2.1. ThingSpeak.**

Para este proyecto se seleccionó la plataforma IoT ThingSpeak, que proporciona una interfaz centralizada para la recopilación, almacenamiento y visualización de datos clave. Al integrar sensores conectados al sistema de cultivo, ThingSpeak permite monitorear variables cruciales como la humedad, temperatura, peso y otros parámetros en tiempo real. Esta funcionalidad integral de ThingSpeak contribuye significativamente a mejorar la eficiencia, productividad y control de un cultivo de forraje verde hidropónico al proporcionar una visión completa y accesible de los factores que influyen en el rendimiento del cultivo.

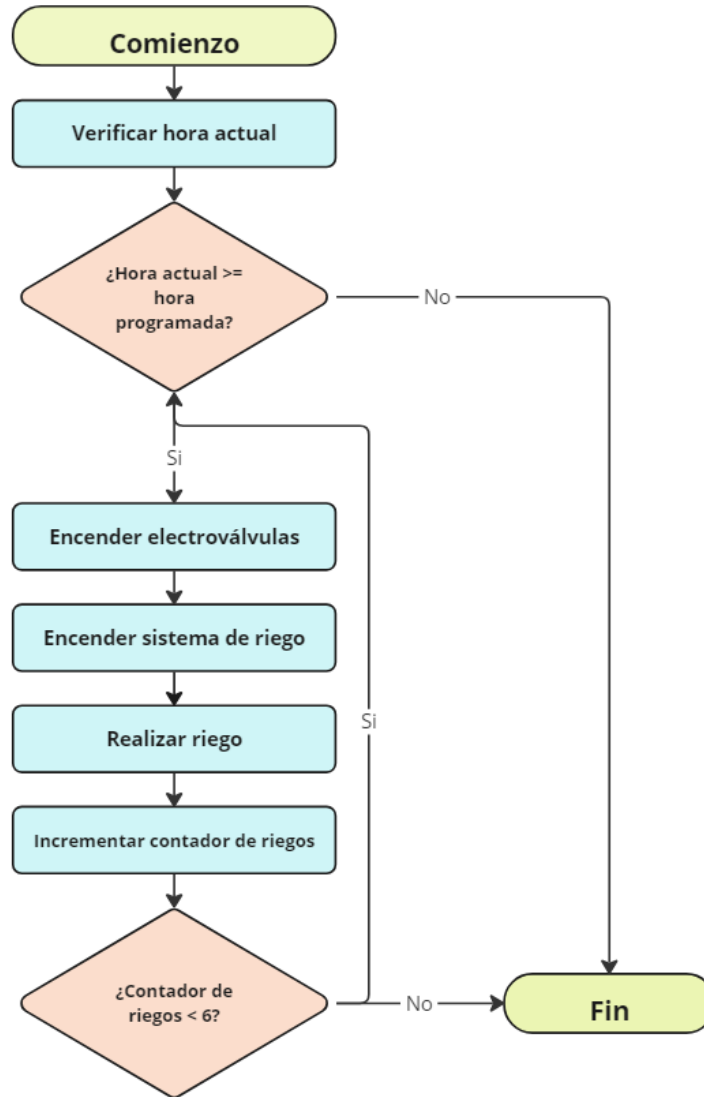
## **2.2.3. Diagramas de flujo**

### **2.2.3.1. Diagrama de flujo sistema de riego.**

Como se muestra en la figura 29, el diagrama de flujo para el sistema de riego controlado por Arduino inicia con la lectura de la hora actual. Si es el momento programado para el riego (seis veces al día durante un minuto cada una), Arduino activa las electroválvulas para permitir el flujo de agua al sistema de riego. Después de completar el periodo de riego programado, las electroválvulas se cierran y el sistema vuelve a monitorear la hora. Este ciclo automatizado

mejora la eficiencia del riego, asegurando condiciones óptimas para el crecimiento del cultivo de forraje.

**Figura 29**  
*Diagrama de flujo del sistema de riego*



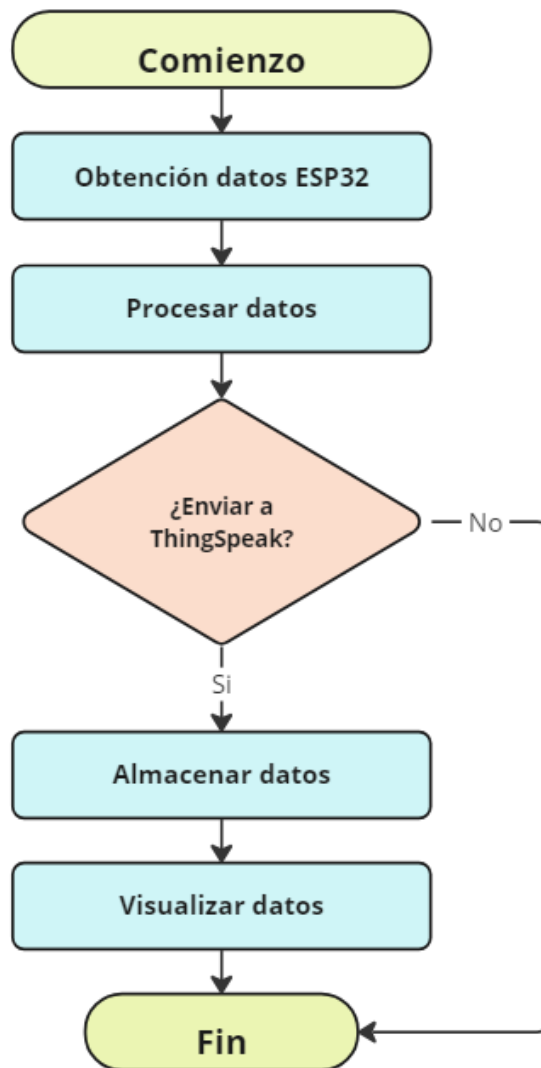
### 2.2.3.2. Diagrama de flujo comunicación a plataforma ThingSpeak

Como se muestra en la figura 30, el diagrama de flujo representa el proceso de envío de datos desde un conjunto de sensores en un ESP32, que monitorea un cultivo de forraje verde hidropónico, hasta la plataforma IoT ThingSpeak. Inicia con la recopilación de datos de los sensores, seguida por el procesamiento de esta información. Luego, se plantea la pregunta de si los datos deben ser enviados a ThingSpeak. Si la respuesta es afirmativa, los datos se envían y almacenan en ThingSpeak, permitiendo su posterior visualización en la plataforma IoT. En caso

contrario, el proceso llega a su fin. La visualización de datos en ThingSpeak se realiza mediante la conexión con la plataforma IoT, lo que completa el flujo del proceso desde la adquisición de datos hasta su presentación en la interfaz de usuario.

**Figura 30**

*Diagrama de flujo envío de datos a ThingSpeak*



## **2.3. Resultados objetivo 3**

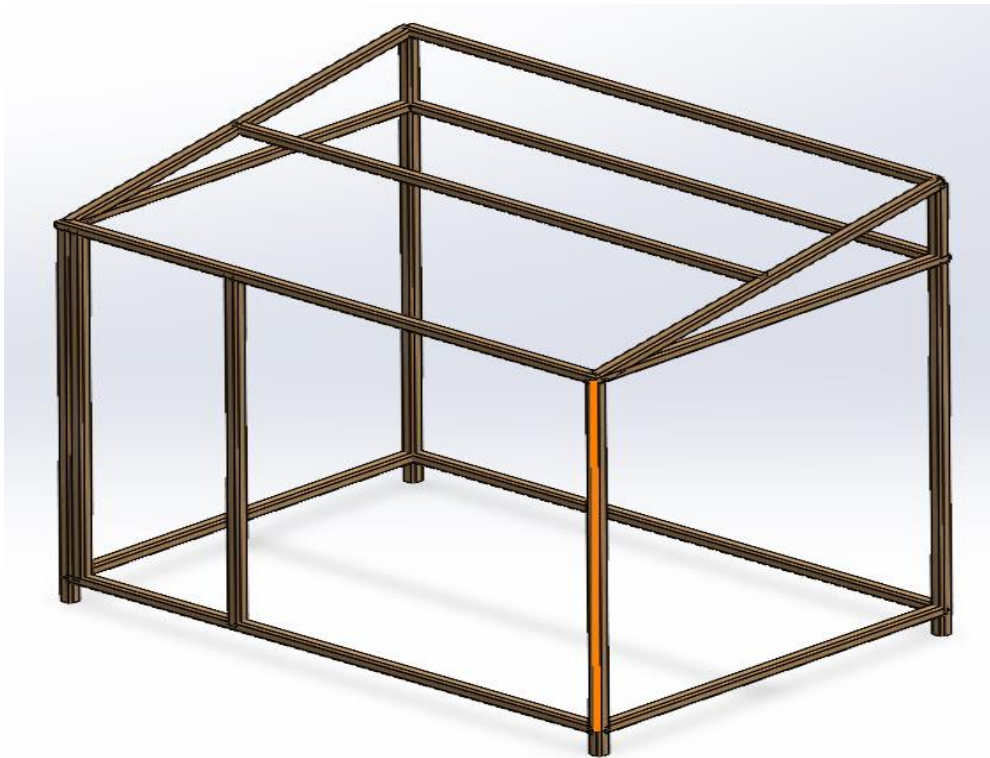
### **2.3.1. Diseño invernadero a escala**

El invernadero a escala se construyó conforme al diseño preestablecido, tomando en consideración la elección de un modelo tipo capilla. En la parte superior del invernadero, se dispone de espacio para alojar dos ventiladores axiales, desempeñando un papel crucial en la regulación de la temperatura interna del invernadero. La estructura se materializó utilizando durmientes de madera de 4x4 cm, garantizando así la robustez necesaria para sostener el invernadero y ofrecer un entorno propicio para el cultivo. Este diseño estratégico busca optimizar la circulación del aire y mantener un ambiente óptimo para el forraje, contribuyendo al éxito del cultivo en el entorno hidropónico. Los planos del invernadero pueden ser encontrados en los anexos de este documento.

