



**EDUCACIÓN**

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

# Tecnológico Nacional de México

Centro Nacional de Investigación  
y Desarrollo Tecnológico

## Tesis de Maestría

Diseño de un Sistema Hidropónico con Monitoreo de  
las Variables del Proceso

presentada por

**Ing. Lizbeth Vidal Cortez**

como requisito para la obtención del grado de  
**Maestra en Ciencias de la Ingeniería**

Directores de tesis

**Dr. Carlos Manuel Astorga Zaragoza**

**Dr. Juan Reyes Reyes**

Cuernavaca, Morelos, México. Febrero de 2025.



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo tecnológico  
Subdirección Académica

Cuernavaca Mor, 14/febrero/2025

Oficio No. SAC/064/2025

Asunto: Autorización de impresión de tesis

**LIZBETH VIDAL CORTEZ**  
**CANDIDATA AL GRADO DE MAESTRA EN**  
**CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**  
**P R E S E N T E**

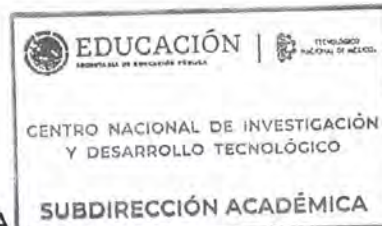
Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado "Diseño de un sistema hidropónico con monitoreo de las variables del proceso", ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

**A T E N T A M E N T E**

*Excelencia en Educación Tecnológica®*  
*"Conocimiento y Tecnología al Servicio de México"*

**CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA**  
**SUBDIRECTOR ACADÉMICO**



c.c.p. Coordinación de Ingeniería  
Departamento de Servicios Escolares

CMAZ/lmz



**2025**  
Año de  
**La Mujer**  
**Indígena**

Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira,  
C. P. 62490, Cuernavaca, Morelos Tel. 01 (777) 3627770, ext. 4104,  
e-mail: acad\_cenidet@tecnm.mx tecnm.mx | cenidet.tecnm.mx





**Educación**  
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo tecnológico  
Coordinación de Ciencias de la Ingeniería

Cuernavaca, Mor., 10/febrero/2025

OFICIO No. MCI/027/2025

Asunto: Aceptación de documento de tesis  
CENIDET-AC-004-M14-OFICIO

**DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA**  
**SUBDIRECTOR ACADÉMICO**  
**PRESENTE**

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial de la C. Lizbeth Vidal Cortez con número de control M23CE039, de la Maestría en Ciencias de la Ingeniería, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis de grado titulado "Diseño de un sistema hidropónico con monitoreo de las variables del proceso" y hemos encontrado que se han atendido todas las observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

Dr. Carlos Manuel Astorga Zaragoza  
Director de tesis

Dr. Jesús Arcelanda

Revisor 1

Dr. Juan Reyes Reyes  
Codirector de tesis

Dra. Gloria Lilia Osorio Gordillo  
Revisor 2

C.c.p. Depto. Servicios Escolares,  
Expediente / Estudiante  
Iniciales AMR/mrsr



**2025**  
Año de  
**La Mujer**  
**Indígena**

Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira,  
C. P. 62490, Cuernavaca Morelos Tel. 01 (777) 3627770, ext. 3209,  
e-mail: dir\_cenidet@tecnm.mx tecnm.mx | cenidet.tecnm.mx



---

# Dedicatoria

---

A Dios por permitirme llegar a este punto de mi vida, el cual es realizar otro logro profesional, brindándome la sabiduría necesaria para cumplir y terminar mi posgrado.

A mis padres Saturnina Cortez Reyes y Rafael Vidal Lerma les dedico esta tesis con todo mi amor, son mi mayor ejemplo de amor, esfuerzo y perseverancia. Gracias por cada sacrificio, por su apoyo incondicional y por enseñarme que los sueños se alcanzan con trabajo y dedicación, este logro que hoy celebro no habría sido posible sin su apoyo pero sobre todo sin su amor incondicional, los amo y los amare toda mi vida.

A mis hermanos Rafael y Erick Vidal Cortez, este logro también es para ustedes, son mis dos personas favoritas porque con ustedes comparto un lazo inquebrantable de amor y complicidad. Su compañía ha sido un pilar fundamental en mi vida y su confianza en mí me ha impulsado a seguir adelante en cada desafío.

A mi abuela, que con su amor y enseñanzas me ha dejado una huella imborrable, dandome un ejemplo de fortaleza y bondad.

A quienes partieron antes de tiempo, Maria Magdalena Cortez Reyes †, Anselmo Cortez Morales †, Baldomero Vidal Martínez †, Emilia Lerma Martínez † y Luis Felipe García Castillo †, quienes viviran eternamente en mi corazón. Sus recuerdos son luz en mi camino y su legado me inspira a ser mejor cada día.

Y, sobre todo, a quienes han creído en mí cuando yo misma dudaba, a quienes han sido faro en la tormenta y motivación constante para seguir adelante. Esta tesis es el reflejo del esfuerzo conjunto y el cariño que me han brindado.

Con amor y gratitud infinita, Lizbeth Vidal Cortez.

---

# Agradecimientos

---

Doy gracias a Dios, por haberme permitido terminar satisfactoriamente este trabajo de tesis, por guiar mis pasos, por darme vida, por darme salud y por ponerme en el camino correcto. Agradezco por tantas bendiciones que han acompañado mi vida, nada de esto sería posible.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt) por el apoyo económico brindado durante la realización de mis estudios de maestría, gracias a su contribución financiera fue posible mi desarrollo académico, al proporcionarme un sustento y tener la oportunidad de realizar mi posgrado.

Al Tecnológico Nacional de México (TecNM) y al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) por recibirme y darme la oportunidad de realizar mis estudios de maestría y proporcionarme las herramientas y habilidades necesarias para mi formación académica.

Agradezco a mis padres Saturnina Cortez Reyes y Rafael Vidal Lerma, por el inmenso amor que me otorgan, su cariño, sus sabios consejos a lo largo de mi vida, por apoyarme incondicionalmente en todo momento, y por inculcarme los valores esenciales para avanzar y alcanzar mis metas y objetivos profesionales. Gracias por siempre estar conmigo y brindarme un sustento para perseguir mis sueños. Son mi mayor orgullo y ejemplo en la vida. Agradezco profundamente sus enseñanzas y su amor eterno.

A mis hermanos Rafael y Erick Vidal Cortez, quiero expresarles mi más profundo agradecimiento. Gracias por estar siempre a mi lado, por compartir alegrías, retos y momentos difíciles. Su apoyo y cariño han sido esenciales en mi vida. Ustedes son mis compañeros de vida y mis mejores amigos. Sé que siempre podemos contar el uno con el otro, y eso me llena de felicidad, gratitud y fortaleza.

A mis asesores Dr. Carlos Manuel Astorga Zaragoza y Dr. Juan Reyes Reyes, quiero agradecerles por todo, pero principalmente por brindarme las herramientas necesarias a lo largo de este tiempo, por haberme orientado en este proceso, por sus enseñanzas, su apoyo constante y amistad. Expreso mi sincero agradecimiento por creer en mí, por sus valiosos consejos, conocimientos y contribuciones personales y profesionales que serán fundamentales en cada etapa de mi desarrollo académico y personal.

A mis revisores, el Dr. Jesús Arce Landa y la Dra. Gloria Lilia Osorio Gordillo, por su interés en evaluar mi trabajo. Agradezco por brindarme sus valiosos consejos y observaciones realizadas durante este transcurso de mis estudios de maestría. Gracias a ustedes logré obtener mejores resultados de este trabajo de tesis. Ustedes han sido piezas clave en mi formación. Agradezco su amistad y compromiso.

Al Dr. Rodolfo Amalio Vargas Méndez por apoyarme con su contribución y por brindarme herramientas que han sido de gran ayuda para la realización de la investigación. Gracias por su dedicación y por haberme transmitido no solo conocimientos, sino también pasión por aprender y crecer. Agradezco su amistad y compromiso.

A mis amigos: Marlem Carvajal, Fidelina Hernández, Angel Serrano, Jazmín Jiménez, Reyna Martínez, Emmanuel Rebolledo, Yen Ventura, Marisol C. Jiménez, gracias por su amistad y apoyo incondicional, gracias por las risas y por la complicidad en cada momento que vivimos juntos. Todos ustedes han hecho de este viaje algo aún más especial. Ustedes son como una familia para mí, siempre tendrán un pedacito de mi corazón, porque son la familia que elegí.

A mis compañeros y amigos del CENIDET, Karime, Daniela, Andrea, Noel, Antonio, por brindarme su amistad incondicional. Gracias a Elías, Carlos y Alan por brindarme su apoyo al enseñarme y realizar actividades fundamentales para el desarrollo de la investigación.

A todos, gracias de corazón por ser parte de mi vida. Gracias a cada uno por brindarme poco o mucho durante este tiempo y aportar un granito de arena para motivarme a la realización de este proyecto. Gracias por creer en mí y siempre brindarme su amistad. Cuídense mucho y espero encontrarnos de nuevo.

Finalmente, quiero agradecerme por el esfuerzo, la dedicación y la perseverancia que he puesto en cada paso de este camino. He llegado hasta aquí gracias a mi compromiso y mi pasión por aprender, y sé que todo lo que he logrado no ha sido fácil, pero ha sido posible gracias a mi determinación. A mí promesa, pero sobre todo por resistir y cumplir cada objetivo y meta que me propongo.

---

# Índice general

---

Índice de figuras	VII
Índice de tablas	IX
Nomenclatura	XII
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes . . . . .	2
1.2. Estado del arte . . . . .	3
1.3. Planteamiento del problema . . . . .	5
1.4. Justificación . . . . .	5
1.5. Objetivos . . . . .	6
1.5.1. Objetivo general . . . . .	6
1.5.2. Objetivos particulares . . . . .	6
1.6. Alcances . . . . .	6
1.7. Aportación . . . . .	6
1.8. Ventajas y Dificultades . . . . .	7
1.8.1. Ventajas . . . . .	7
1.8.2. Dificultades . . . . .	7
1.9. Organización del documento . . . . .	8
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>9</b>
2.1. Sistemas hidropónicos . . . . .	9
2.1.1. Sistema de Recirculación . . . . .	10
2.1.1.1. Sistema de Raíz flotante . . . . .	10
2.1.1.2. Sistema DFT (Técnica de flujo profundo) . . . . .	11
2.1.1.3. Sistema NFT (Técnica de película de nutrientes) . . . . .	12
2.1.2. Sistema en Sustrato . . . . .	13
2.1.2.1. Sistema Acuapónico . . . . .	14
2.1.2.2. Sistema de Flujo o reflujo . . . . .	15
2.1.2.3. Sistema de Goteo . . . . .	15
2.1.2.4. Sistema de Mecha o (pabilo) . . . . .	16
2.1.3. Sistema de Aeroponía . . . . .	17
2.2. Tipos de hortalizas en hidroponía . . . . .	18
2.2.1. Lechuga . . . . .	19
2.2.2. Chile Habanero . . . . .	20
2.3. Siembra . . . . .	22
2.3.1. Germinación en almacigo . . . . .	22

2.3.2.	Proceso de germinado . . . . .	22
2.3.3.	Ciclos de cosecha . . . . .	24
2.4.	Sustratos . . . . .	24
2.4.1.	Perlita . . . . .	25
2.5.	Solución nutritiva . . . . .	26
2.6.	Variables que intervienen en los sistemas hidropónicos . . . . .	28
2.7.	Modelo dinámico propuesto . . . . .	30
2.7.1.	Desarrollo del modelo dinámico de un tanque con desbordamiento . . . . .	32
2.8.	Energía renovable . . . . .	33
2.8.1.	Potencia hidráulica de bomba . . . . .	33
2.8.2.	Consumo de energía . . . . .	34
<b>3.</b>	<b>Diseño del sistema hidropónico</b>	<b>36</b>
3.1.	Diseño esquemático . . . . .	37
3.2.	Diseño en 2D . . . . .	39
3.3.	Diseño en 3D . . . . .	39
3.4.	Especificaciones de los materiales . . . . .	41
3.5.	Manual usuario . . . . .	43
3.6.	Construcción del prototipo . . . . .	44
3.6.1.	Montaje del sistema hidropónico . . . . .	46
<b>4.</b>	<b>Resultados de la Implementación del Sistema Hidropónico</b>	<b>48</b>
4.1.	Modelo del tanque hidropónico con desbordamiento . . . . .	48
4.1.1.	Modelo dinámico y Simulación del sistema de tanques del prototipo . . . . .	49
4.1.2.	Resultados de simulación . . . . .	50
4.1.2.1.	Circuito hidráulico con 4 tanques acoplados . . . . .	51
4.1.3.	Simulación de los tanques superiores $1_a$ y $2_a$ . . . . .	51
4.1.3.1.	Conclusión de las simulaciones de los tanques $1_a$ y $2_a$ . . . . .	52
4.1.4.	Simulación de los Tanques inferiores $1_b$ y $2_b$ . . . . .	52
4.1.4.1.	Conclusión de las simulaciones de los tanques $1_b$ y $2_b$ . . . . .	52
4.2.	Construcción y adecuaciones del prototipo . . . . .	54
4.2.1.	Construcción del Prototipo . . . . .	54
4.2.2.	Modificación 1 del Prototipo . . . . .	55
4.2.3.	Modificación 2 del Prototipo . . . . .	56
4.2.4.	Modificación 3 del Prototipo . . . . .	58
4.2.4.1.	Demanda Energética de consumo del prototipo . . . . .	62
4.3.	Instrumentación del prototipo . . . . .	64
4.3.1.	Análisis comparativo de los sensores disponibles . . . . .	64
4.3.2.	Análisis del sensor seleccionado (pH-W3988) para el sistema hidropónico . . . . .	66
4.3.3.	Instrumentación del prototipo . . . . .	67
4.3.3.1.	Calibración del sensor pH-W3988 . . . . .	68
4.3.4.	Gráficas de los datos obtenidos . . . . .	69
4.4.	Implementación funcional: Cosecha de Chiles habaneros . . . . .	71
4.4.1.	Experimentación . . . . .	72
4.4.1.1.	Imágenes del proceso de la experimentación . . . . .	73



<b>5. Conclusiones</b>	<b>75</b>
5.1. Conclusiones . . . . .	75
5.2. Actividades futuras . . . . .	76
5.2.1. Análisis de un sistema hidropónico automatizado . . . . .	76
<b>Referencias</b>	<b>77</b>
<b>A. ANEXOS</b>	<b>83</b>
A.1. Anexo A . . . . .	83
A.2. Anexo B . . . . .	84
A.3. Artículo publicado . . . . .	86
A.4. Retribución social . . . . .	88

---

# Índice de figuras

---

2.1. Tipos de sistemas hidropónicos. . . . .	9
2.2. Sistema de raíz flotante . . . . .	10
2.3. Sistema de Técnica de flujo profundo (DFT) . . . . .	11
2.4. Sistema de Técnica de Película de Nutrientes (NFT) . . . . .	12
2.5. Sistema acuapónico . . . . .	14
2.6. Sistema de flujo o reflujo . . . . .	15
2.7. Sistema de goteo . . . . .	16
2.8. Sistema de mecha o pabilo . . . . .	16
2.9. Sistema de aeroponía . . . . .	17
2.10. Hortalizas adaptables en la hidroponía . . . . .	18
2.11. Experimentación del germinado de lechugas . . . . .	23
(a). Siembra de lechuga . . . . .	23
(b). Germinado de lechuga . . . . .	23
2.12. Experimentación del germinado de chile habanero . . . . .	23
(a). Germinado de chile . . . . .	23
(b). Crecimiento de chile . . . . .	23
2.13. Sustrato Perlita . . . . .	26
2.14. Nutrientes comerciales . . . . .	27
2.15. Variables a monitorear en el sistema hidropónico. . . . .	28
2.16. Temperatura del día y de la noche . . . . .	29
2.17. Diagrama esquemático de un tanque de agua. . . . .	31
3.1. Esquema del diseño hidropónico . . . . .	37
3.2. Diseño axial del tanque hidropónico . . . . .	38
3.3. Vista axial interior del tanque hidropónico . . . . .	38
3.4. Dimensiones de las canastillas hidropónicas . . . . .	38
3.5. Esquema en 2D del sistema hidropónico . . . . .	39
3.6. Diseño 3D del sistema hidropónico . . . . .	40
3.7. Vista 3D lateral . . . . .	40
3.8. Vista 3D superior . . . . .	41
3.9. Vista 3D frontal . . . . .	41
3.10. Actividades a realizar para la construcción del prototipo del sistema hidropónico . . . . .	44
3.11. Construcción y ensamblaje del prototipo hidropónico. . . . .	45
3.12. Montaje del prototipo del sistema hidropónico NFT . . . . .	46
4.1. Diagrama esquemático de un tanque del sistema hidropónico. . . . .	49
4.2. Circuito hidráulico . . . . .	51
4.3. Gráficas de llenado del tanque 1a, 1b, 2a y 2b . . . . .	53

4.4. Gráfica del flujo de entrada y salida de agua. . . . .	54
4.5. Trasplante al sistema hidropónico . . . . .	54
4.6. Plántulas en crecimiento . . . . .	55
4.7. Sistema con la malla sombra . . . . .	56
4.8. Llave de desfogue de agua . . . . .	56
4.9. Diagrama físico de la instalación del panel solar . . . . .	57
4.10. Panel solar . . . . .	58
4.11. Bomba solar . . . . .	58
4.12. Controlador y batería . . . . .	58
4.13. Diagrama de la instalación del panel solar . . . . .	59
4.14. Instalación del segundo panel solar. . . . .	59
4.15. Controlador, batería e inversor de corriente. . . . .	60
4.16. Funcionamiento del sistema con el panel solar . . . . .	60
4.17. Sensor seleccionado . . . . .	67
4.18. Sistema instrumentado . . . . .	68
4.19. Calibración del sensor pH-W3988. . . . .	69
4.20. Medición de datos obtenidos de pH . . . . .	70
4.21. Medición de datos obtenidos de Temperatura en la solución nutritiva y ambiental . . . . .	70
4.22. Medición de datos obtenidos de la conductividad eléctrica, el total de solidos disueltos y salinidad . . . . .	71
4.23. Medición de datos obtenidos de humedad relativa . . . . .	71
4.24. Producción de chiles habaneros cosechados semanalmente . . . . .	72
4.25. Sistema hidropónico en funcionamiento . . . . .	73
4.26. Etapa de floración y crecimiento (junio-julio) . . . . .	73
4.27. Etapa de madurez del cultivo y cosecha (julio-agosto) . . . . .	73
4.28. Etapa de producción continua (agosto-septiembre) . . . . .	74
A.1. Curso impartido en el 3er Congreso Internacional de Tecnología y Ciencia Aplicada (CITCA)	83
A.2. Medidas laterales . . . . .	83
A.3. Ángulos de las piezas . . . . .	84
A.4. Curso impartido en el 3er Congreso Internacional de Tecnología y Ciencia Aplicada (CITCA)	88

---

# Índice de tablas

---

2.1. Tipos de hortalizas utilizables en hidroponía . . . . .	19
2.2. Ciclos recomendados para siembra y cosecha de hortalizas (S= Siembra, C= Cosecha). . .	24
2.3. Tipos de sustrato . . . . .	25
2.4. Importancia de los nutrientes para la solución nutritiva . . . . .	27
2.5. Porcentaje de nutrientes utilizados . . . . .	28
2.6. Ajuste de pH . . . . .	29
2.7. Temperatura en la solución nutritiva . . . . .	29
2.8. Rango para el cultivo hidropónico . . . . .	30
3.1. Materiales para el sistema hidropónico . . . . .	42
3.2. Herramientas y accesorios . . . . .	42
3.3. Lista de las piezas a utilizar para la construcción y montaje del sistema hidropónico . . .	43
4.1. Variables para la entrada y salida de flujo de los tanques . . . . .	50
4.2. Funcionamiento de los componentes . . . . .	61
4.3. Demanda energética . . . . .	62
4.4. Comparación de sensores . . . . .	64
4.5. Comparativa de características de los sensores . . . . .	66

---

# Resumen

---

En este trabajo de tesis se presenta el diseño y desarrollo de un prototipo de un sistema hidropónico monitoreado para el cultivo de hortalizas, con el objetivo de mejorar el crecimiento y rendimiento de los cultivos hidropónicos mediante la supervisión de variables clave, como la concentración de nutrientes en la solución, el nivel de agua y la temperatura.

En esta tesis, se presentan los métodos para la implementación de sistemas hidropónicos que son una forma innovadora de cultivar plantas sin tierra, utilizando soluciones nutritivas o sustratos inertes. Estas técnicas aseguran que la planta obtenga todos los nutrientes necesarios de la solución acuosa. Hay varios tipos de técnicas hidropónicas que ofrecen ventajas en términos de control y eficiencia de recursos, aunque también presentan desafíos técnicos y de inversión inicial. Su uso es cada vez más común en la producción alimentaria moderna.

El sistema hidropónico monitoreado está equipado con sensores que miden la concentración de nutrientes en la solución, la humedad del sustrato, la salinidad y el total de sólidos disueltos. Además, se implementa un sistema de monitoreo que recopila datos para garantizar las condiciones ideales del cultivo hidropónico.

El beneficio de contar con un sistema hidropónico monitoreado radica en la mejora de la eficiencia del cultivo, el ahorro de recursos hídricos y la posibilidad de obtener cosechas más saludables y abundantes. El monitoreo permite mejorar el uso de nutrientes y energía, brindando un entorno sustentable que favorezca el desarrollo de las plantas y, en última instancia, aumentar la producción de alimentos de manera sostenible.

Palabras clave: *hidroponía, nutrientes, horticultura, monitoreo, variables de intervención en el proceso, cultivo sin suelo, crecimiento de plantas.*

---

# Abstract

---

This thesis work presents the design and development of a prototype of a monitored hydroponic system for the cultivation of vegetables, with the objective of improving the growth and yield of vegetables. monitored hydroponic system for vegetable cultivation, with the objective of improving the growth and yield of hydroponic crops by growth and yield of hydroponic crops by monitoring key variables such as nutrient concentration in the solution, water level and solution, water level and temperature.

In this thesis, methods for the implementation of hydroponic systems are presented, which are an innovative way to grow plants without soil, using nutrient solutions or inert substrates. innovative way of growing plants without soil, using nutrient solutions or inert substrates. These techniques ensure that the plant obtains all the necessary nutrients from the aqueous solution. There are several types of hydroponic There are several types of hydroponic techniques that offer advantages in terms of control and resource efficiency, but also present technical and initial investment challenges. also present technical and initial investment challenges. Their use is increasingly common in modern food production. food production.

The monitored hydroponic system is equipped with sensors that measure the concentration of nutrients in the solution, substrate moisture, salinity and total dissolved solids. in the solution, substrate moisture, salinity and total dissolved solids. In addition, a monitoring system a monitoring system that collects data to ensure ideal hydroponic growing conditions.

The benefit of having a monitored hydroponic system lies in the improvement of crop efficiency, the saving of water resources and the possibility of obtaining healthier and more abundant harvests. The benefit of having a monitored hydroponic system lies in improved crop efficiency, savings in water resources and the possibility of obtaining healthier and more abundant harvests. Monitoring allows for improved nutrient and energy use, providing a sustainable environment that favors plant development and plant development and, ultimately, increase food production in a sustainable manner. sustainable manner.

Key words: *hydroponics, nutrients, horticulture, monitoring, process intervention variables, soilless culture, plant growth.*

---

# Nomenclatura

---

## Abreviaturas

<b>NFT</b>	Técnicas de película nutritiva.
<b>DFT</b>	Técnica de flujo profundo.
<b>DWC</b>	Cultura de aguas profundas.
<b>AP</b>	Acuaponía.
<b>ODS</b>	Objetivos de desarrollo sostenible
<b>2D</b>	Segunda dimensión
<b>3D</b>	Tercera dimensión
<b>pH</b>	Potencial de hidrógeno.
<b>CE</b>	Conductividad eléctrica.
<b>TDS</b>	Total de sólidos disueltos
<b>S.G.</b>	Gravedad específica.

# Capítulo 1

---

## Introducción

---

La agricultura enfrenta desafíos cada vez mayores debido a la reducción de tierras cultivables, el cambio climático y el incremento en la demanda de alimentos. En este contexto, la hidroponía surge como una alternativa viable para la producción sostenible de cultivos sin la necesidad de suelo, mejorando el uso del agua y los nutrientes. Este sistema de cultivo, que utiliza soluciones nutritivas para proporcionar los elementos esenciales a las plantas, ha demostrado ser altamente eficiente en la producción agrícola, permitiendo el crecimiento de hortalizas en entornos urbanos.

La presente investigación tiene como objetivo diseñar, construir e instrumentar un sistema hidropónico con monitoreo de sus variables clave, con el fin de evaluar su impacto en el crecimiento de hortalizas. Se enfoca en la implementación de tecnologías de monitoreo en tiempo real que permitan supervisar los factores ambientales, tales como la temperatura y la humedad. De esta manera, se busca mejorar la eficiencia del proceso y contribuir a la sostenibilidad agrícola mediante el uso de energías renovables para el funcionamiento del sistema.

Los antecedentes de la hidroponía se remontan a civilizaciones antiguas como los aztecas, quienes desarrollaron las chinampas como un método temprano de cultivo sin suelo. En la actualidad, la hidroponía ha evolucionado significativamente gracias a los avances en automatización y monitoreo de nutrientes. En México, el uso de estos sistemas es cada vez más común, especialmente en regiones con condiciones climáticas adversas, donde la agricultura convencional enfrenta múltiples limitaciones.

Uno de los principales beneficios de la hidroponía es su capacidad para reducir el consumo de agua en comparación con la agricultura tradicional. Mientras que los cultivos convencionales requieren grandes volúmenes de agua para el riego, los sistemas hidropónicos recirculan la solución nutritiva, evitando desperdicios y minimizando el impacto ambiental. Además, permiten una producción más controlada y libre de enfermedades del suelo, garantizando una mayor calidad y rendimiento de las hortalizas.

A pesar de sus ventajas, la implementación de sistemas hidropónicos también presenta desafíos. Entre ellos, destacan los costos iniciales de instalación, la necesidad de capacitación especializada y la selección adecuada de nutrientes para cada tipo de cultivo. En este sentido, el monitoreo de variables como la conductividad eléctrica es fundamental para garantizar un crecimiento adecuado de las plantas.

El presente estudio se llevará a cabo en la zona sur de Cuernavaca, Morelos, donde se analizarán distintos tipos de hortalizas aptas para el cultivo hidropónico en esta región. Se evaluará la eficiencia del sistema mediante el uso de sensores que permitirán la adquisición y procesamiento de datos en tiempo real. De esta manera, se pretende no solo mejorar la producción agrícola, sino también generar conocimiento que pueda ser aplicado en futuras investigaciones y proyectos de desarrollo sostenible.