A continuación, se presenta el modelo del invernadero elaborado con SolidWorks, caracterizado por una altura de 1.70 metros, una longitud de 1.70 metros y un ancho de 1.20 metros.

#### **Figura 31**

*Diseño invernadero a escala*

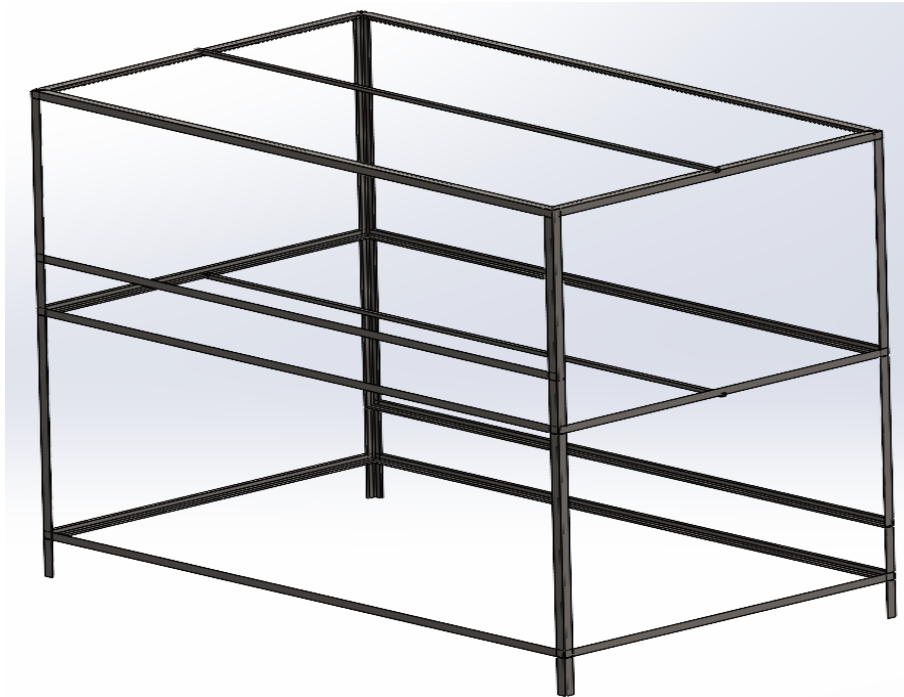


### **2.3.2. Diseño anaquel a escala**

Con el objetivo de optimizar los costos, se ha tomado la decisión de fabricar un anaquel diseñado para alojar 4 bandejas distribuidas en 2 niveles, las bandejas tendrán una inclinación de 10 grados para permitir una circulación de agua óptima. Este enfoque no solo cumple con uno de los propósitos fundamentales del proyecto, que es la optimización del espacio, sino que también busca garantizar una solución económicamente viable. La estructura se construyó utilizando ángulos de hierro, una elección que asegura la durabilidad y resistencia necesarias para soportar las bandejas y maximizar el espacio disponible de manera eficiente. El diseño del anaquel se puede ver a continuación en la figura 32.

#### **Figura 32**

*Diseño anaquel a escala*

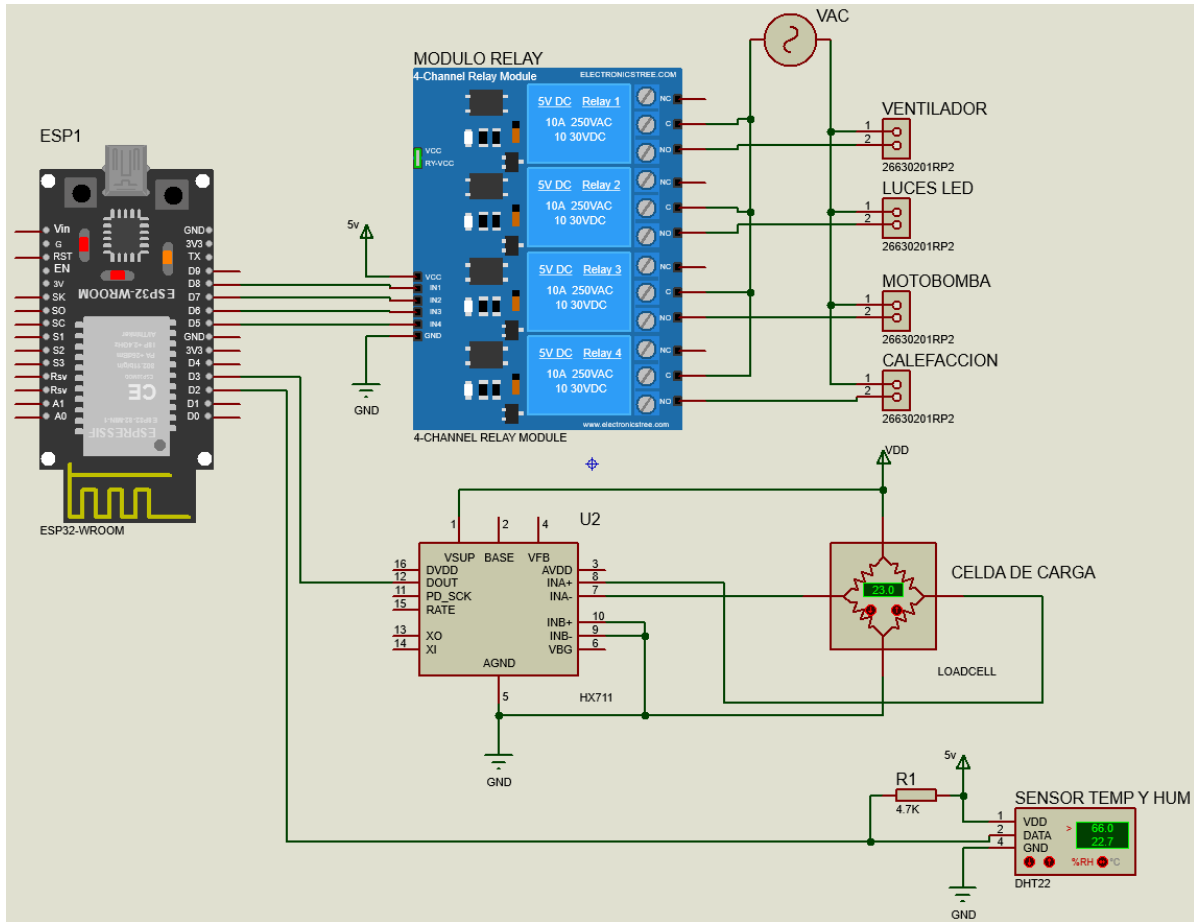


### **2.3.3. Diagrama eléctrico**

Se realizó un diagrama de conexiones en Proteus para el cultivo de forraje verde hidropónico, diseñado a su vez para simular el sistema. En este esquema, se destaca la conexión del ESP32 con una celda de carga junto con su módulo HX711, así como con un sensor de temperatura y humedad. Además, se ha integrado un módulo relé que gestiona las conexiones a los ventiladores axiales, las luces LED impermeables, la motobomba y la calefacción.



**Figura 33**  
Diagrama eléctrico



### 2.3.4. Construcción anaquel.

Para validar el proyecto, se dio inicio a la construcción del anaquel utilizando los elementos previamente diseñados y seleccionados. A continuación, en la figura 34 y 35 se puede identificar el proceso de construcción.

**Figura 34**  
Proceso de construcción anaquel



**Figura 35**  
*Anaqueles en construcción*



Una vez terminado el anaquel se realizó un proceso de pintado con pintura anticorrosiva con el fin de que tenga una protección extra contra la humedad. A continuación, se puede ver el anaquel pintado.

**Figura 36**  
*Anaqueles finalizados*



### **2.3.5. Construcción invernadero**

Para la construcción del invernadero, se optó por mantener el diseño tipo capilla previamente seleccionado, el cual incluye sus correspondientes entradas de aire. Se emplearon durmientes de madera con dimensiones de 4x4 cm en las partes verticales y de 3x3 cm en las partes horizontales. A continuación, en las figuras 37 y 38 se puede ver el proceso de construcción del invernadero.

**Figura 37**

*Proceso de construcción invernadero*



**Figura 38**

*Invernadero a escala*



Una vez terminado el proceso de construcción del marco se procedió a colocar el plástico en el invernadero para así dar por concluida la construcción del invernadero. A continuación, en la figura 39 se puede observar el invernadero completamente terminado.

**Figura 39**

*Estructura del invernadero finalizada*



### **2.3.6. Sistema de riego**

Para el sistema de riego, se emplearon tubos de PVC de 1/2 pulgada junto con microaspersores nebulizadores. En la figura 40 se puede ver el sistema de riego.

**Figura 40**

*Sistema de riego a escala*



Se incorporó una motobomba de 1 HP, para la cual fue necesario instalar una llave de paso para regular su potencia según las necesidades del sistema. Una vez instalado el sistema de riego se procede a probar su funcionamiento con el código en Arduino generado de los ciclos de riego ya establecidos en el dimensionamiento de los sistemas, donde se harán 6 ciclos de un minuto de riego durante el día cada 2 horas.

### ***2.3.7. Implementación del sistema electrónico.***

Una vez terminada la construcción del anaquel y el invernadero se realizó la instalación de todo el sistema electrónico, los principales componentes del sistema, incluyendo la placa desarrolladora ESP32, módulo relé y transformadores de voltaje, fueron almacenados en una caja metálica. La caja de almacenamiento de los circuitos puede ser observada a continuación en la figura 41.

**Figura 41**

*Caja de almacenamiento de circuitos*



Tras completar la implementación del sistema eléctrico y electrónico, se instaló los sensores y actuadores para poner a prueba el correcto funcionamiento del sistema mediante el código

programado para la tarjeta ESP32, que puede ser encontrado en los anexos de este documento. Cada componente cumple una función específica dentro del código:

### **2.3.7.1. Pantalla display LCD**

La implementación de una pantalla LCD garantiza una forma adicional de monitorear las variables si no se tiene acceso a la plataforma de monitoreo IoT. A continuación, en la figura 42 se puede observar la pantalla LCD indicando valores de temperatura y en cuánto tiempo será el próximo riego.

**Figura 42**  
*Pantalla LCD*



### **2.3.7.2. Sensor DHT22**

Al implementarse el sensor DHT22, se obtuvieron los datos en tiempo real sobre la temperatura y humedad dentro del invernadero. Estos datos son transmitidos y mostrados en ThingSpeak para su monitoreo continuo. Además, los datos tomados por el sensor son usados para activar los ventiladores y los bombillos de calefacción según los rangos de temperatura establecidos en el código. Cuando la temperatura descienda de los 12°C, se activarán los bombillos mediante un relé, mientras que, si la temperatura supera los 25°C, se activará el relé de los ventiladores. Al volver la temperatura a su rango óptimo, entre 12°C y 25°C, los relés se desactivarán automáticamente.

### **2.3.7.3. Celda de carga**

La celda de carga y su módulo HX711, cumple la función de tomar los datos del peso del forraje a medida que crece día a día. Se programa un código específico para que los datos de peso

obtenidos se transmitan y puedan ser monitoreados en ThingSpeak. Lo que permite un seguimiento en tiempo real del crecimiento del forraje. Esta información puede ser de utilidad si se desea realizar ajustes en la secuencia de riego o en otros aspectos del sistema para hacer análisis comparativos del crecimiento del forraje.

#### **2.3.7.4. Ventiladores**

Para la instalación de los ventiladores, se tuvo en cuenta la entrada de aire del invernadero y la potencia del ventilador. Este será activado automáticamente cuando la temperatura exceda el rango preestablecido y se apagará cuando vuelva a su rango de temperatura óptimo. A continuación, en la figura 43 se puede ver el ventilador usado.

**Figura 43**  
*Ventiladores*



#### **2.3.7.5. Luces LED.**

Las luces LED se instalan en el sistema para complementar la iluminación natural recibida por el forraje. Se programa una secuencia para iniciar su encendido en una hora específica durante la noche, se divide en dos periodos de dos horas cada uno. Se utilizó un espectro de luz compuesto por colores rojo y azul, lo que resultó en un tono rosado/violeta. Este espectro fue seleccionado debido a su eficacia comprobada en la fotosíntesis, ya que la luz azul estimula el

desarrollo estructural y la formación de hojas, mientras que la luz roja favorece el crecimiento y la floración. La combinación de ambos colores optimiza el desarrollo del forraje al proporcionar las longitudes de onda más relevantes para las necesidades metabólicas de las plantas, logrando así un equilibrio entre crecimiento y calidad del cultivo. A continuación, en la figura 44 se puede observar el funcionamiento de las luces LED durante la noche.

**Figura 44**

*Luces LED durante la noche*

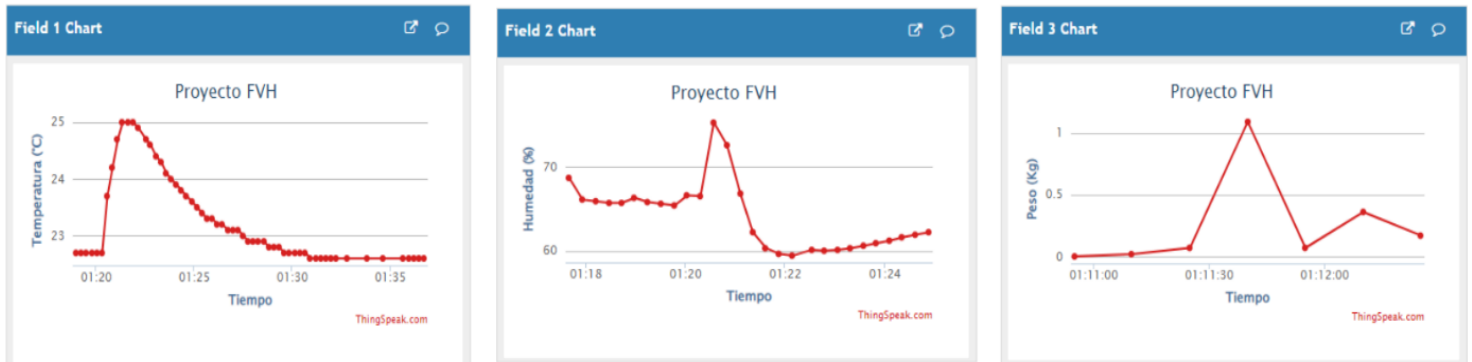


**2.3.8. Envío de datos a ThingSpeak**

El proceso de envío de datos a ThingSpeak desde sensores DHT22 de temperatura y humedad, junto con el módulo HX711 para el sensor de peso en un cultivo hidropónico, implica la configuración del hardware para recopilar datos de los sensores y su programación para enviar la información recopilada a la plataforma en la nube. Una vez integrado con ThingSpeak utilizando su API, se estableció un envío periódico de datos para mantener la información actualizada. Finalmente, los datos son visualizados y analizados en la interfaz web de ThingSpeak para monitorear eficientemente el cultivo hidropónico. A continuación, en la figura 45 se puede ver las gráficas extraídas de la plataforma ThingSpeak donde se puede ver los datos de temperatura, humedad y peso.



**Figura 45**  
Graficas de datos en ThingSpeak



### 2.3.9. Verificación en el monitor serial

Mediante el monitor serial de Arduino se verificó el funcionamiento de la secuencia programada. En la figura 46, se muestran los datos obtenidos del sensor de temperatura y humedad, así como los estados de las luces LED, ventiladores y bombillos. También verifica si los datos están siendo enviados correctamente a ThingSpeak.

**Figura 46**  
Monitor serial Arduino

```

21:45:11
Temperatura DHT11: 21.90 °C.
Humedad DHT11: 70.00 %.
Ventilador desactivado!
Bombillos desactivados!
Temperatura ideal alcanzada, relés desactivados!
Tiempo restante para el próximo riego: 1 horas y 15 minutos.
Datos enviados a ThingSpeak!
Lectura: 27.36 kg
Requesting URL: /update?api_key=58WUCJF1CYNIN280&field3=27.36
Datos enviados a ThingSpeak
    
```

### 2.3.10. Seguimiento de proceso de germinación para validación

Una vez se tiene el sistema implementado en el invernadero se procede a iniciar las pruebas de cultivo, para esto se siguen los procesos de pre-germinación, lavado y germinación investigados y recomendados por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) para el desarrollo de este proyecto.

### **2.3.10.1. Pre-germinación y lavado.**

Inicialmente, se tiene una cantidad de 9 kilogramos de semilla de forraje (6 kilogramos de maíz y 3 kilogramos de trigo) para la comprobación de funcionamiento del sistema. Se comienza con un proceso de limpieza en una solución de hipoclorito de sodio al 1% (equivalente a 10 ml de hipoclorito de sodio por cada litro de agua). Este lavado tiene como objetivo eliminar posibles hongos o bacterias contaminantes que podrían causar enfermedades en el forraje. Luego, se enjuagan con agua limpia y se remojan para activar la germinación de la semilla. Este proceso asegura un buen inicio de germinación del cultivo, debido a que se utilizan semillas activadas en las bandejas de cultivo. A continuación, en la figura 47 se puede observar el proceso de lavado realizado.

**Figura 47**  
*Proceso de lavado*



Una vez se deja en remojo por 24 horas se procede a colocar las semillas en las bandejas con un espesor de entre 1 y 1.5 centímetros. En la figura 48, se puede contemplar las semillas ya colocadas en las bandejas para iniciar el proceso de germinación.

**Figura 48**

*Semillas posicionadas en bandejas*



### 2.3.10.2. Germinación y comparación entre cultivos.

Se procede a sembrar 2 kilogramos de semilla por bandeja y se ubican dos bandejas en el invernadero. Inicialmente, se ubica una bandeja con semilla de trigo y 7 días después se ubica la otra bandeja con semilla de maíz. Se programa un tiempo máximo en el que debe permanecer el cultivo en el invernadero, el cual debe ser de 14 días. A continuación, en la figura 49 se pueden observar la bandeja con las semillas de trigo que cuentan con un periodo de germinación de 9 días (derecha) y la bandeja con las semillas de maíz con un periodo de germinación de 2 días (izquierda).