Con esta investigación, se espera aportar al cumplimiento de varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), incluyendo el ODS 2 (Hambre Cero), el ODS 7 (Energía Asequible y No Contaminante), el ODS 9 (Industria, Innovación e Infraestructura), el ODS 11 (Ciudades y Comunidades Sostenibles) y el ODS 12 (Producción y Consumo Responsables). En este sentido, la hidroponía representa una alternativa innovadora para enfrentar los retos actuales en la producción de alimentos y la conservación de los recursos naturales

## 1.1. Antecedentes

La agricultura protegida es el término utilizado para describir una serie de técnicas de cultivo que controlan totalmente el microclima que rodea el cuerpo vegetal dependiendo de la especie durante su período de crecimiento. Estas técnicas contrastan con el escenario actual sin cambios en el campo, que hace referencia a técnicas más tradicionales sobre suelos naturales y con luz solar directa, viento, lluvia, patógenos y otros elementos de la producción. La Asociación Mexicana de Agricultura Protegida informa que la producción está concentrada en unos pocos productos: 70 % de tomate, 16 % de pimientos, 10 % de pepinos y menos de 2 % de bayas. La agricultura protegida en México se divide en tres categorías: invernaderos de tecnología alta, invernaderos de tecnología baja y casas sombra, y una cuarta categoría intermedia, dependiendo de la tecnología utilizada (Pratt y cols., 2019).

En México, los orígenes de la hidroponía son los jardines flotantes de los aztecas, llamados chinampas. Las chinampas se construían con cañas y bejucos que flotaban en el lago de Tenochtitlán, además se rellenaban con lodo extraído de este (INTAGRI, 2017). En 1938 W.F. Gericke, profesor de la Universidad de California, estableció con éxito unidades comerciales de cultivo sobre el suelo, dando nombre al sistema productivo hidropónico y es considerado como el padre de esta moderna técnica de cultivo (Tagle y cols., 2018). La productividad de los recursos naturales es esencial y garantiza su sostenibilidad. La relevancia de los indicadores de eficiencia en el uso del agua para evaluar la eficiencia de los sistemas agrícolas irrigados (Sánchez Cohen y cols., 2006).

Además, la hidroponía permite un control preciso de los nutrientes que reciben las plantas, asegurando un suministro adecuado para un crecimiento saludable. Esto conduce a un uso más eficiente de los recursos, ya que las plantas toman solo lo que necesitan, reduciendo el desperdicio de agua y nutrientes en comparación con la agricultura convencional (Barbado, 2005).

El concepto de evapotranspiración se introdujo para estudiar la demanda de evapotranspiración de la atmósfera en una localidad y época del año específicas, independientemente del tipo y desarrollo del cultivo, ni de los factores del suelo y de las prácticas de manejo. Los únicos factores que afectan la evapotranspiración son los parámetros climáticos (Feinstein, 2022).

Los factores que afectan la evapotranspiración son debido a el clima, las características del cultivo, el manejo y el medio de desarrollo son factores que afectan la evaporación y la transpiración. Los principales parámetros climáticos que afectan la evapotranspiración son la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento. La evapotranspiración del cultivo representa la pérdida de agua de una superficie cultivada estándar. El tipo de cultivo, la variedad y la etapa de desarrollo deben ser considerados cuando se evalúa la evapotranspiración de cultivos que se desarrollan en áreas grandes. Las diferencias en resistencias a la transpiración, la altura del cultivo, la rugosidad del cultivo, el reflejo, la cobertura del suelo y las características radiculares del cultivo (G Allen y cols., 2006).

La eficiencia de cultivos agrícolas evaluando el número, longitud y tamaño de hoja, área foliar e índice estomático; así como fósforo, prolina, y los carotenoides en toda la plántula. A juzgar por los parámetros de la hoja, el cultivo provoca un mejor crecimiento que las otras dos técnicas, cuyos resultados bioquímicos no respaldan esta afirmación (Ochoa-Noriega y cols., 2020). El desarrollo de la hidroponía ha exigido la necesidad de un sistema hidropónico automatizado. Actualmente, no hay muchas herramientas disponibles y las que existen tienen deficiencias significativas en el uso del tiempo real, se propone un método para utilizar datos en tiempo real para influir en los pasos (Adhau y cols., 2017).

En los sistemas hidropónicos, se exploran los fundamentos de esta técnica de cultivo, sus tipos más comunes, los beneficios que ofrece y algunas consideraciones clave para implementar con éxito un sistema hidropónico. Desde la antigüedad hasta la actualidad, la hidroponía ha evolucionado y se ha adaptado a las necesidades de la agricultura sostenible y su crecimiento continuo, promete desempeñar un papel crucial en la producción de alimentos en el futuro (Sánchez, 1982).

## 1.2. Estado del arte

El estudio del estado del arte consta de dos secciones, en la primera sección, se aborda una revisión de la literatura sobre trabajos que tienen que ver con los nutrientes utilizados que se han aplicado en la hidroponía. En la segunda sección, se revisan los trabajos en relación a la conductividad eléctrica con la solución nutritiva. La relación entre magnesio (Mg) y nitrógeno (N) en la solución nutritiva y su impacto en el rendimiento de pepino cultivado en un sistema hidropónico cerrado. Evalúa cómo las diferentes proporciones de Mg y N afectan la composición mineral de las plantas, la eficiencia en el uso de nutrientes, y el rendimiento de los frutos de pepino. Se analizan distintas combinaciones de concentraciones de Mg y N para optimizar el rendimiento, con resultados que sugieren que una relación equilibrada (20 % Mg y 60 % N) es la más eficiente en términos de rendimiento y uso de nutrientes. Las proporciones más altas de Mg y N reducen significativamente el rendimiento, lo que indica la importancia de mantener un balance adecuado de estos nutrientes en sistemas hidropónicos (Parra-Terraza y cols., 2022).

El impacto de la deficiencia de macronutrientes (Nitrógeno, Fósforo y Potasio) en el desarrollo de plantas de pimiento (*Capsicum annuum*) cultivadas en un sistema hidropónico. Su objetivo es investigar cómo la ausencia de estos elementos afecta el crecimiento y las funciones metabólicas en las primeras etapas fenológicas del pimiento. Proporcionar información sobre la importancia de los macronutrientes en el desarrollo temprano de las plantas, analizando variables como el peso fresco y seco, la altura de la planta, el área foliar, y la concentración de nutrientes en la parte aérea y las raíces (Enriquez y cols., 2022).

La importancia de realizar análisis químicos previos de los sustratos, ya que factores como el pH y el contenido de nutrientes pueden afectar significativamente la germinación de las semillas y el desarrollo inicial de las plántulas. El autor Dorigheo y cols. (2023) se enfoca en evaluar cómo diferentes sustratos afectan el desarrollo inicial de las plántulas de dos variedades de lechuga: lisa y crespa. Identifica qué tipo de sustrato proporcionan las mejores condiciones para el crecimiento de las plántulas, analizando parámetros como la altura de la parte aérea y radicular, el número de hojas y el peso de las plántulas.

El autor Costa y cols. (2001) se enfoca en evaluar el efecto de la conductividad eléctrica (CE) de la solución nutritiva en la producción y desarrollo de la lechuga americana (variedad Ryder) en un sistema de cultivo hidropónico. El objetivo principal es entender cómo diferentes niveles de CE (1.46, 2.46 y 4.21 mS/cm) afectan la absorción de agua y nutrientes por parte de la planta y cómo esto repercute en su metabolismo fisiología y finalmente en su rendimiento productivo. El estudio concluye que una CE de 2.46 mS/cm es el valor óptimo para maximizar la producción de lechuga, ya que este nivel proporcionó

los mejores resultados en términos de peso fresco y seco de las plantas.

La influencia de la conductividad eléctrica (CE) de una solución nutritiva en los cultivos de pimiento morrón (*Capsicum annuum* L.) cultivados en sistemas hidropónicos. El estudio evalúa cómo diferentes niveles de conductividad eléctrica (1.5, 2.0, 2.5 y 3.0 dS m<sup>-1</sup>) afectan el rendimiento del cultivo, la firmeza de los frutos y la cantidad de compuestos bioactivos. El autor Preciado-Rangel y cols. (2021) busca identificar el equilibrio óptimo entre la calidad y el rendimiento del cultivo, destacando la importancia de ajustar correctamente la CE para maximizar los beneficios nutricionales (compuestos bioactivos) sin afectar negativamente el rendimiento y la firmeza del fruto.

El efecto de la conductividad eléctrica (CE) de la solución nutritiva en la producción de pimiento morrón cultivado en un sistema hidropónico muestran que una conductividad eléctrica de 3 dS m<sup>-1</sup> o superior mejora la calidad nutracéutica de los pimientos, aumentando su contenido de antioxidantes y compuestos fenólicos. Sin embargo, también se observa una disminución en el rendimiento (peso y tamaño de los frutos) cuando la CE supera los 2 dS m<sup>-1</sup>, lo que sugiere un compromiso entre la mejora de la calidad del fruto y la cantidad de producción. El enfoque principal está en encontrar un balance entre mantener un rendimiento aceptable de los frutos y mejorar su calidad nutracéutica, considerando que una mayor CE puede aumentar los compuestos antioxidantes y fenólicos, pero al mismo tiempo disminuir el rendimiento total del cultivo (Pérez-Vazquez y cols., 2020).

El autor Bounnady y cols. (2022) se centra en el desarrollo de un sistema automatizado de control de nutrientes para cultivos hidropónicos utilizando tecnologías del Internet de las Cosas (IoT). El objetivo principal es mejorar la eficiencia en el crecimiento y producción de plantas mediante el uso de sensores (como los de pH y conductividad eléctrica). Los resultados mostraron que el sistema automatizado mantenía estos niveles más estables que el cultivo bajo cuidado humano. En términos de crecimiento, el sistema automatizado mostró una tasa de crecimiento del 99.04 %, frente al 95.38 % del método manual. Además, el rendimiento de la cosecha fue un 7.35 % mayor con el sistema automatizado, y el uso de nutrientes fue un 22.05 % menor comparado con el manejo tradicional.

Los autores Souza y Gimenes (2018) se enfocan en la viabilidad económica y financiera del uso de energía solar fotovoltaica en la producción hidropónica, principalmente en analizar si la implementación de sistemas de energía solar es una opción económicamente rentable para reducir los costos energéticos en la producción hidropónica.

Un sistema hidropónico, o hidroponía, es un método de cultivo de plantas que utiliza soluciones de nutrientes minerales del agua sin suelo. Para cultivar hortalizas de hoja en general, los principales sistemas hidropónicos utilizados son sistemas DFT (Técnica de flujo profundo) y en el sistema DFT, las soluciones nutritivas son suministradas a las plantas siempre que el nivel de agua en el cultivo esté por debajo del valor establecido, y recirculadas y suministradas a las raíces desnudas de las plantas, en tiempos constantes, en la cama de cultivo con una pendiente de 1/100 (Son y cols., 2020). Los sistemas NFT (Técnica de película nutritiva) y sistemas DFT modificados similares y un sistema de flujo y reflujo se han utilizado ampliamente en las fábricas (Castañares, 2020).

El componente hidropónico de AP (acuaponía) influye directamente en la calidad del agua y el consumo de agua de todo el sistema. Evaluando el papel del diseño y manejo de los componentes hidropónicos en el rendimiento general y el consumo de agua (Firdaus y cols., 2021). Las especies de plantas cultivadas en hidroponía influyeron en el contenido diario de agua en acuaponía, mientras que el tipo o el caudal de agua no tuvieron efecto en hidroponía Maucieri y cols. (2018).

Este sistema puede controlar importantes factores ambientales que afectan el crecimiento de las plantas, incluidos la temperatura, la humedad y el agua (Ani y Gopalakrishnan, 2020). El sistema de aplicación mezcla automáticamente la solución seleccionada al valor deseado y también recopila información sobre cuánta solución mezclada en el momento de la siembra se puede usar para estimar el costo de las hortalizas y calcule la rentabilidad de cada verdura que decida cultivar (Kularbphettong y cols., 2019).

Las plantas hidropónicas tienen diferentes tipos de medios como rockwell, esponja, polvo de coco y otros. En el tratamiento de plantas, Hidroponía, es muy a tener en cuenta el tiempo al agregar el agua para reponer los nutrientes, y sería muy inconveniente si planta (Helmy y cols., 2020). Para regar muchas plantas hidropónicas, es necesario hacer un sistema automático que pueda hidratar automáticamente el hidropónico cuando sea necesario. Con el desarrollo de la computadora, especialmente en microcontroladores, riego automático (Sihombing y cols., 2018).

DWC es una técnica que hace crecer las plantas entregando los nutrientes directamente a la raíz de las plantas hasta que se pueda cosechar. Usando esta técnica, la raíz de la planta siempre está sumergida en agua que contiene nutrientes y oxígeno (Saaid y cols., 2013). Sin embargo, esta técnica controla manualmente el pH del agua, lo que puede tener un efecto negativo en el crecimiento de las plantas. En esta encuesta, el nivel de pH en el agua será mantenido automáticamente por un microcontrolador y medido por un sensor. Luego, el período del nivel de pH comenzó a cambiar y se determinaron los efectos de la solución de ajuste sobre la solución acuosa (Saaid y cols., 2015). Se ha utilizado una red de sensores cableados convencional para la detección, seguimiento y control de la fertirrigación en invernaderos y cultivos. Sin embargo, en los últimos años, debido a la introducción de métodos de cultivo de hidroponía, la cantidad de sensores requeridos en los invernaderos ha aumentado dramáticamente y su monitoreo asociado y control se han vuelto complejos. Además, el extenso cableado de la red de sensores aumentó los requisitos para el mantenimiento del sistema de error de medición (Kalovrektis y cols., 2013).

La búsqueda de sustratos alternativos de bajo impacto es fundamental para mantener una producción agrícola de importancia económica. Se ha demostrado que las técnicas de mejora agrícola como la inoculación, el cultivo y el vermicompost son mejores que los fertilizantes químicos, aunque existen pocos trabajos en los que se comparen directamente las tres técnicas (Belhekar y cols., 2018).