**Figura 49**

*Bandejas con semillas de forraje*



Para el seguimiento del proceso de germinación se toman los datos del peso del forraje conforme el paso de los días y se realizan unas observaciones si se observa algo inusual en el cultivo. Adicional a esto, se realiza una comparación entre una de las bandejas que se encuentra en el invernadero y otra que se encuentra por fuera del invernadero sometida a riegos manuales y demás variables externas.

Para realizar el análisis de este proceso se organizan los datos tomados durante los 14 días programados para la duración del cultivo en una tabla. A continuación, en la tabla 19 se pueden observar los datos tomados de la bandeja con semilla de maíz sometida al ambiente controlado del invernadero.

**Tabla 18**  
*Datos de la bandeja en el invernadero*

Día	Peso [Kg]	Altura [cm]	Observaciones
1	2.5	-	Se ubica semilla en bandeja.
2	2.56	0.7	Comienza a germinar.
3	2.72	1.2	-
4	3.1	2	-
5	3.41	3	-
6	3.86	3.8	-
7	4.2	4.5	-
8	4.71	5.3	El forraje germina uniformemente en la bandeja.
9	-	6	No se obtiene datos de peso debido a deterioro de celdas
10	-	7.2	de carga.
11	6.1	7.9	-
12	6.6	8.5	-
13	7.02	9.2	-
14	7.8	10.1	Forraje listo para cosecha.

En el día 8, se puede observar que la gran mayoría de semillas ya germinaron y alcanzaron una altura de 5.3 centímetros. En la figura 50, se puede observar el avance del cultivo en el día 8.

**Figura 50**

*Cultivo de forraje de 8 días en invernadero*



En paralelo se tomaron los datos de la bandeja testigo expuesta a condiciones de riego manual y sin los sistemas que contiene el invernadero. En la tabla 20 se pueden ver los datos recolectados.

**Tabla 19**

*Datos de la bandeja testigo*

<b>Día</b>	<b>Peso [Kg]</b>	<b>Altura [cm]</b>	<b>Observaciones</b>
1	2.5	-	Se ubica semilla en bandeja.
2	2.5	-	-
3	2.5	-	-
4	2.5	-	-
5	2.67	0.5	Comienza a germinar.
6	2.9	1.2	-
7	3.2	1.8	-
8	3.5	2.5	Se empieza a notar color amarillo en forraje.
9	3.8	3.2	Se aprecia que no germina completamente en ciertas
10	4.2	3.7	partes de la bandeja.
11	4.4	4.3	Se comienza a marchitar en ciertas zonas.
12	4.6	4.5	-
13	4.8	4.5	-
14	5.2	4.6	Se observa pérdida de volumen debido a marchitación.

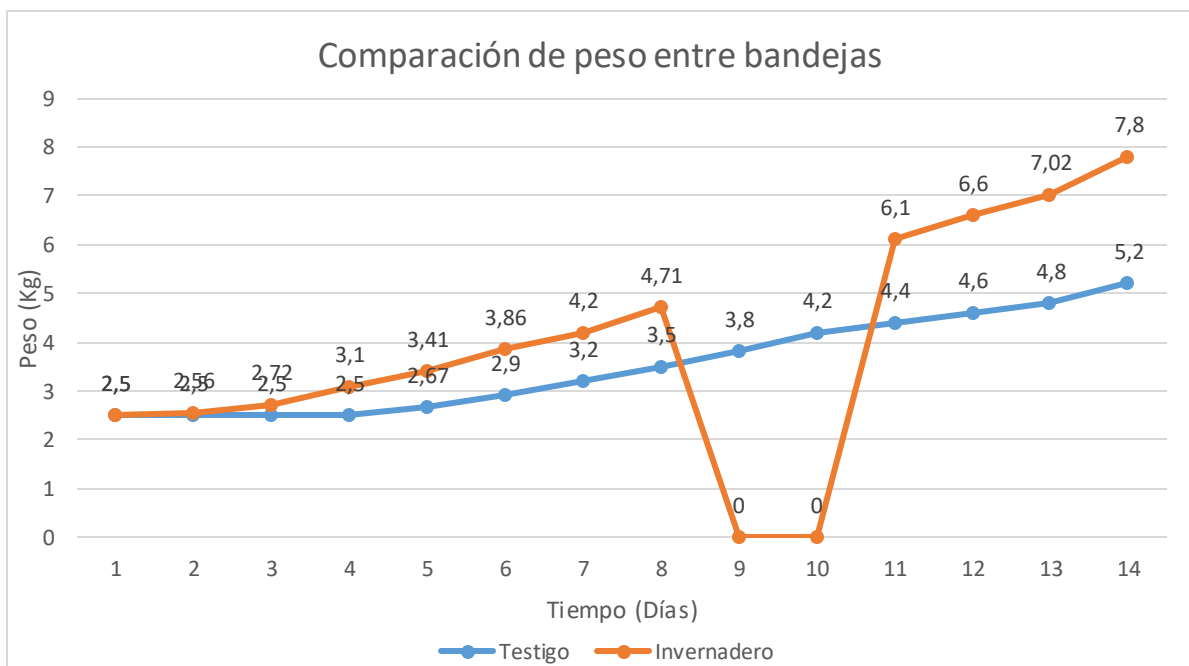
Los datos para la bandeja en invernadero fueron obtenidos con los sensores de peso y su monitoreo en la plataforma ThingSpeak hasta que presentaron deterioro en el día 9, a partir del día 11 la bandeja fue pesada con ayuda de una balanza digital de capacidad máxima de 10 kg. La bandeja ubicada por fuera del invernadero fue pesada con ayuda de la balanza digital mencionada anteriormente. Para la obtención de la medida de la altura en las dos bandejas se utilizó una cinta métrica, registrando el crecimiento de manera manual.

### 2.3.11. Análisis comparativo de crecimiento.

Una vez terminado el periodo de germinación establecido de 14 días para los cultivos se procede a realizar un análisis con gráficas de relación tiempo–peso y tiempo–altura con el objetivo de visualizar la diferencia de crecimiento entre ambos ambientes. Esta validación se hizo una vez, con una bandeja en invernadero y otra ubicada afuera expuesta a condiciones naturales.

Con la bandeja ubicada en el invernadero se observó un aumento del peso de manera constante, alcanzando aproximadamente 8 kg en 14 días. Se observa en general que el cultivo tuvo un desarrollo saludable y uniforme, lo que refleja unas buenas condiciones de temperatura, humedad y riego. A continuación, en la figura 51 se puede observar la gráfica de relación tiempo–peso de los cultivos.

**Figura 51**  
Gráfica relación tiempo–peso bandejas



Se puede observar un contraste respecto a la bandeja ubicada fuera del invernadero donde el peso aumentó de forma lenta, alcanzando un peso final de tan solo 5.2 kg. Se observa que, durante los primeros días, el peso no tuvo ningún aumento lo cual indica una germinación más lenta. Si bien el peso del forraje iba aumentando desde el día 5, a partir del día 8 se observó que el forraje tenía algunos signos de marchitación en algunas zonas lo que desaceleró su crecimiento en peso. Esto pudo deberse a la variabilidad de las condiciones ambientales a las que fue expuesto.

En cuanto a la altura del cultivo ubicado en el invernadero, se puede observar que creció de manera estable alcanzando una altura de 10.1 cm en el día 14. El buen desarrollo que tuvo este cultivo sugiere un buen balance de luz, tanto natural como artificial usando luces LED.

En este caso, la altura del cultivo en la bandeja testigo, también fue menor, alcanzando una altura de 4.6 cm. A partir del día 8, se reportaron variaciones en su color, como se indica a continuación en la figura 52.

**Figura 52**

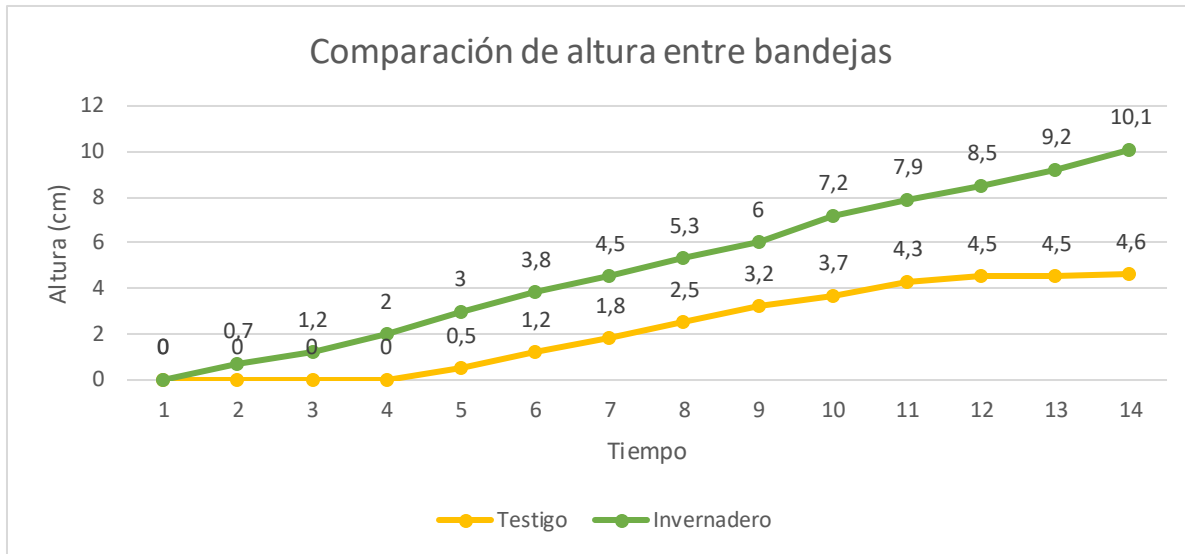
*Cultivo en bandeja testigo*



Estos efectos negativos en el cultivo se deben a los factores externos a los cuales fue sometido el cultivo en la bandeja testigo, como la sensibilidad a la exposición continua a una intensidad solar directa y la falta de riego constante. A continuación, se puede observar la gráfica de relación de la altura respecto a los días transcurridos.

**Figura 53**

Gráfica relación tiempo–altura bandejas



En la validación, se utilizaron bandejas de 80x60 cm (0.48 m<sup>2</sup> de superficie) para el cultivo de forraje verde hidropónico. Los resultados mostraron una diferencia significativa en la producción dependiendo del entorno, para la bandeja ubicada dentro del invernadero se obtuvo lo siguiente.

$$Densidad = \left( \frac{\text{Peso producido}}{\text{Área}} \right) = \frac{8 \text{ Kg}}{0.48 \text{ m}^2} = 16.67 \text{ kg/m}^2$$

La bandeja ubicada dentro del invernadero produjo 8 kg de forraje, lo que equivale a una densidad de producción de 16.67 kg/m<sup>2</sup>.

$$Densidad = \left( \frac{\text{Peso producido}}{\text{Área}} \right) = \frac{5 \text{ Kg}}{0.48 \text{ m}^2} = 10.42 \text{ kg/m}^2$$

Por otro lado, la bandeja ubicada fuera del invernadero, expuesta a condiciones naturales y riego manual, produjo 5 kg de forraje, lo que corresponde a una densidad de producción de 10.42 kg/m<sup>2</sup>. Esta comparación evidencia que la producción dentro del invernadero fue aproximadamente 60% mayor en comparación con la producción fuera de él.

### 2.3.12. Análisis frente a un cultivo tradicional

El cultivo en invernadero muestra un rendimiento superior, alcanzando 7.8 kg por bandeja en 14 días, comparado con el rendimiento de un cultivo tradicional de 3 a 4 kg por m<sup>2</sup>. Esto se debe a una mayor densidad de siembra y al control de las variables ambientales, como la



temperatura y el riego, que optimizan la producción. En términos de crecimiento en altura, el cultivo hidropónico controlado creció a 10.1 cm, mientras que el cultivo no controlado alcanzó solo 6.2 cm. Aunque los cultivos tradicionales pueden alcanzar alturas mayores, su crecimiento es más lento.

La calidad del forraje en invernadero también es superior ya que presenta una germinación uniforme y libre de plagas. A diferencia del tradicional que puede verse afectado por los factores previamente mencionados.

En cuanto a eficiencia de recursos, el cultivo en invernadero utiliza el espacio y el agua de manera más eficiente ya que, en el cultivo tradicional se requiere más agua debido a las grandes áreas de terreno.

### ***2.3.13. Análisis del sistema diseñado***

El sistema diseñado para el cultivo hidropónico funcionó de la manera en que se esperaba durante todo el experimento. El sistema operaba mediante la obtención de datos de temperatura y humedad para activar los ventiladores para reducir la temperatura cuando superaba el rango permitido y bombillos para aumentar la temperatura del invernadero.

Durante las pruebas se observó que el sistema cumplía con la activación oportuna de los actuadores. Se observó que, durante el día el actuador que más se utilizaba eran los ventiladores, a diferencia de los bombillos, que se activaban más a altas horas de la noche donde la temperatura tiende a disminuir por debajo de los 12 °C.

Si bien no se identificaron fallas durante el periodo de prueba, se observó que en algunos casos durante el día donde la temperatura era muy alta (25 a 30 °C dentro del invernadero), tardaba aproximadamente de 10 a 15 minutos en regular la temperatura por debajo de 20° C, esto puede mejorarse instalando un ventilador adicional o abriendo una nueva sección en el invernadero para aumentar el flujo de aire. También, es evidente la dependencia de una fuente de electricidad estable, se implementó el uso de un sistema de alimentación ininterrumpida (UPS), lo que mantuvo el sistema encendido durante un corte de luz que se presentó durante el día. Si bien el uso de la UPS mantuvo el sistema funcionando durante 20 minutos, lo hizo únicamente manteniendo por parte del tiempo los ventiladores y la tarjeta de control, es incierto si es capaz de soportar toda la carga del sistema.

El sistema diseñado incluye componentes con demandas energéticas significativas, como una motobomba de 1 HP (~900 W), dos ventiladores (120-160 W), dos bombillos de calefacción (200 W), luces impermeables (~100 W) y una caja electrónica (~7 W). Esto genera un consumo total estimado de aproximadamente 1.4 kW cuando el sistema opera a plena capacidad. Dado el tiempo estimado de uso de cada componente, el consumo energético diario del sistema puede calcularse con mayor precisión. La motobomba, con un consumo aproximado de 900 W, estaría operando solo durante 6 minutos al día, lo que equivale a un consumo diario de 90 Wh (0.09 kWh). Las luces LED, con un consumo total estimado de 100 W, operan durante 4 horas, consumiendo 400 Wh (0.4 kWh) al día. Los bombillos y ventiladores, con un consumo combinado de 360 W, funcionando una hora al día, consumen 360 Wh (0.36 kWh). Por último, la electrónica (ESP, LCD, sensores, etc.), que consume alrededor de 7 W constantemente, utilizaría 168 Wh (0.168 kWh) al día. En total, el consumo diario del sistema sería de aproximadamente 1.02 kWh.

### **3. Conclusiones**

De acuerdo al primer objetivo, “Identificar los requerimientos de producción y de automatización de un forraje verde hidropónico”, se establecieron las condiciones necesarias para el crecimiento del forraje, como la temperatura, humedad, luz y cantidad de riego necesarias. Se definieron los componentes electrónicos clave para la automatización (sensores y actuadores), debido a esto se diseñó un sistema que asegure el control y monitoreo de las variables.

Para el segundo objetivo, “Diseñar un sistema de control y automatización para controlar las variables que afectan el desarrollo del forraje (Temperatura, luz y humedad)”, se diseñó e implementó un sistema funcional que respondió a la variabilidad de las condiciones ambientales. El sistema tuvo una buena respuesta para la activación de los actuadores, para la activación programada de la luz artificial y riego, y para el envío de datos a la plataforma IoT.

En el tercer objetivo, “Evaluar el sistema automatizado frente a un cultivo tradicional para implementarlo en invernadero a escala con el fin de que permita mantener un ambiente óptimo para la producción de forraje verde hidropónico”, se realizó un análisis donde se observó que la bandeja expuesta al sistema automatizado crece de manera uniforme y logró tener una mejor calidad que un cultivo tradicional expuesto a condiciones naturales y riego manual. Esto es debido a que la estabilidad de condiciones ambientales que ofrece el invernadero son buenas para el cultivo y redujo la dependencia a factores externos como el clima y una correcta implementación del ciclo de riego.

Por último, con la implementación de la plataforma IoT se pudo hacer un monitoreo constante de las variables de temperatura, humedad y peso del cultivo, lo que facilitó la detección de anomalías y redujo la necesidad de intervención manual, eliminando tareas repetitivas como el riego.

#### **4. Recomendaciones**

Si bien se puede tener un buen resultado con las variables que se decidió controlar en el sistema (temperatura, humedad y luz), se sugiere ampliar el sistema integrando sensores de concentración de CO<sub>2</sub> y sensores de pH en el agua utilizada para el riego, estos factores también podrían tener una influencia en la calidad final del forraje. Esto optimizaría aún más el proceso de cultivo del forraje.

Para este proyecto no se utilizaron fuentes de energía alternativas para cubrir las necesidades de iluminación, ventilación y activación de bomba para el riego. Se considera evaluar la implementación de estas fuentes para aumentar la sostenibilidad y disminuir los costos asociados a la electricidad a largo plazo.

Finalmente, la inclusión de una plataforma IoT resultó ser de gran utilidad para seguir el proceso de germinación del cultivo, midiendo su peso conforme el paso de los días y monitoreando el clima dentro del invernadero. Sin embargo, sería beneficioso implementar un sistema de avisos que notifiquen al usuario sobre cualquier anomalía en las variables mostradas en la interfaz con el fin de que permita una intervención rápida para mantener a salvo la integridad del cultivo.