### 1.3. Planteamiento del problema

El problema que se aborda en este tema de tesis es, en primer lugar, determinar los tipos de hortalizas que pueden ser producidas mediante el uso de un sistema hidropónico en la zona sur de la ciudad de Cuernavaca, lugar donde se localiza el TecNM/CENIDET. En función del tipo de hortalizas (que en nuestro caso de estudio fueron lechugas orejonas y chiles habaneros), se debe determinar el tipo de cultivo hidropónico a utilizar. Es importante también determinar las variables más importantes que intervienen en el proceso, y los nutrientes que benefician el estado de salud de las plantas con la finalidad de monitorearlas de manera continua. Este proyecto aborda la construcción de un prototipo experimental, para validar la correcta operación del sistema hidropónico.

### 1.4. Justificación

En la actualidad, en el estado de Morelos la agricultura ha ido disminuyendo y sufriendo grandes pérdidas en la cosecha de hortalizas ya que la climatología que actualmente existe ha ido empeorando con la contaminación ambiental, existe una gran amenaza en el cambio climático (Altieri y Nicholls, 2009). La

pérdida de cultivos se debe no solamente a los cambios climáticos, si no también, tenemos las pérdidas de cosecha por ataque de plagas, deshidratación de los cultivos y hasta inundaciones (Sardare y Admane, 2013). Estos tipos de cultivos tienen como beneficio diversas características, entre las cuales están: la producción eficiente de los cultivos, el ahorro en el consumo del agua, reducción del requerimiento de espacio, higiene de los cultivos y la producción en lugares donde no hay tierra o es de mala calidad (Allen y cols., 2006).

## 1.5. Objetivos

### 1.5.1. Objetivo general

Diseñar, construir e instrumentar un proceso hidropónico con monitoreo de sus variables para conocer cómo impactan en el crecimiento de hortalizas.

### 1.5.2. Objetivos particulares

- Determinar los tipos de hortalizas que pueden ser producidas mediante el uso de un sistema hidropónico en la zona sur de la ciudad de Cuernavaca, Mor.
- Determinar el tipo de cultivo hidropónico a utilizar y sus características.
- Diseñar y construir un sistema hidropónico que eficiente el uso del consumo de agua y utilice una fuente de energía renovable para su funcionamiento.
- Instrumentar el sistema hidropónico para adquirir datos de las variables importantes del proceso y los nutrientes presentes en el agua, con fines de monitoreo.

## 1.6. Alcances

El objetivo de esta investigación es implementar un modelo de sistema hidropónico para el cultivo de hortalizas aplicando a través de un sistema de control de riego, considerando la obtención de datos en tiempo real y su procesamiento. Sin embargo, los alcances y las limitaciones de esta investigación son las siguientes:

- Los datos están limitados a un mínimo número de variables climatológicas (temperatura, humedad, iluminación, volumen, nivel y pH).
- El monitoreo se realizará en un entorno real en clima cálido subhúmedo.
- Localizar a un encargado del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- Participar en la publicación de un artículo en el Congreso Internacional de Tecnología y Ciencia Aplicada (CITCA).

## 1.7. Aportación

- **Aportación 1:** Con el desarrollo e impacto de esta tesis es procurar aportar al estudio de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS):
  - ODS 2, Hambre Cero
  - ODS 7, Energía asequible y No contaminante

- ODS 9, Industria, Innovación
  - ODS 11, Ciudades y Comunidades sostenibles
  - ODS 12, Producción y Consumo responsable
- **Aportación 2:** Diseño de un sistema hidropónico utilizando energías renovables (como paneles solares) para alimentar los actuadores y sensores.

## 1.8. Ventajas y Dificultades

El proceso de producción implica una cuidadosa selección de lavado y desinfección, pregerminación, siembra, germinación, riego, aplicación de una solución nutritiva, cosecha y rendimiento. Entre los factores que influyen en la calidad de la semilla, la iluminación, la temperatura, la humedad y el agua.

### 1.8.1. Ventajas

Los sistemas hidropónicos ofrecen ventajas significativas, como ahorros de agua, menores costos de producción en comparación con métodos convencionales, eficiencia espacial y ciclos de producción mejorados (Castañares, 2020). Un ejemplo destacado es el sistema NFT, que garantiza un suministro constante de nutrientes para un crecimiento rápido y eficiente. Su simplicidad y fácil acceso a las raíces son notables. Por otro lado, los sistemas de recirculación, al reutilizar agua y nutrientes, son más sostenibles y permite un monitoreo haciendo ajustes en la mezcla según las necesidades específicas de las plantas.

### 1.8.2. Dificultades

Los sistemas hidropónicos también enfrentan desafíos, como la necesidad de capacitación limitada, costos iniciales de instalación y posibles limitaciones de materiales (Juarez-Lopez-Porfirio y cols., 2013). Los sistemas acuapónicos, en particular, pueden ser costosos de mantener y requieren un equilibrio delicado entre peces, plantas y microorganismos en el agua, lo que implica una inversión considerable en acuarios y equipos adicionales. Además, los sistemas de sustrato pueden resultar laboriosos, ya que necesitan monitoreo regular y ajuste de los niveles de nutrientes, con el riesgo de albergar enfermedades o insectos si no se controlan adecuadamente. A pesar de sus ventajas, tanto el sistema NFT como los sistemas de sustrato presentan desafíos que requieren atención cuidadosa.

## Conclusión del capítulo

En conclusión, este capítulo resalta la importancia del cultivo hidropónico como una alternativa innovadora y sustentable para el cultivo sin suelo enfatizando su capacidad, el uso de recursos y mejoras en el rendimiento de los cultivos. A lo largo del capítulo, se han presentado los fundamentos teóricos, antecedentes históricos y avances tecnológicos en la hidroponía, destacando su eficiencia en el uso de recursos y su potencial para enfrentar los desafíos del cambio climático y la escasez de tierras cultivables, enfatizando su capacidad de recursos y mejoras en el rendimiento de los cultivos. El análisis de la literatura muestra que la hidroponía ha evolucionado desde sus orígenes hasta convertirse en una herramienta clave en la agricultura sostenible, permitiendo un control preciso de los nutrientes y el impacto ambiental. Destacando los beneficios de la automatización y la monitorización en tiempo real, demostrando que el uso de sensores mejora la supervisión. El estudio también destaca la importancia de evaluar factores como la conductividad eléctrica y la proporción de macronutrientes en el nutriente, ya que estos aspectos influyen directamente en el desarrollo y calidad de los cultivos. Finalmente, se plantea la implementación de adaptar sistemas hidropónicos a las condiciones climatológicas del Estado de Morelos, determinando la viabilidad de diferentes tipos de hortalizas en el sistema hidropónico utilizado.

## 1.9. Organización del documento

Los siguientes capítulos se encuentran organizados de la siguiente manera

En el **Capítulo 2** se presentan conceptos fundamentales, como los sistemas hidropónicos y los tipos de hortalizas hidropónicas, su germinación y cosecha de los cultivos hidropónicos.

En el **Capítulo 3** se presenta el diseño y construcción del sistema hidropónico NFT con sustrato, detallando los componentes a utilizar y el proceso de ensamblaje del prototipo.

En el **Capítulo 4** se presentan los resultados obtenidos en esta investigación, desarrollando la implementación del sistema hidropónico, el modelo dinámico adaptable de un tanque hidropónico, simulaciones del comportamiento de nivel de líquido en los tanques hidropónicos. También se presenta la instrumentación propuesta para el monitoreo del sistema hidropónico.

En el **Capítulo 5** se dan a conocer las conclusiones y recomendaciones.

# Capítulo 2

## Marco Teórico

En este capítulo se presenta el marco teórico de los sistemas hidropónicos, sus aplicaciones en la agricultura y la horticultura, y las técnicas de cada uno de los tipos de cultivo hidropónico. Se proporciona una visión general de los factores clave que deben considerarse al abordar un proyecto hidropónico, ofreciendo una alternativa innovadora y eficiente a la agricultura sostenible, principalmente, al prescindir del suelo, eliminando muchos de los problemas asociados con enfermedades del suelo y plagas, lo que facilita el control y la prevención de problemas de cultivo.

### 2.1. Sistemas hidropónicos

El sistema hidropónico son un método de cultivo sin suelo, donde las raíces reciben los minerales esenciales para su crecimiento, estos minerales se encuentran en la solución nutritiva. Las plantas pueden sostenerse con materiales inertes como fibra de coco, perlita, lana de roca o simplemente con agua, en lugar de tierra.

Los sistemas hidropónicos ofrecen una solución sostenible, eficiente y adaptable para el cultivo de alimentos, abordando varios desafíos asociados con la agricultura convencional. Por ejemplo, Ortiz-Vásquez y cols. (2018) se centran en la implementación de un sistema hidropónico automatizado en la Fundación Cultivos de Amor, ubicada en Belén San Bernardo, Medellín. El objetivo principal es automatizar el cultivo de lechugas utilizando un sistema de flujo y reflujos controlado por una tarjeta Arduino. Este desarrollo busca beneficiar a la comunidad que visita la fundación, así como promover el aprendizaje y la adopción de prácticas agrícolas sostenibles y tecnológicamente avanzadas.

Los sistemas hidropónicos se dividen en 8 tipos de técnicas hidropónicas, veáse en la Fig. 2.1

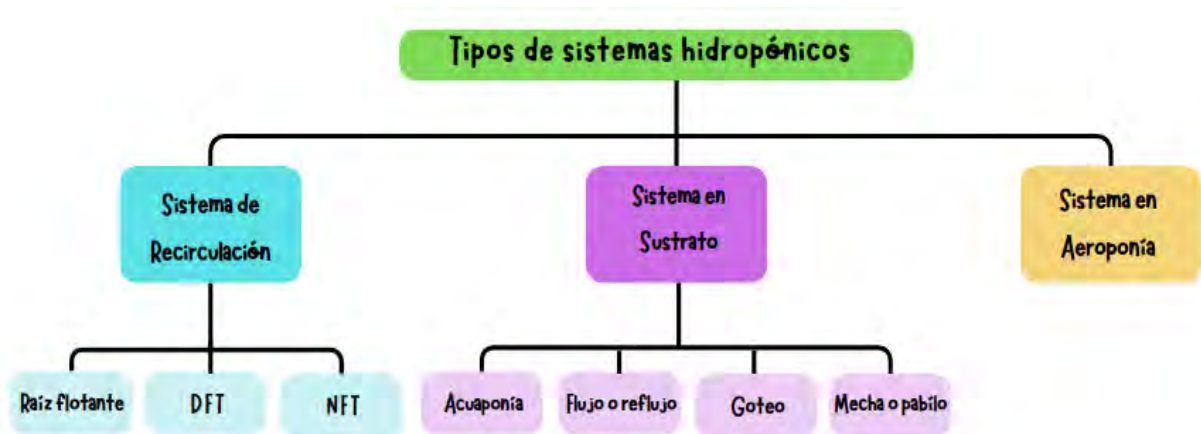


Figura 2.1: Tipos de sistemas hidropónicos.



### 2.1.1. Sistema de Recirculación

Un sistema hidropónico de recirculación es un método sin suelo en el que una solución nutritiva se recircula a través del sistema. Este tipo de sistema mejora el uso de recursos al reducir el consumo de agua y fertilizantes, haciéndolo sostenible. Este tipo de sistema es ampliamente utilizado en la agricultura moderna, especialmente en cultivos de hortalizas, hierbas aromáticas y flores, permitiendo una producción eficiente y sostenible.

En Castillo y cols. (2014) estudiaron la producción hidropónica de tomates con y sin recirculación de la solución nutritiva. Destacando el importante incremento en la producción de hortalizas de invernadero en México, particularmente tomate, aunque surgen problemas como la acumulación de patógenos y sales en el suelo. Centrándose en mantener una solución nutritiva para el crecimiento de las plantas, enfatizando la importancia de la conductividad eléctrica y la proporción correcta de nutrientes. El estudio compara los sistemas hidropónicos abiertos y cerrados, destacando los beneficios ambientales de los sistemas cerrados en términos de ahorro de agua para fertilizantes, reduciendo así el impacto en las masas de agua.

Gamboa (2013) estudiaron el impacto de diferentes mezclas de proteínas vegetales en la calidad del agua en sistemas de recirculación acuícola (RAS). Se analizaron cuatro dietas isoenergéticas e isoproteicas: harina de soja y pescado (SBF), harina de soja y guisante (SBP), harina de gluten (GM) y harina de soja y girasol (SBSF). El manejo adecuado de la calidad del agua en los sistemas RAS es crucial para la sostenibilidad y productividad de la piscicultura, minimizando el estrés y enfermedades en los peces, y mejorando los rendimientos productivos. El estudio resalta la viabilidad económica y ambiental de los sistemas RAS, especialmente en áreas con escasez de agua o condiciones ambientales adversas. Se utilizó un sistema compuesto por 28 tanques de fibra de vidrio, cada uno con un volumen de 120 litros. Cada par de tanques estaba conectado a un filtro EHEIM Classic Mod. 2217, creando un sistema de recirculación con un flujo de agua de 160 a 180 Lh<sup>-1</sup>. Se implementó un sistema de aireación mediante bombas Million Air-MA 200 y termostatos ATMAN N2867 para mantener una temperatura constante de 26°C. El fotoperiodo se controló para proporcionar ciclos de 12 horas de luz y 12 horas de oscuridad.

#### 2.1.1.1. Sistema de Raíz flotante

Un sistema hidropónico de raíz flotante es un método de cultivo sin suelo en el que las plantas se cultivan con sus raíces suspendidas en una solución nutritiva, flotando en la superficie del agua utilizando una estructura de soporte como láminas de poliestireno u otros materiales flotantes. El sistema se considera de recirculación porque el agua con nutrientes no se desecha, sino que se filtra, se limpia o se complementa y luego se vuelve a recircular a través del sistema, véase en la Fig. 2.2.

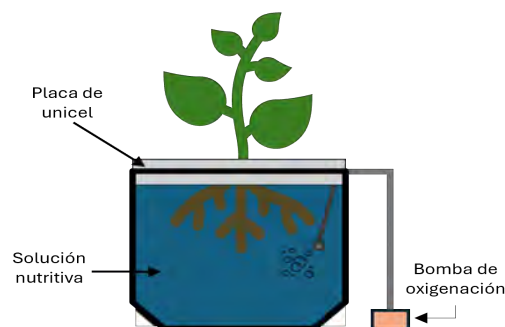


Figura 2.2: Sistema de raíz flotante

El autor Albuja y cols. (2021) destaca el cultivo de lechuga hidropónica en invernadero describiendo la infraestructura y el método de cultivo, con el análisis económico de la lechuga hidropónica en clima semi-árido, destacando las preocupaciones sobre el suministro de alimentos debido al aumento de la población y de las tierras agrícolas.

En (Pertierra Lazo y Quispe Gonzabay, 2020a) los resultados que presenta sobre el rendimiento y el consumo de recursos como agua y solución nutritiva, mencionando la técnica hidropónica que presenta como una alternativa para la productividad agrícola, destacando sus ventajas en términos de agua y la posibilidad de cultivo en zonas urbanas. También menciona los desafíos como la alta inversión inicial y la proliferación de enfermedades de las raíces.

El estudio de la producción de lechuga hidropónica se centra en la evaluación y la acumulación de  $NO_3$ , considerando diferentes proporciones de nitrato y amonio en el nutriente durante el transcurso de dos temporadas de crecimiento: verano y otoño. Se utilizaron semillas de lechuga de la variedad Montemar, cultivadas en sistema radicular flotante sin sustrato (Lara-Izaguirre y cols., 2019).

En (Armoa y cols., 2018) se hace un estudio centrándose en la producción de lechuga, comparando la siembra de semillas de lechuga en tres tratamientos: dos sistemas hidropónicos y un sistema de campo. Los resultados muestran diferencias significativas entre los tratamientos, destacando la eficiencia de la producción hidropónica al permitir una cosecha más temprana y obtener plantas de gran altura y diámetro en comparación con el cultivo. Sin embargo, el sistema convencional también presenta ventajas en cuanto a masa fresca y número de hojas.

### 2.1.1.2. Sistema DFT (Técnica de flujo profundo)

Un sistema hidropónico DFT (Técnica de flujo profundo) es un método de cultivo de plantas que utiliza soluciones de nutrientes minerales del agua sin suelo, véase en la Fig. 2.3. Para cultivar hortalizas de hoja en general, los principales sistemas hidropónicos utilizados en el sistema DFT, las soluciones nutritivas son suministradas a las plantas siempre que el nivel de agua en el cultivo esté por debajo del valor establecido, y recirculadas y suministradas a las raíces desnudas de las plantas, en tiempos constantes, en la cama de cultivo con una pendiente de 1/100 (Son y cols., 2020).

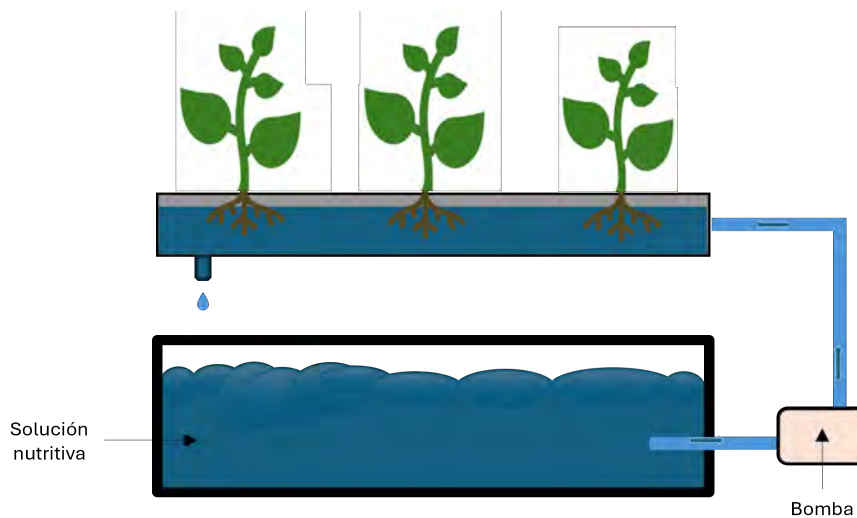


Figura 2.3: Sistema de Técnica de flujo profundo (DFT)

Los sistemas NFT (Técnica de película nutritiva) y sistemas DFT modificados similares y un sistema de flujo y reflujo se han utilizado ampliamente en las fábricas (Castañares, 2020).

### 2.1.1.3. Sistema NFT (Técnica de película de nutrientes)

La Técnica de Película de Nutrientes (NFT) por sus siglas en inglés (*Nutrient Film Technique*) es un método de cultivo sin suelo en el que se coloca constantemente una fina capa de solución nutritiva sobre las raíces de las plantas, proporcionándoles agua, oxígeno y nutrientes esenciales para su crecimiento. Se mantiene un flujo fino y continuo de solución nutritiva en la base de las raíces, lo que les permite absorber simultáneamente nutrientes y oxígeno. La solución fluye en un circuito cerrado, minimizando así el uso de agua y fertilizantes. Se trata, por lo general, de canales o tubos inclinados en los que se colocan las plantas en pequeños orificios, veáse en la Fig. 2.4.

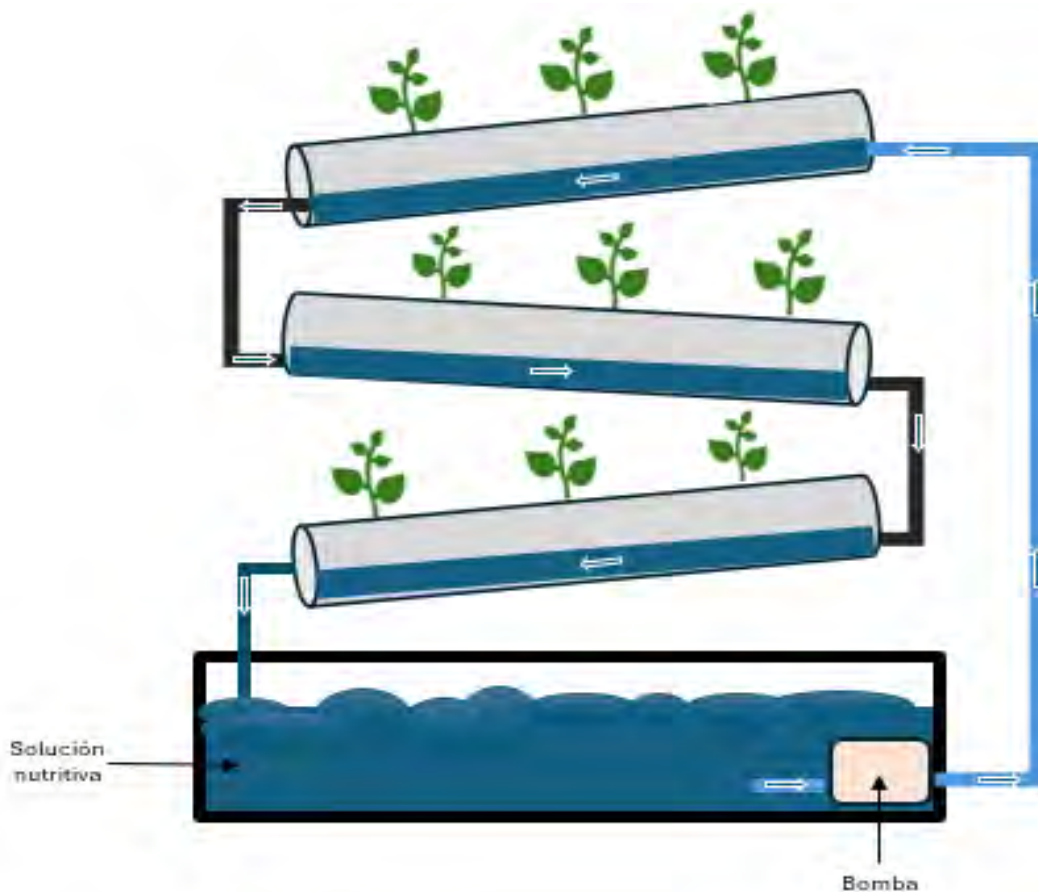


Figura 2.4: Sistema de Técnica de Película de Nutrientes (NFT)

El autor Helmy y cols. (2020) hace un estudio que se enfoca en establecer un sistema hidropónico utilizando la técnica de película de nutrientes para cultivar lechuga en el Altiplano central de Bolivia, donde la agricultura tradicional tiene un ingreso económico alto y limitado. Se destaca la viabilidad de implementar carpas solares para fomentar la producción de hortalizas y la introducción de sistemas hidropónicos.

En (Jaimes Terceros y Blanco Villacorta, 2019) muestra los resultados y discusiones que incluyen el análisis fisicoquímico de la automatización del sistema NFT por sus siglas en inglés (*Nutrient Film Technique*) con un temporizador digital, la importancia del pH en la disponibilidad de nutrientes y la influencia de la

térmica en la floración prematura de la lechuga. Se abordan aspectos como el consumo de agua, el caudal, la eficiencia de la red de riego y el rendimiento hídrico.

En (Manqueros-Avilés, 2015) el autor se centra en estudiar el sistema hidropónico NFT como un método efectivo para el cultivo de hortalizas, especialmente en el contexto del campo mexicano. Aborda el problema de la escasez de recursos y los problemas que enfrentan los agricultores tradicionales, con el objetivo de contribuir al conocimiento del comportamiento de factores en el sistema NFT mediante el uso de sensores de iones selectivos y LabVIEW. El estudio de este caso se centra en la interacción humana y en cómo la tecnología tiene un impacto particular en el lenguaje, influyendo y mejorando esta interacción.

Hernández y Hernández (2005) se detallan los materiales y los métodos utilizados, incluido el sistema de película de nutrientes, el lecho de semillas, los nutrientes, los parámetros de cultivo y el proceso de cultivo teniendo como resultados las muestras en aumento significativo en la producción de lechuga en comparación con los métodos de suelo convencional y con un consumo de agua significativamente menor.

Los autores Brenes-Peralta y Jiménez-Morales (2014) estudian la implementación del sistema en el invernadero, utilizando tubos de PVC, soluciones nutritivas y protocolos específicos para la siembra, control y cosecha. Se lleva a cabo un seguimiento diario del sistema, que incluye factores de seguimiento como la humedad relativa, la temperatura, la concentración de CO<sub>2</sub>, la conductividad y el pH de la solución nutritiva.

El autor Paulus y cols. (2012) se centra en evaluar el cultivo de lechuga (*Lactuca sativa*) en un sistema hidropónico NFT (Técnica de Flujo de Nutrientes), utilizando agua salina para el riego. El estudio se llevó a cabo en un ambiente protegido (invernadero). El estudio examinó la exposición a diferentes niveles de salinidad afecta tanto la calidad nutricional como las características sensoriales (sabor, textura, apariencia) de la lechuga, consistió en someter estas variedades a cinco niveles de salinidad del agua (medida en términos de conductividad eléctrica) que iban desde 0.42 hasta 7.43 dS m<sup>-1</sup>. Los efectos de la salinidad sobre el crecimiento, el contenido de nutrientes, el nivel de nitrato y la calidad sensorial de la lechuga fueron evaluados.

### 2.1.2. Sistema en Sustrato

Un sistema hidropónico en sustrato es un método en el que las plantas se cultivan sin suelo, en un medio sólido inerte que actúa como soporte para las raíces. Este sustrato no aporta nutrientes directamente a las plantas, sino que facilita la retención de agua y la absorción de nutrientes, la cual se proporciona de forma controlada. Se utilizan materiales como fibra de coco, lana de roca, vermiculita o grava. Permite un mejor control del entorno radicular, evitando enfermedades del suelo y maximizando la absorción de nutrientes y oxígeno.

El autor Ortega Martínez y cols. (2017) se centra en la eficiencia de diferentes sustratos en el cultivo de tomate en invernadero, tanto en sistemas hidropónicos como en suelo. En México ha aumentado la producción de hortalizas en condiciones protegidas, particularmente de tomate. Los sustratos utilizados varían dependiendo de variables climáticas agronómicas. Aunque el 80% de la producción se realiza en el suelo, se considera como inerte y se aplican inorgánicos, lo que incrementa los costos y el medio ambiente.

La evaluación de sustratos en el cultivo de lechuga bajo sistema hidropónico en el municipio de en Colombia se presenta en (Guerrero y cols., 2014). La hidroponía ofrece ventajas como control de factores externos, mayor precocidad en el producto y mayor productividad. La horticultura en la región es crucial, buscando modernizar para mejorar la calidad y cantidad de los cultivos. El estudio se centra en la

evaluación de dos sustratos, coco y cáscara de arroz, de diferentes maneras para el cultivo de lechuga. Destacando la importancia de implementar prácticas agrícolas sostenibles y de tecnología como la hidroponía.

La eficiencia de diferentes sustratos para la producción de tomate en invernaderos en México, ha aumentado la producción de hortalizas en condiciones protegidas, particularmente de tomate. Los sustratos evaluados incluyen tezontle, fibra de coco, y una mezcla de aserrín-composta en sistemas hidropónicos, así como el uso de suelo y suelo con acolchado plástico con fertirrigación. El estudio se realizó durante el ciclo agrícola de 2013 y mostró que el rendimiento varía significativamente según el sustrato utilizado. El tezontle tuvo el mayor rendimiento con un promedio de 25.2 kg/m<sup>2</sup>, mientras que el suelo con acolchado plástico presentó el mejor beneficio económico y el mayor coeficiente de productividad de agua. Los resultados sugieren que la elección del sustrato puede impactar significativamente en el rendimiento, el consumo de agua y nutrientes, así como en la rentabilidad económica (Luis-Daniel y cols., 2016).