## Referencias bibliográficas

- Gobernación de Nariño, (2022). En la Subregión de la Exprovincia de Obando se fortalece la producción de forrajes para la ganadería de leche.  
[https://sitio.narino.gov.co/13202/?utm\\_source=rss&utm\\_medium=rss&utm\\_campaign=1320-2](https://sitio.narino.gov.co/13202/?utm_source=rss&utm_medium=rss&utm_campaign=1320-2)
- Paipa, L., Bernal, L., Conde, A., Quijano, N., & Bula, K. (2020). El forraje verde hidropónico: una alternativa sostenible en tiempos de cambio climático. *Ámbito Investigativo*, 5(2), 60-71.
- González, E., Ceballos, J., & Benavides, O. (2015). Producción de forraje verde hidropónico de maíz *Zea mays* L. en invernadero con diferentes niveles de silicio. *Revista de ciencias agrícolas*, 32(1), 75-83.
- Ahamed, M. S., Sultan, M., Shamshiri, R. R., Rahman, M. M., Aleem, M., & Balasundram, S. K. (2023). Present status and challenges of fodder production in controlled environments: A review. *Smart Agricultural Technology*, 3, 100080.  
<https://doi.org/10.1016/J.ATECH.2022.100080>
- Andrianto, H., Suhardi, & Faizal, A. (2020). Development of smart greenhouse system for hydroponic agriculture. *2020 International Conference on Information Technology Systems and Innovation, ICITSI 2020 - Proceedings*, 335–340.  
<https://doi.org/10.1109/ICITSI50517.2020.9264917>
- Sotelo Toledo, J. M. (2020). Rendimiento de forraje verde hidropónico de cebada (*hordeum vulgare* L.) Cultivar variedad centenario, aplicando tres volúmenes de riego por micro aspersión, bajo condiciones de invernadero en Huaraz.
- Manotoa Betancourt, C. G. (2022). *Diseño y construcción de una planta automatizada que produzca 2kg/día de forraje verde hidropónico a partir de la semilla de cebada para la alimentación del cuy* (Bachelor's thesis).

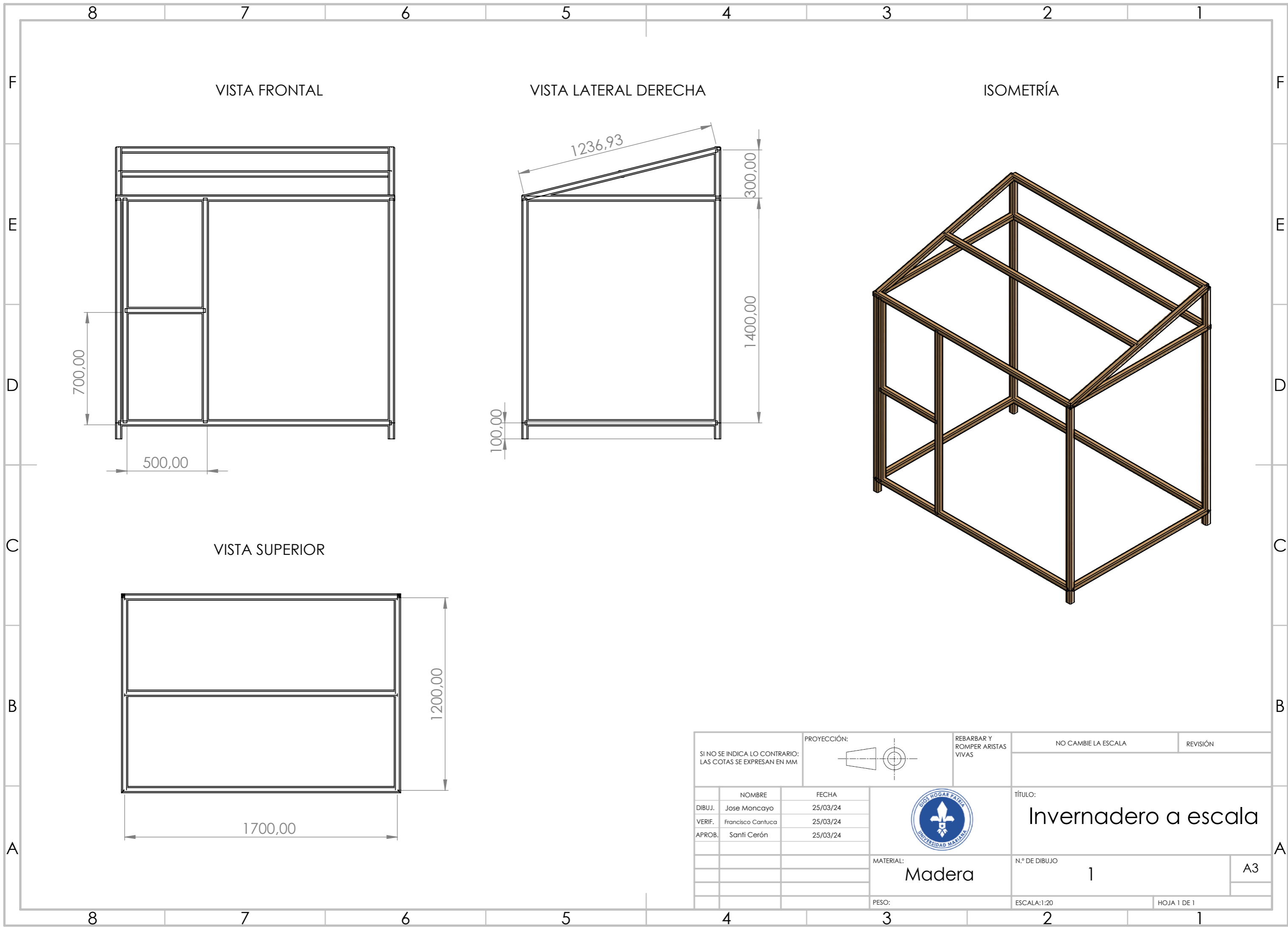
- Técnico, M. (2002). Forraje Verde Hidropónico. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Oficina Regional de la FAO para América latina y el Caribe. Santiago: Caribe.
- Moreno, E. G. (2001). Automatización de procesos industriales. Valencia: Alfaomega.
- Tarrillo, H. (2008). Forraje Verde Hidropónico. Disponible en: [www.forrajehidroponico.com](http://www.forrajehidroponico.com)
- Pérez Lagos, N. (1987). Efecto de la Sustitución del Concentrado por Forraje Obtenido en Condiciones de Hidroponía en una Crianza Artificial de Terneros. Facultad de Ciencias Agropecuarias y Forestales de la Universidad de Concepción, Sede Chillán. Chile.
- Sánchez, A. (1996 – 1997). Informes Técnicos de Estadía. Informes Internos de la Dirección Nacional de Empleo (DINAE –Ministerio de Trabajo y Seguridad Social) Montevideo, Uruguay.
- Nguyen, H. C., Thi, B. T. V., & Ngo, Q. H. (2022). Automatic Monitoring System for Hydroponic Farming: IoT-Based design and development. *Asian Journal of Agriculture and Rural Development*, 12(3), 210–219. <https://doi.org/10.55493/5005.v12i3.4630>
- Vincentdo, V.; Surantha, N. Nutrient Film Technique-Based Hydroponic Monitoring and Controlling System Using ANFIS. *Electronics* 2023, 12, 1446. <https://doi.org/10.3390/electronics12061446>
- Chowdhury, M. E. H., Khandakar, A., Ahmed, S., Al-Khuzaei, F., Hamdalla, J., Haque, F., Reaz, M. B. I., Al-Shafei, A., & Al-Emadi, N. (2020). Design, construction and testing of IoT based Automated Indoor Vertical Hydroponics Farming Test-BED in Qatar. *Sensors*, 20(19), 5637. <https://doi.org/10.3390/s20195637>
- Shrivastava, A., Nayak, C. K., Dilip, R., Samal, S. R., Rout, S., & Ashfaque, S. M. (2021). Automatic robotic system design and development for vertical hydroponic farming using IoT and big data analysis. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi:10.1016/j.matpr.2021.07.294>

- Corponariño, (2008). DIAGNOSTICO BIOFISICO Y SOCIO ECONOMICO SAN BERNARDO.
- Antonio, Jerry & Mejia, Wendell. (2022). Manual práctico para la elaboración de Forraje Verde Hidropónico en invernadero no convencional. Guía Técnica N°35.
- Leslie, J. F. M., & Reyes, A. S. S. (2016). Determinación del estado tensional de un invernadero tipo capilla en áreas de clima tropical. *Innovare: Revista de ciencia y tecnología*, 5(1), 1-19.
- Alvarado, P. y Urrutia, G. (2003). Invernaderos. <https://biblioteca.org.ar/libros/8863.pdf>
- Serrano Cermeño, Z. (2005). Construcción de invernaderos. Ediciones Mundi-Prensa.
- Capcha Mamani, E. N., & Torrez Soria, J (2015). Automatización de un invernadero (Doctoral dissertation).
- Parra A. (2019). Implementación de un sistema controlador de factores climatológicos y cultivos de pitahaya hidropónica. Universidad Tecnológica del Perú, Facultad de Ingeniería, Perú.
- Kuo, B. C. (1996). Sistemas de control automático. Pearson Educación.
- Gokhale, P., Bhat, O., & Bhat, S. (2018). Introduction to IOT. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, 5(1), 41-44.
- Llugsha Siza, L. B., & Moreno Moreno, W. J. (2021). Diseño de un módulo de cultivos hidropónico FVH para la crianza de animales de corral basado en IOT (Bachelor's thesis, Ecuador: Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi: UTC.).
- Gómez, M. (2007). Evaluación del forraje verde hidropónico del maíz y cebada, con diferentes dosis de siembra para las etapas del crecimiento y engorde de cuyes. Riobamba-Ecuador: Escuela superior politécnica de Chimborazo.