### 2.1.2.1. Sistema Acuapónico

El sistema de producción acuapónico es un sistema biointegrado que combina la acuicultura de recirculación y la producción de plantas hidropónicas, veáse en la Fig. 2.5. Los nutrientes que son excretados directamente por los organismos o generados por reacciones microbianas en los desechos son absorbidos por las plantas cultivadas hidropónicamente. El uso de sistemas acuapónicos tiene varias ventajas sobre los sistemas de recirculación en acuicultura y los sistemas hidropónicos que usan nutrientes inorgánicos (Gutiérrez, 2012).

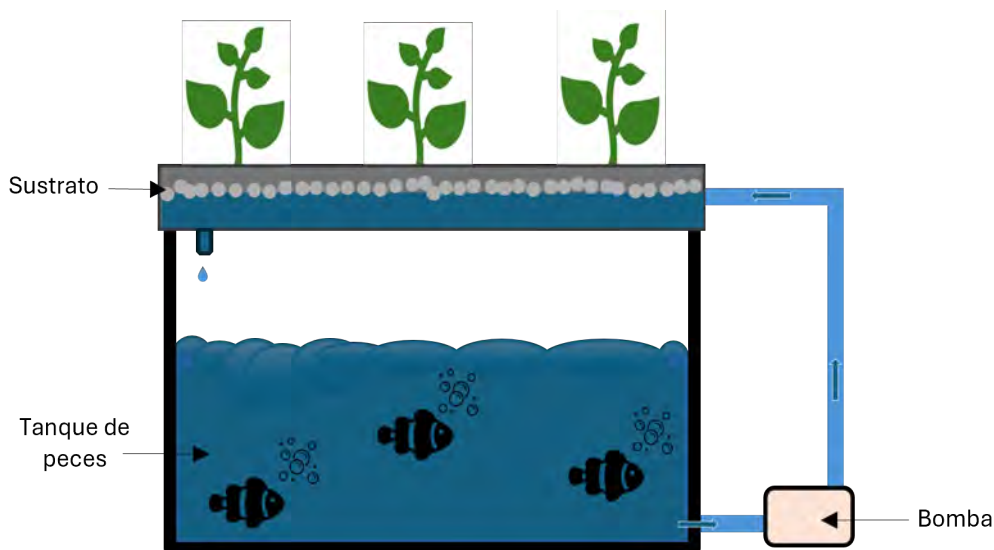


Figura 2.5: Sistema acuapónico

El autor Muñoz Gutiérrez (2012) habla sobre los sistemas acuapónicos de recirculación, que combinan la acuicultura e hidroponía para una producción de alimentos más sostenibles. Incluso si la acuicultura se ha desarrollado rápidamente, generando la competencia por recursos naturales y un impacto ambiental reutilizando el agua y los nutrientes, apoyando la producción sostenible de los alimentos. También describe los elementos esenciales del sistema como clarificadores, biofiltros y componentes hidropónicos. Analizando las ventajas como la reducción de residuos y costes operativos, pero también desventajas como la necesidad de más espacio para el cultivo de plantas. Resalta el potencial de desarrollo de Colombia y la importancia de las inversiones e investigaciones para mejorar la viabilidad de los sistemas acuapónicos, particularmente para los pequeños productores acuícolas.

### 2.1.2.2. Sistema de Flujo o reflujó

El sistema de flujo o reflujó es una técnica de cultivo hidropónico que se basa en inundar temporalmente las raíces de las plantas con una solución nutritiva y luego drenar esa solución de vuelta al depósito, veáse en la Fig. 2.6.

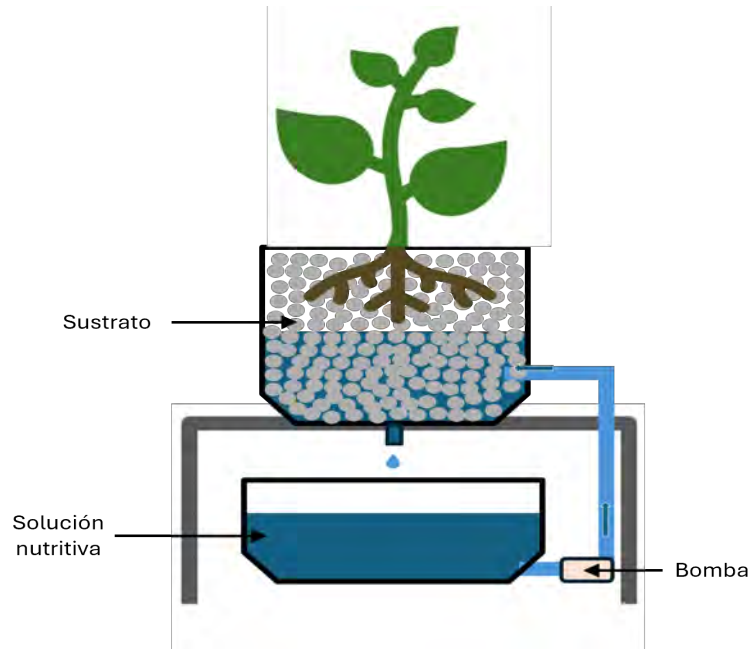


Figura 2.6: Sistema de flujo o reflujó

El autor Porras Pumalema (2021) habla sobre los sistemas de Flujo o Reflujó que funciona mediante un sistema de inundación y drenaje en el cual la planta se encuentra dispuesta en un medio inerte y este es cada tiempo determinado saturado mediante agua y solución de nutriente. El medio de crecimiento se halla ubicado en un tanque reservorio que está debajo del cultivo, este es dosificado mediante bombas hidráulicas, mediante el medio inerte y el medio de crecimiento.

### 2.1.2.3. Sistema de Goteo

Un sistema hidropónico por goteo es un método de cultivo sin suelo en el que se suministra una solución nutritiva directamente a las raíces de las plantas mediante un sistema de tubos y emisores de goteo. Este sistema es eficiente en el uso de la solución nutritiva, permitiendo un crecimiento controlado. Su estructura puede incluir mesas, canaletas o contenedores que sostienen las plantas y facilitan la circulación de la solución nutritiva para el crecimiento de las plantas, veáse en la Fig. 2.7.

Sistemas por goteo hidropónico, conocido como Drip System o riego por goteo, este sistema de hidroponía va regando las plantas gota a gota. Este método de riego consiste en llevar el agua directamente a las raíces a través de tuberías y goteros permitiendo la utilización ideal de fertilizantes.

Se suelen utilizar aros con microgoteros conectados a una bomba de agua que recogerá el agua con nutrientes de un depósito inferior. La planta se sujeta en una maceta llena normalmente de sustrato inerte que no retenga la humedad ni ningún tipo de nutriente. Las raíces se expandirán a través de este sustrato consiguiendo una buena sujeción (Cervantes y cols., 2023).

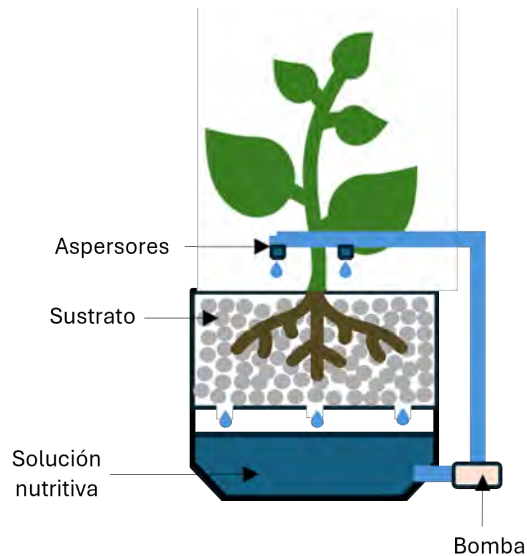


Figura 2.7: Sistema de goteo

#### 2.1.2.4. Sistema de Mecha o (pabilo)

Un sistema hidropónico de mecha o pabilo es un tipo de sistema de cultivo hidropónico en el que las plantas se cultivan sin el suelo, utilizando una solución nutritiva en agua que es transportada hasta las raíces por una mecha o pabilo. La mecha es un material absorbente que se sumerge en un depósito que contiene agua y nutrientes, la solución es llevada hasta el centro del cultivo donde se encuentran las raíces de las plantas, véase en la Fig. 2.8.

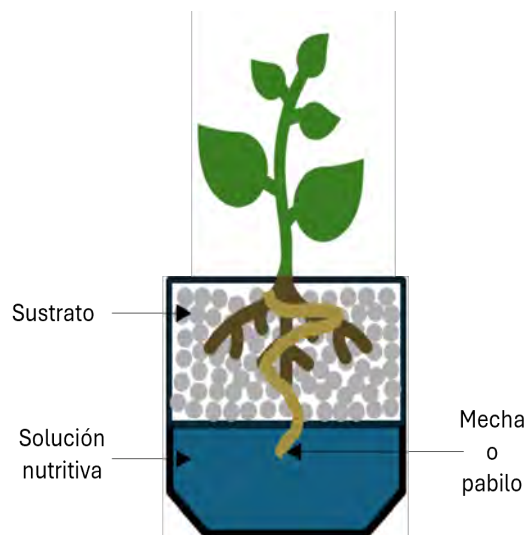


Figura 2.8: Sistema de mecha o pabilo

Es una técnica de cultivo que utiliza un medio de crecimiento inerte y nutrientes disueltos en agua. Este sistema se basa en el principio de capilaridad, permite que el agua suba a través de la mecha hasta llegar a las raíces. No necesita electricidad ni bomba, requiere poco mantenimiento y ahorra agua. Es adecuado para cultivos pequeños o espacios restringidos, jardines urbanos o de interior.

En (Medrano-García y cols., 2019) se realizó un estudio en un invernadero a 3 metros sobre el nivel del mar, evaluando el cultivo de lechuga en ciclos con diferentes soluciones y sustratos hidropónicos, utilizando riego por mecha. El cultivo por mecha capilar se presenta como una opción combinada con solución hidropónica y sistemas de riego. Esta técnica busca optimizar el uso del agua, especialmente en regiones semiáridas.

Los resultados muestran que la solución hidropónica de la Organización para la Alimentación y la Agricultura (FAO) ofrecen mejores rendimientos agronómicos en comparación con otras opciones. El riego por mecha reduce la evaporación y la transpiración, parece ser una tecnología de consumo económica y eficaz. Además, este método permite ahorrar mano de obra y energía al requerir una sola aplicación de agua y nutrientes.

### 2.1.3. Sistema de Aeroponía

La aeroponía es un sistema donde las raíces están expuestas, de manera continua o discontinua, a un ambiente saturado de finas gotas de una solución nutritiva, veáse en la Fig. 2.9 Las plantas se colocan en estructuras que sostienen su parte aérea (hojas y tallos) mientras sus raíces quedan colgando en un ambiente cerrado.

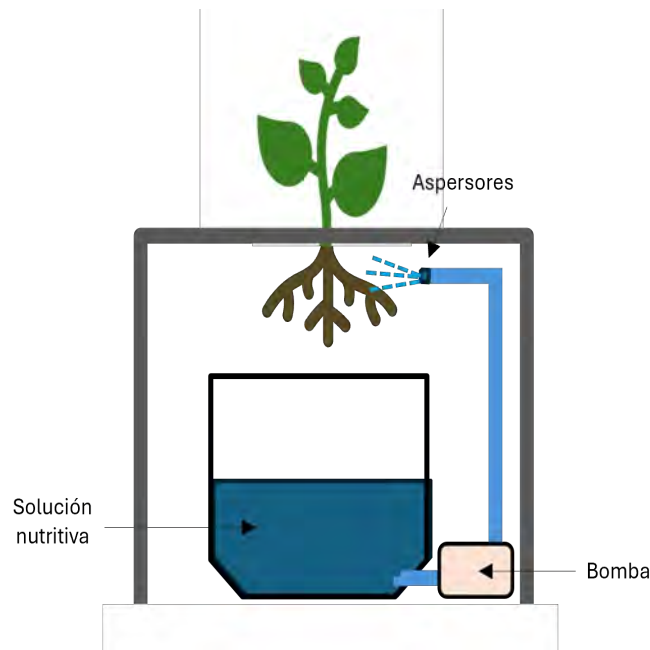


Figura 2.9: Sistema de aeroponía

Es un sistema que usa una densa niebla nutritiva en lugar de la pulverización fina de las partículas mayores usadas en otros sistemas. La aeroponía es una forma de cultivo hidropónico en el cual las raíces de las plantas están suspendidas en el aire y el alimento nutritivo es suministrado por una niebla salina y crecen dentro de contenedores vacíos y oscuros (Dávila Vera y Santos Lazo, 2014).



## 2.2. Tipos de hortalizas en hidroponía

Una hortaliza es cualquier planta cultivada en huertos que se consume como alimento, ya sea en crudo o cocida. Incluye verduras, legumbres frescas y algunas raíces o tubérculos. En la hidroponía, se cultivan diversas hortalizas que se adaptan bien a este sistema sin suelo, estas se pueden clasificar en diferentes tipos, veáse en la Fig. 2.10



Figura 2.10: Hortalizas adaptables en la hidroponía

Dependiendo de la parte comestible de la planta, las hortalizas se clasifican en diferentes grupos:

**Hojas o verduras de hojas:** Las hortalizas de hojas son aquellas plantas cuyas hojas tiernas son comestibles.

**Raíces, tubérculos o bulbos:** Las hortalizas de raíces las que se aprovecha la parte subterránea. No son tan comunes en hidroponía, pero pueden adaptarse.

**Inflorescencias:** Las hortalizas de inflorescencia son aquellas que se consumen por sus flores o sus tallos tiernos y jugosos.

**Frutos:** Las hortalizas de fruto se cultivan por sus frutos comestibles.

**Hierbas aromáticas:** Las hortalizas aromáticas y medicinales son aquellas plantas que se utilizan para condimentar alimentos o con fines terapéuticos.

El cultivo hidropónico de hortalizas permite mejorar la producción agrícola en espacios reducidos, con menos consumo de agua y sin la limitación del suelo. Las hortalizas de hoja y las hierbas aromáticas son las más fáciles y rápidas de cultivar, las hortalizas de fruto e inflorescencia pueden ofrecer alto rendimiento con los cuidados adecuados.

En la hidroponía, existen diferentes tipos de hortalizas que pueden ser cultivadas en sistemas hidropónicos, debido a su rápido crecimiento, veáse en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Tipos de hortalizas utilizables en hidroponía

Órgano comestible	Cantidad
Hojas o verduras de hojas	Espinaca Acelga Cilantro Perejil Lechuga Arugula Kale Berro Epazote
Raíces, tubérculos o bulbos	Betabel Cebolla Cebollín Apio (puede considerarse también de tallo) Zanahoria Rábano
Inflorescencias (parte comestible son las flores o tallos)	Brócoli Calabazas (también considerado fruto)
Frutos	Pepino Tomate (verde, saladet, bola y cherry) Chile (habanero, jalapeño, serrano y pimiento) Fresas
Hierbas aromáticas	Salvia Albahaca Orégano Menta Hierbabuena Ajenjo Manzanilla

### 2.2.1. Lechuga

La lechuga es una hortaliza rica en principios vitamínicos A, B1, B2, C y E así como minerales. La finalidad del almacenamiento es la de preservar su calidad para siembras posteriores que son afectados por la longevidad, calidad inicial de la semilla y condiciones del almacenamiento. El cultivo en ambiente protegido posibilita la producción de lechuga en condiciones limitantes para su desarrollo, comparado al cultivo convencional a campo (Neves y cols., 2016).

En Salinas Lugo (2016) se evaluó el efecto del almacenamiento en la producción de semillas de lechuga, peletizadas y no peletizadas, de diferentes lotes y temporadas. Se utilizaron cuatro variedades con diferente vida útil y se realizaron pruebas de humedad, germinación, análisis fitosanitario, longitud de la parte aérea de la raíz y peso fresco y seco. Los resultados indican que las semillas de lotes recientes tienen mayor porcentaje de germinación y vigor.

Lara-Izaguirre y cols. (2019) se centran en la optimización de las condiciones de cultivo para mejorar la producción y calidad de la lechuga en sistemas hidropónicos bajo invernadero. Enfocándose en tres experimentos principales relacionados con la optimización de las condiciones de cultivo en sistemas hidropónicos bajo invernadero para la producción de lechuga. Se evaluaron variables como el peso seco de raíz, hojas y total, área foliar, concentración de  $\text{NO}_3^-$  en peciolo, unidades SPAD y el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).

El autor Carmona Bayonas (2022) aborda un estudio sobre el crecimiento y la acumulación de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) en lechugas cultivadas en un sistema hidropónico de raíz flotante. El objetivo principal del estudio fue evaluar el impacto de diferentes proporciones de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) y amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) en la solución nutritiva durante dos estaciones de cultivo: verano y otoño. Debido a que altos niveles de nitratos en las hojas de lechuga pueden ocasionar problemas de salud, como la formación de compuestos carcinogénicos. Por tanto, la sustitución parcial de nitratos por amonio podría ser una estrategia efectiva para reducir los niveles de nitratos en los cultivos hidropónicos de lechuga.

Hernández y Hernández (2005) se centran en evaluar la producción de lechuga francesa (*Lactuca sativa* L. var. *acephala*) y lechuga romana (*Lactuca sativa* L. var. *longifolia*) utilizando la técnica de película de nutrientes (NFT) en un invernadero en Reynosa, Tamaulipas, durante el ciclo otoño-invierno. El objetivo principal fue determinar la viabilidad de este sistema hidropónico en términos de productividad, consumo de agua, y la eficiencia comparada con métodos tradicionales de cultivo en suelo. El consumo de agua fue considerablemente menor en el sistema NFT, utilizando solo 13.8 litros por planta, lo que representa un ahorro significativo en comparación con los sistemas de riego tradicionales.

La evaluación de la viabilidad económica y financiera de la producción de lechugas (*Lactuca sativa* L.) utilizando un sistema hidropónico de raíz flotante sugiere la evaluación de otros materiales genéticos de lechuga más tolerantes a altas temperaturas y la exploración de otras especies hortícolas para diversificar la producción y mejorar la rentabilidad. Plantea la posibilidad de incrementar la densidad de plantación o utilizar bioestimulantes para mejorar aún más el rendimiento y la calidad del cultivo (Pertierra Lazo y Quispe Gonzabay, 2020b).

### 2.2.2. Chile Habanero

La producción de chile habanero bajo condiciones controladas de invernadero utilizando técnicas hidropónicas. Describe los diferentes tipos de sustratos orgánicos e inorgánicos que pueden utilizarse en el cultivo hidropónico, así como los tipos de contenedores adecuados para el desarrollo de las plantas. Se centra en la investigación y experimentación llevada a cabo en el Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en la Relación Agua Suelo Planta Atmósfera (CENID RASPA). Este estudio aborda la producción de chile habanero bajo condiciones controladas en invernaderos ubicados en regiones áridas de México (Castorena y cols., s.f.).

El cultivo de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) en un sistema hidropónico dentro de un invernadero se desarrolla el tratamiento sin poda y con el régimen nutrimental RN2 y su incrementó significativamente la biomasa seca y el número de frutos en comparación con las plantas tratadas con RN1. Las plantas con poda de 2, 3 y 4 tallos produjeron frutos más grandes, aunque el rendimiento total disminuyó en comparación con las plantas sin poda. El régimen nutrimental específico para cada etapa fenológica (RN2) mostró resultados superiores en términos de rendimiento y calidad de los frutos en comparación con la solución nutritiva universal (RN1). El régimen nutrimental específico para cada etapa fenológica del cultivo (RN2) es más efectivo que una solución nutritiva universal (RN1). Las plantas sin poda y con RN2

mostraron mayores incrementos en biomasa seca, número de frutos y rendimiento total. Esto resalta la importancia de ajustar los nutrientes a las necesidades específicas del cultivo en (López-Gómez y cols., 2020).

López-Gómez y cols. (2017) evalúan el efecto de diez regímenes nutrimentales en el cultivo de chile habanero en un sistema hidropónico bajo cubierta plástica. El estudio se llevó a cabo en el campo experimental de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos. El estudio fue determinar el régimen nutrimental que optimiza el desarrollo de la planta, el rendimiento y la calidad del fruto del chile habanero. Los tratamientos incluyeron diferentes concentraciones de nitrato en la etapa vegetativa, combinaciones de relaciones nitrato:fosfato en la etapa de floración y relaciones nitrato/potasio en la etapa de fructificación. Se utilizó un diseño experimental completamente al azar con diez repeticiones cada uno. Los resultados mostraron que el régimen nutrimental afectó significativamente el número de flores por planta, el número de frutos por planta, el rendimiento y la acumulación de materia seca. La etapa de fructificación, resultó en un incremento en el rendimiento y la calidad del fruto, siendo superior en comparación con la solución Steiner utilizada durante todo el ciclo de cultivo.

El proceso de producción de plántulas de chile habanero, enfatizando la importancia de la selección de variedades, la siembra y el manejo de las plantas en el vivero. La información se basa en el conocimiento adquirido por técnicos y productores en el estado de Campeche, México. Destaca la importancia de una producción controlada y el manejo adecuado de cada etapa para asegurar plántulas de calidad. Enfatiza el control de enfermedades y plagas como factores críticos para el éxito en la producción de chile habanero. Proporciona una guía completa sobre los pasos necesarios para la producción eficiente de plántulas de chile habanero. Esto incluye limpieza y desinfección, preparación del sustrato, técnicas de siembra, manejo de sombreado y riego, y fertilización (Castillo-Aguilar, 2015).

Tucuch-Haas y cols. (2012) se centran en evaluar cómo diferentes relaciones de amonio/nitrato ( $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ ) y tamaños de partículas del sustrato (tezontle mezclado con fibra de coco) afectan el rendimiento y la calidad del fruto del chile habanero. Se utilizó la variedad de chile habanero cv. Criollo Naranja y se empleó tezontle rojo volcánico con diferentes tamaños de partículas (3-5 mm, 5-10 mm, 10-20 mm, y sin cribar), mezclado con fibra de coco en una proporción 75:25. Se demuestra que el tamaño de las partículas del sustrato tiene un impacto significativo en el crecimiento y rendimiento del chile habanero. El tamaño de partícula de 10-20 mm de tezontle mezclado con fibra de coco fue el más adecuado para mejorar el rendimiento y la calidad del fruto.

La composición y características del aroma del chile Habanero (*Capsicum chinense* Jacq.), una especie altamente valorada en México por sus atributos sensoriales como color, olor y pungencia. El estudio se enfoca en los compuestos volátiles responsables del aroma del chile Habanero, destacando la importancia de estos compuestos como un parámetro de calidad. Los factores que influyen en el perfil de los compuestos volátiles, como la variedad del chile, el nivel de maduración y el método analítico empleado, y se resaltan las diferencias en el aroma debido a estos factores. En resumen, el documento recopila y analiza información relevante sobre el aroma del chile Habanero, destacando su importancia en la industria alimentaria y su potencial para la exportación e industrialización (Sosa-Moguel y cols., 2018).

Los autores Zamora-Peredo y cols. (2018) se centran en el análisis científico del pericarpio (la parte exterior) de los frutos inmaduros y maduros de tres variedades de chile habanero: Mayan Kisin, Mayan Ek y Mayan Kiin, utilizando la técnica de espectroscopía Raman. Los estudios revelan las características espectrales y composicionales en diferentes etapas de maduración. Los resultados muestran que en los frutos inmaduros predominan las señales de clorofila, mientras que en los frutos maduros dominan los picos asociados a los carotenoides, responsables de los colores amarillo, naranja y rojo. Este estudio sugiere que

la espectroscopía Raman es una herramienta útil, no destructiva y rápida para monitorear el proceso de maduración del chile habanero.

El autor Tapia-Vargas y cols. (2016) se centran en evaluar el efecto de un complejo hormonal basado en citocininas sobre la producción de chile habanero negro (*Capsicum chinense* Jacq.) cultivado en un invernadero. El estudio muestra que la aplicación del complejo hormonal resultó en un incremento del 160 % en el rendimiento de fruto por planta en comparación con el grupo de control sin aplicación de hormonas. La demostración y validación de que la aplicación de un complejo hormonal basado en citocininas puede mejorar significativamente la producción y calidad del fruto del chile habanero negro cultivado en condiciones de invernadero.

### 2.3. Siembra

Para llevar a cabo una siembra exitosa, es necesario considerar algunos aspectos en términos de calidad de la semilla, composición del suelo, profundidad, humedad, espacio y cantidad de semilla.

El almacigo es una etapa crucial en la hidroponía y se refiere al proceso de germinar y cultivar plantas a partir de semillas antes de transplantarlas al lugar definitivo en el cultivo o sistema hidropónico.

#### 2.3.1. Germinación en almacigo

La producción de hortalizas en almácigos se desarrolle de tal forma que actualmente sea una especialidad por sí misma. De un buen almacigo depende todo el cultivo posterior, por lo que las aplicaciones tecnológicas y el conocimiento técnico en su elaboración son un requerimiento real (Guzmán, 2003).

Los sustratos aserrín de melina madurado + suelo + granza; y peat moss + perlita fueron los mejores medios para almácigos de lechuga. Se observó además en los sustratos abono orgánico Juan Viñas + aserrín de melina madurado + granza; bagazo + aserrín de melina madurado + abono orgánico Juan Viñas; y aserrín de melina madurado + fibra de coco + ceniza, una excelente calidad de adobe, aunque un desarrollo de la planta no tan vigoroso. Los sustratos fibra de coco; sustrato comercial; y bagazo + fibra de coco + piedra pómez fueron los que más limitaran el establecimiento de las plantas de almacigo (Roldán y Soto, 2005).

#### 2.3.2. Proceso de germinado

1. **Selección de semillas:** Se inicia el proceso seleccionando semillas de alta calidad y variedad deseada. Es esencial elegir semillas certificadas y libres de enfermedades para garantizar un germinado exitoso.
2. **Preparación del medio de germinación:** Se utiliza un medio de germinación, como turba o fibra de coco, para proporcionar un sustrato ligero y bien aireado. Este medio debe estar ligeramente húmedo, pero no saturado, para facilitar la absorción de agua por las semillas.
3. **Siembra de semillas:** Las semillas se distribuyen de manera uniforme sobre la superficie del medio de germinación. Dependiendo del espacio y el método, se pueden sembrar directamente en macetas, bandejas de germinación o sistemas hidropónicos.
4. **Humedad y temperatura:** Se mantiene una alta humedad alrededor de las semillas para favorecer la germinación. La temperatura adecuada para el germinado de lechuga suele oscilar entre 18-24 °C.

5. **Cuidado y monitoreo:** Durante el proceso de germinación, es crucial monitorear regularmente la humedad del sustrato y proporcionar luz indirecta. Las semillas son fotoblásticas positivas, lo que significa que la luz favorece su germinación.
6. **Desarrollo de brotes:** Después de unos días, se observará el desarrollo de brotes emergentes. En esta etapa, se retira el plástico o la tapa para permitir una mejor circulación de aire. Se sigue manteniendo la humedad adecuada.
7. **Trasplante a tierra o sistema hidropónico:** Cuando los brotes alcanzan una altura suficiente y desarrollan las primeras hojas verdaderas, están listos para ser trasplantados al suelo o a un sistema hidropónico. Se realiza con cuidado para evitar dañar las raíces delicadas.
8. **Cuidado continuo:** Después del trasplante, se proporciona un cuidado continuo con riego adecuado, luz solar o iluminación artificial y nutrientes necesarios para el crecimiento saludable de las lechugas.