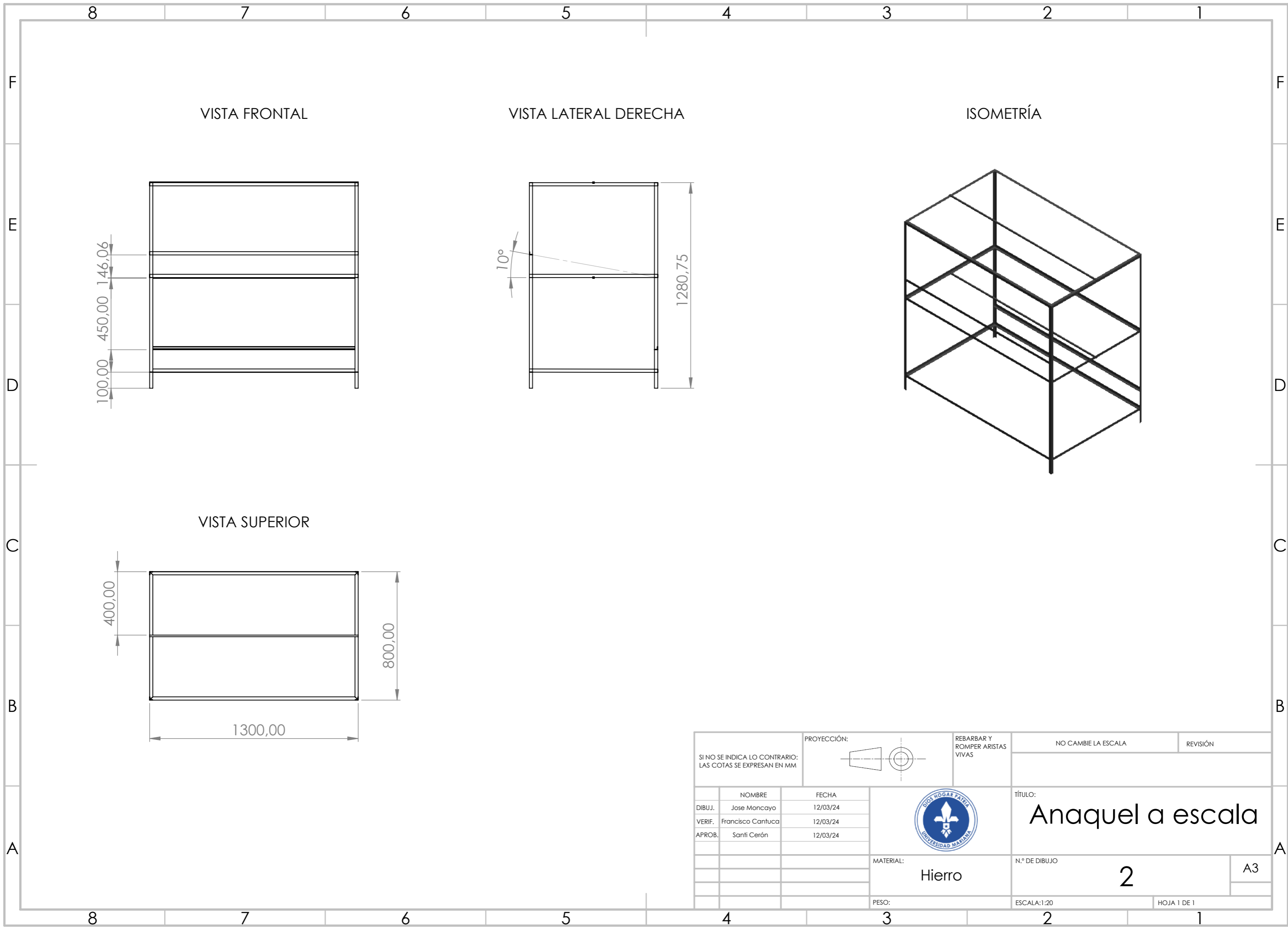
- Osnayo, C. (2014). Production of green hydroponic forage of barley (*Hordeumvulgare*) using trout farm's effluent. Perú: Revista complutense de ciencias veterinarias.
- Soto, M. A., Reyes, A. S., & Ahumada, J. A. (2012). Produccion de biomasa y valor nutricional del forraje verde hidropónico de trigo y avena. Caracas, Venezuela: Red de revistas científicas de America Latina, el Caribe, España y Portugal.
- Lopez, L. (2005). PRODUCCIÓN DE FORRAJE VERDE HIDROPONICO. CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA. Saltillo, Coahuila.
- Delgado Guzmán, E. G. (2021). Implementación de un sistema automatizado para control y supervisión de la producción de forraje verde hidropónico en la ciudad del Cusco.
- Reyna Huamán, C. E. (2015). Sistema automatizado para el monitoreo y control de humedad en un invernadero.
- Camues Narvaez, L. T. (2017). Sistema de monitoreo de temperatura, humedad y detección de humo para el centro de datos ubicado en la Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas basado en el estándar ISO/IEC 17799 (Bachelor's thesis).
- FRAILE VILARRASA, J. O. R. G. E., & GAGO CALDERON, A. L. F. O. N. S. O. (2012). Iluminación con tecnología LED. Ediciones Paraninfo, SA.
- JUAREZ LOPEZ, P. O. R. F. I. R. I. O., MORALES RODRIGUEZ, H. J., SANDOVAL VILLA, M. A. N. U. E. L., GOMEZ DANES, A. A., CRUZ CRESPO, E. L. I. A., JUAREZ ROSETE, C. R., ... & CATON, O. (2013). Producción de forraje verde hidropónico. CONACYT.



**ANEXOS**



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM		PROYECCIÓN: 	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN								
<table border="1"> <thead> <tr> <th>NOMBRE</th> <th>FECHA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>DIBUJ. Jose Moncayo</td> <td>25/03/24</td> </tr> <tr> <td>VERIF. Francisco Cantuca</td> <td>25/03/24</td> </tr> <tr> <td>APROB. Santi Cerón</td> <td>25/03/24</td> </tr> </tbody> </table>		NOMBRE	FECHA	DIBUJ. Jose Moncayo	25/03/24	VERIF. Francisco Cantuca	25/03/24	APROB. Santi Cerón	25/03/24		TÍTULO: <b>Invernadero a escala</b>		
NOMBRE	FECHA												
DIBUJ. Jose Moncayo	25/03/24												
VERIF. Francisco Cantuca	25/03/24												
APROB. Santi Cerón	25/03/24												
MATERIAL: <b>Madera</b>		N.º DE DIBUJO <b>1</b>	A3										
PESO:		ESCALA:1:20	HOJA 1 DE 1										



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM		PROYECCIÓN: 	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN								
<table border="1"> <thead> <tr> <th>NOMBRE</th> <th>FECHA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>DIBUJ. Jose Moncayo</td> <td>12/03/24</td> </tr> <tr> <td>VERIF. Francisco Cantuca</td> <td>12/03/24</td> </tr> <tr> <td>APROB. Santi Cerón</td> <td>12/03/24</td> </tr> </tbody> </table>		NOMBRE	FECHA	DIBUJ. Jose Moncayo	12/03/24	VERIF. Francisco Cantuca	12/03/24	APROB. Santi Cerón	12/03/24		TÍTULO: <b>Anaqueles a escala</b>		
NOMBRE	FECHA												
DIBUJ. Jose Moncayo	12/03/24												
VERIF. Francisco Cantuca	12/03/24												
APROB. Santi Cerón	12/03/24												
		MATERIAL: <b>Hierro</b>	N.º DE DIBUJO <b>2</b>	A3									
		PESO:	ESCALA: 1:20	HOJA 1 DE 1									

```

1  #include <DHT.h>
2  #include "ThingSpeak.h"
3  #include "WiFi.h"
4  #include "RTClib.h"
5  #include <Wire.h>
6  #include <LiquidCrystal_PCF8574.h>
7  #include "HX711.h"
8
9  // RTChhn
10 RTC_DS3231 rtc;
11 #define pin2 4
12 DHT dht2(pin2, DHT22);
13 LiquidCrystal_PCF8574 lcd(0x27);
14
15 // Pin para DHT22
16 #define DHTPIN 4
17 #define DHTTYPE DHT22
18 DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
19
20 // Otros pines
21 int pin_disparo = 15;
22 int pin_cruce_cero = 26;
23
24 // Variables de temperatura y potencia
25 float Potencia_1 = 0;
26 float Potencia_2 = 0;
27 float Potencia = 0;
28 float Setpoint = 25; // Temperatura objetivo
29
30 // Variables PID
31 float Kc = 8;
32 float Tao_I = 80;
33 float PID_error = 0;
34 float previous_error = 0;
35 float PID_value = 0;
36 float Error_INT = 0;
37
38 // Variables de tiempo
39 unsigned long Tiempo_previo = 0;
40 unsigned long Tiempo_actual = 0;
41 int Temperatura = 0;
42 int valor = 0; // Asegúrate de declarar esta variable
43
44 // Variables para interrupciones
45 volatile int detectado = 0;
46
47 void IRAM_ATTR isr() {
48 |   detectado = 1;
49 | }
50
51 // PINES
52 const int releBombillos = 27;
53 const int relePinLED = 12;
54 const int relePinMoto = 32;

```

```

56 // CONEXIÓN IOT
57 const char* ssid = "";
58 const char* password = "";
59 const char* host = "api.thingspeak.com";
60 const char* apiKey = "";
61 unsigned long channelID = ;
62 const char* WriteAPIKey = "";
63
64 WiFiClient cliente;
65
66 // Variables para control de riego
67 int riegoHoraBase = 2; // Hora inicial para el riego (puedes ajustar este valor)
68
69 // Celda de carga
70 #define DOUT 18
71 #define CLK 19
72 HX711 scale(DOUT, CLK);
73 float calibration_factor = 48100; // factor de calibración celda de carga
74 float units;
75 float ounces;
76
77 // Variables globales para DHT
78 float t2; // Temperatura DHT
79 float h2; // Humedad DHT
80
81 void setup() {
82   Serial.begin(115200);
83   lcd.begin(16, 2); // Inicializamos la LCD de 16x2
84   lcd.setBacklight(255); // Activamos la luz de fondo al máximo
85   lcd.clear();
86
87   Serial.println("Test de sensores:");
88   lcd.setCursor(0, 0);
89   lcd.print("Inicializando...");
90
91   if (!rtc.begin()) {
92     Serial.println("Couldn't find RTC");
93     lcd.setCursor(0, 1);
94     lcd.print("RTC no detectado");
95     while (1) delay(10);
96   }
97   if (rtc.lostPower()) {
98     Serial.println("RTC lost power, let's set the time!");
99     rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)));
100  }
101
102  WiFi.begin(ssid, password);
103  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
104    delay(500);
105    Serial.print(".");
106  }
107  Serial.println("Wifi conectado!");
108  lcd.setCursor(0, 1);
109  lcd.print("Wifi conectado!");
110  ...

```

```

111 ThingSpeak.begin(cliente);
112 dht2.begin();
113 dht.begin();
114
115 // Configurar pines como salida
116 pinMode(pin_disparo, OUTPUT);
117 pinMode(pin_cruce_cero, INPUT);
118 pinMode(releBombillos, OUTPUT);
119 pinMode(relePinMoto, OUTPUT);
120 pinMode(relePinLED, OUTPUT);
121
122 // Apagar todos los relés al inicio (lógica inversa: HIGH desactiva)
123 digitalWrite(releBombillos, HIGH);
124 digitalWrite(relePinMoto, HIGH);
125 digitalWrite(relePinLED, HIGH);
126
127 // Configurar la interrupción
128 attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(pin_cruce_cero), isr, FALLING);
129
130 delay(3000);
131 lcd.clear();
132
133 scale.set_scale();
134 scale.tare(); // Resetear la escala a 0
135 long zero_factor = scale.read_average(); // Obtener una lectura de referencia
136 }
137
138 void loop() {
139     Tiempo_actual = millis(); // Tiempo actual
140
141     if (detectado) {
142         valor = map(Potencia, 0, 100, 7600, 10);
143         delayMicroseconds(valor);
144         digitalWrite(3, HIGH);
145         delayMicroseconds(100);
146         digitalWrite(3, LOW);
147         detectado = 0;
148
149         if (Tiempo_actual - Tiempo_previo >= 1000) {
150             Tiempo_previo = Tiempo_actual;
151
152             Temperatura = dht.readTemperature();
153
154             // Modo automático
155             PID_error = Temperatura - Setpoint;
156             Error_INT = Error_INT + PID_error * (1000 / 1000);
157             PID_value = Kc * (PID_error + (1 / Tao_I) * Error_INT);
158             if (PID_value < 0) PID_value = 0;
159             if (PID_value > 100) PID_value = 100;
160             Potencia = PID_value;
161
162             Serial.print(Potencia);
163             Serial.print(" ");
164             Serial.print(Temperatura);
165             Serial.println();
166         }
167     }
168 }

```

```

169     delay(2000);
170     t2 = leerDHT2(); // Leer DHT y obtener temperatura
171     calcularTiempoRestanteRiego(t2); // Mostrar tiempo restante y datos en LCD
172     controlarLucesLED(); // Controlar las luces LED según la hora
173     ThingSpeak.writeFields(channelID, WriteAPIKey);
174     Serial.println("Datos enviados a ThingSpeak!");
175     leerCeldaCarga(); // Leer celda de carga y enviar datos a ThingSpeak
176     delay(5000);
177 }
178
179 float leerDHT2() {
180     t2 = dht2.readTemperature();
181     h2 = dht2.readHumidity();
182
183     // HORA ACTUAL
184     DateTime now = rtc.now();
185     Serial.print(now.hour(), DEC);
186     Serial.print(':');
187     Serial.print(now.minute(), DEC);
188     Serial.print(':');
189     Serial.print(now.second(), DEC);
190     Serial.println();
191
192     lcd.setCursor(0, 0);
193     lcd.print("T:");
194     lcd.print(t2, 1);
195     lcd.print("C");
196     lcd.print("-H:");
197     lcd.print(h2, 1);
198     lcd.print("%");
199
200     while (isnan(t2) || isnan(h2)) {
201         Serial.println("Lectura fallida en el sensor DHT11, repitiendo lectura...");
202         lcd.setCursor(0, 1);
203         lcd.print("DHT Error! ");
204         delay(2000);
205         t2 = dht2.readTemperature();
206         h2 = dht2.readHumidity();
207     }
208
209     Serial.print("Temperatura DHT11: ");
210     Serial.print(t2);
211     Serial.println(" °C.");
212
213     Serial.print("Humedad DHT11: ");
214     Serial.print(h2);
215     Serial.println(" %.");
216
217     // Control de bombillos
218     if (t2 < 15) {
219         digitalWrite(releBombillos, LOW); // Encender bombillos
220         Serial.println("Bombillos activados!");
221     } else {
222         digitalWrite(releBombillos, HIGH); // Apagar bombillos
223         Serial.println("Bombillos desactivados!");
224     }

```

```

226     if (t2 >= 16 && t2 <= 24) {
227         digitalWrite(releBombillos, HIGH);
228         Serial.println("Temperatura ideal alcanzada, bombillos desactivados!");
229     }
230
231     return t2;
232 }
233
234 void calcularTiempoRestanteRiego(float t2) {
235     DateTime now = rtc.now();
236     int currentHour = now.hour();
237     int currentMinute = now.minute();
238
239     // Calculamos la próxima hora de riego múltiplo de 2
240     int nextRiegoHour = (currentHour % 2 == 0) ? currentHour + 2 : currentHour + (2 - currentHour % 2);
241     if (nextRiegoHour >= 24) {
242         nextRiegoHour -= 24; // Ajustar para ciclos de 24 horas
243     }
244
245     // Tiempo restante en minutos
246     int remainingHours = nextRiegoHour - currentHour;
247     if (remainingHours < 0) remainingHours += 24;
248     int remainingMinutes = (60 - currentMinute) % 60;
249
250     // Mostrar en monitor serie y LCD
251     Serial.print("Tiempo restante para el próximo riego: ");
252     Serial.print(remainingHours);
253     Serial.print(" horas y ");
254     Serial.print(remainingMinutes);
255     Serial.println(" minutos.");
256
257     lcd.setCursor(0, 1);
258     lcd.print("Riego en: ");
259     lcd.print(remainingHours);
260     lcd.print("h ");
261     lcd.print(remainingMinutes);
262     lcd.print("m ");
263 }
264
265 void controlarLucesLED() {
266     DateTime now = rtc.now();
267     int currentHour = now.hour();
268
269     // Encender LEDs entre las 18:00 y las 6:00
270     if (currentHour >= 18 && currentHour < 24) {
271         digitalWrite(relePinLED, LOW); // Encender LEDs
272         Serial.println("Luces LED activadas (noche).");
273     } else {
274         digitalWrite(relePinLED, HIGH); // Apagar LEDs
275         Serial.println("Luces LED desactivadas (día).");
276     }
277 }
278
279 void leerCeldaCarga() {
280     // Generar un valor aleatorio entre 7 y 7.5 kg
281     float units = random(7000, 7500) / 1000.0; // Genera un número entre 7000 y 7500 y lo convierte a kg
282     float ounces = units * 0.035274; // Convertir a onzas
283     ---

```



```

283
284 // Mostrar el valor simulado en el monitor serie
285 Serial.print("Lectura simulada: ");
286 Serial.print(units);
287 Serial.print(" kg");
288 Serial.println();
289
290 // Enviar los datos a ThingSpeak
291 if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
292     WiFiClient client;
293     const int httpPort = 80;
294
295     if (!client.connect("api.thingspeak.com", httpPort)) {
296         Serial.println("Error al conectar con ThingSpeak");
297         return;
298     }
299
300     // Construir la URL con múltiples campos
301     String url = "/update?api_key=";
302     url += WriteAPIKey;
303     url += "&field1=" + String(t2); // Temperatura
304     url += "&field2=" + String(h2); // Humedad
305     url += "&field3=" + String(units); // Peso simulado en kg
306
307     Serial.print("Requesting URL: ");
308     Serial.println(url);
309
310     // Enviar solicitud HTTP
311     client.print(String("GET ") + url + " HTTP/1.1\r\n" +
312                 "Host: api.thingspeak.com\r\n" +
313                 "Connection: close\r\n\r\n");
314
315     delay(10); // Espera para asegurar que la solicitud se procese
316     Serial.println("Datos enviados a ThingSpeak");
317 } else {
318     Serial.println("Error de conexión WiFi");
319 }
320 }

```