En resumen, el proceso de germinado de hortalizas implica cuidados desde la selección de semillas hasta el trasplante, asegurando condiciones óptimas para el desarrollo saludable de las plantas, veáse en la Fig. 2.11.

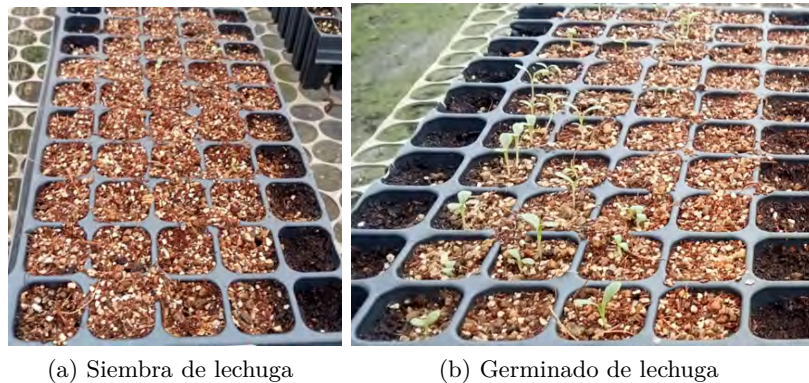


Figura 2.11: Experimentación del germinado de lechugas



Figura 2.12: Experimentación del germinado de chile habanero

### 2.3.3. Ciclos de cosecha

Los ciclos de cosecha de las hortalizas en hidroponía son fundamentales por varias razones, ya que influyen directamente en la mejora, productividad y calidad de los cultivos. En la Tabla 2.2 se muestran recomendaciones de los ciclos de siembra y cosecha de las hortalizas en la hidroponía durante el año.

Tabla 2.2: Ciclos recomendados para siembra y cosecha de hortalizas (S= Siembra, C= Cosecha).

Cultivo	Ene	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Espinaca	SC	C	C			S	S	SC	SC	SC	SC	SC
Acelga	C	C						S	S	SC	SC	SC
Betabel	SC	C	C	C				S	S	S	SC	SC
Epazote	SC	SC	SC	SC	SC	SC	SC	SC	SC	SC	SC	SC
Cebolla									S			C
Cebollin		SC		SC		SC		SC		SC		SC
Apio	C	C							S	S		
Zanahoria	C										S	
Cilantro		SC		SC		SC		SC		SC		SC
Perejil	SC		SC		SC		SC		SC		SC	
Lechuga	S		C		S		C		S		C	
Ajenjo	C	C								C	C	SC
Manzanilla	C	C								S	S	SC
Arujula	SC	SC	SC	SC	SC	SC	SC	SC	SC	SC	SC	SC
Kale	C	C								S	S	SC
Berro	SC	SC	SC	SC	SC	SC	SC	SC	SC	SC	SC	SC
Rabano		SC		SC		SC		SC		SC		
Brocoli	SC	SC	SC	C	C	C				S	S	S
Calabazas			S		C					S		C
Pepinos		S	S	S	SC	SC	C	C	C			
Salvia	C	C								S	S	SC
Albahaca			S	S	S	SC	C	C	C			
Oregano	SC	SC	SC	SC	SC	SC	SC	SC	SC	SC	SC	SC
Menta	SC	SC	SC	SC	SC	SC	SC	SC	SC	SC	SC	SC
Hierbabuena	SC	SC	SC	SC	SC	SC	SC	SC	SC	SC	SC	SC
Fresas	C	C	C	S	S	S	SC	SC	SC	SC	SC	SC
Tomate		S		C					S		C	
Chiles		S		C				S		C		

Los ciclos de cosecha permiten que las hortalizas se recojan en su punto de madurez, lo que mejora su sabor, textura y valor nutricional.

### 2.4. Sustratos

La hidroponía en sustrato es una técnica hidropónica en la que las plantas se cultivan en un medio de crecimiento que difiere de la tierra. En lugar de suelo, se emplean sustratos inertes que no interfieren con la nutrición de la planta. Estos sustratos pueden ser de origen mineral u orgánico.

El autor López-Pérez y cols. (2005) se centra en la evaluación de diferentes mezclas de sustratos ideales para el crecimiento de dos genotipos de fresa ('Chandler' y Óso grande') en un sistema hidropónico bajo condiciones de invernadero. La evaluación de diferentes mezclas de sustratos para el cultivo de fresa en sistemas hidropónicos en Michoacán, México. La mezcla de sustratos G3C1 es recomendada para el crecimiento de plantas de fresa en sistemas hidropónicos debido a sus resultados superiores en comparación con otras mezclas y el sustrato comercial vermiculita. Este estudio proporciona una base para el mejoramiento de los sistemas de cultivo hidropónico de fresas, destacando la importancia de seleccionar adecuadamente los sustratos para mejorar el rendimiento y la calidad del cultivo.

Los sustratos inertes son esenciales en hidroponía por su neutralidad química, lo que permite un control preciso de nutrientes y pH. Al ser inerte, no descompone ni altera la solución nutritiva, asegurando que las plantas reciban exactamente lo que necesitan.

En la Tabla 2.3 se muestran algunos de los tipos de sustratos que se pueden utilizar en los sistemas hidropónicos.

Tabla 2.3: Tipos de sustrato

Drenantes	Hidrantes
Grava	Agua
Piedra	Peatmoss
Tezontle	Fibra de coco
Agrolita	delgada
Perlita	Turba
Vermiculita	Corteza
Piedra volcanica	

### 2.4.1. Perlita

El autor Carlos-Andrés (2014) se centra en evaluar la factibilidad y efectividad de diferentes sustratos en la producción de plantines de lechuga y su posterior desarrollo tras el trasplante. Evalúa el desarrollo de plantines de lechuga (*Lactuca sativa* L.) obtenidos en diferentes sustratos hasta el estado de 4 hojas y su crecimiento y desarrollo hasta 20 días postrasplante. Los plantines obtenidos en la mezcla de turba y perlita mostraron mayor precocidad y mejores resultados en altura, área foliar, color y materia fresca, aunque no se encontraron diferencias significativas en materia seca.

Como alternativa de sustrato tenemos a la Perlita para el cultivo de pepino en hidroponía, en la Universidad de Kentucky, EE. UU."de Josselin Anabela Vásquez Sevilla, trata sobre un estudio realizado para determinar la viabilidad de utilizar residuos picados de cedro rojo oriental como una alternativa sostenible a la perlita en la producción de pepino en hidroponía. El estudio aborda la problemática ambiental asociada con el uso de sustratos sintéticos no biodegradables como la perlita, proponiendo una alternativa más ecológica y sostenible. Los residuos de Eastern Red Cedar, al ser un subproducto de la industria maderera, no solo aprovechan un recurso local y abundante, sino que también reducen la necesidad de importar perlita, disminuyendo la huella de carbono y los costos ambientales (Vásquez, 2014).

El autor Jerez (2007) se centra en la evaluación de las propiedades físicas y micromorfológicas de la perlita



y la zeolita en diferentes tamaños de partícula. El estudio se llevó a cabo para entender cómo el tamaño, la forma y la distribución de las partículas afectan las propiedades del sustrato, como la capacidad de retención de agua y la aireación, que son cruciales para el crecimiento de las plantas. El tamaño y la forma de las partículas son cruciales para determinar las propiedades físicas de los sustratos. Las partículas de diferentes tamaños tienen diferentes capacidades de retención de agua y aireación, lo que puede ser utilizado para el incremento del crecimiento de las plantas en sistemas hidropónicos.

En la Fig 2.13 se puede observar la perlita, es un material inerte que mejora el drenaje y evita el encharcamiento. Ayuda a mantener la estructura del sustrato y previene la compactación.



Figura 2.13: Sustrato Perlita

## 2.5. Solución nutritiva

La hidroponía es una técnica de cultivo que prescinde del suelo como medio de producción y en su lugar utiliza soluciones nutritivas para proporcionar a las plantas los nutrientes esenciales que necesitan para crecer y prosperar. Esta técnica ha ganado popularidad en la agricultura sostenible debido a sus múltiples ventajas, como un mejor control del ambiente de crecimiento de las plantas, un uso más eficiente del agua y la posibilidad de crecer en espacios o en zonas de mala calidad del suelo (Longar Blanco y cols., 2013).

La preparación de las soluciones nutritivas se obtienen de fórmulas y recomendaciones específicas para la preparación de soluciones nutritivas, adaptadas a diferentes tipos de cultivos y condiciones ambientales. Esto es especialmente útil para quienes están empezando en la hidroponía o buscan mejorar la eficiencia de sus sistemas actuales (Asao, 2012).

Los autores Alejo-Santiago y cols. (2015) se centran en determinar el requerimiento interno de nitrógeno (IRN) para el chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) variedad Big Brother, cultivado bajo condiciones protegidas y en un sistema hidropónico. La concentración de 20 meqL<sup>-1</sup> de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> redujo significativamente el rendimiento de fruto debido al fenómeno conocido como absorción de lujo de nitrógeno. El nitrógeno para el chile habanero variedad Big Brother se estableció en 2.2 %, lo que implica una demanda de 5.1 kg de nitrógeno por tonelada de fruto fresco.

La solución nutritiva en hidroponía es una mezcla de nutrientes esenciales disueltos en agua que se utiliza para alimentar las plantas cultivadas en sistemas hidropónicos. En lugar de obtener nutrientes del suelo,

las plantas en hidroponía toman los nutrientes directamente de esta solución, estos nutrientes son minerales que se clasifican en macronutrientes y micronutrientes.

En la Tabla 2.4 se clasifican los macronutrientes y micronutrientes proporcionando los nutrientes esenciales y su importancia que tienen en las plantas para crecer y desarrollarse adecuadamente.

Tabla 2.4: Importancia de los nutrientes para la solución nutritiva

Macronutrientes		Micronutrientes	
Nitrógeno (N)	Es esencial para el crecimiento vegetativo	Hierro (Fe)	Esencial para la síntesis de clorofila.
	Contribuye a la formación de proteínas y clorofila		
	Promueve el desarrollo de hojas verdes y tallos fuertes.	Manganeso (Mn)	Activa enzimas involucradas en la fotosíntesis.
Importante para el desarrollo de raíces y flores.			
Fósforo (P)	Participa en la transferencia de energía (ATP) y la síntesis de ADN.	Zinc (Zn)	Participa en la división celular y el crecimiento de las plantas.
	Contribuye la resistencia al estrés.	Cobre (Cu)	Ayuda en la formación de clorofila.
Potasio (K)	Regula la apertura y cierre de los estomas.	Boro (B)	Esencial para la formación de paredes celulares.
	Mejora la calidad de los frutos y la formación de semillas.	Molibdeno (Mo)	Esencial para la fijación de nitrógeno.

En la Fig. 2.14 se muestran los nutrientes hidropónicos comerciales para el crecimiento de las plantas en sistemas sin suelo.



Figura 2.14: Nutrientes comerciales

En la Tabla 2.5 se muestra las especificaciones de los nutrientes esenciales comerciales para la hidroponía con el porcentaje de cada uno de las sales minerales que tiene la bolsa de nutrientes hidropónicos.

Tabla 2.5: Porcentaje de nutrientes utilizados

Compuesto	Nombre	Porcentaje
N	Nitrógeno total	10 %
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Fósforo asimilable	8 %
K <sub>2</sub> O	Potasio asimilable	18 %
S	Azufre	2.50 %
Mg	Magnesio	1.80 %
Ca	Calcio	5.90 %
Fe	Hierro	0.10 %
B	Boro	0.002 %
Zn	Zinc	0.010 %
Cu	Cobre	0.0002 %
Mn	Manganeso	0.002 %

### 2.6. Variables que intervienen en los sistemas hidropónicos

Los sistemas hidropónicos permiten un crecimiento eficiente de las plantas sin suelo. El éxito de estos sistemas depende del control preciso de diversas variables que afectan el desarrollo del cultivo y su producción continua, en la Fig. 2.15 se muestra los tipos de variables que son monitoreadas en el sistema hidropónico.



Figura 2.15: Variables a monitorear en el sistema hidropónico.

**pH:** El Potencial de Hidrógeno (pH) es estabilizar la acidez de la solución nutritiva para que las plantas puedan absorber nutrientes de manera más eficiente, ya que un pH desbalanceado puede reducir la disponibilidad de nutrientes clave como calcio, fósforo y hierro (Fonseca y cols., 2005).

El pH mide la acidez o alcalinidad de la solución nutritiva. Las plantas tienen un rango deseable de pH (generalmente entre 5.5 y 6.5) en el que pueden absorber los nutrientes de manera efectiva. Un pH fuera de este rango puede causar bloqueos de nutrientes, afectando la salud de las plantas.

En la Tabla 2.6 se muestra que se puede realizar el ajuste de pH de la solución acuosa, teniendo claro con que se puede reducir o aumentar el pH.

Tabla 2.6: Ajuste de pH

Ácido por debajo del rango	Alcalino por encima del rango
Para bajarlo	Para subirlo
Agrega ácido cítrico, ácido sulfúrico ácido nítrico o ácido fosfórico para reducir el pH.	Agrega carbonato de calcio o bicarbonato de sodio para aumentar el pH.

**Temperatura:** La temperatura ambiente, la temperatura de la solución nutritiva es un factor para considerar. Elevadas temperaturas pueden provocar una drástica reducción del oxígeno disuelto (OD) causando una reducción en la tasa de respiración de las raíces (Castañares, 2022).

En la Fig. 2.16 se muestra el rango de temperatura que es recomendado durante el día y la noche para las hortalizas en el sistema hidropónico.



Figura 2.16: Temperatura del día y de la noche

La temperatura de la solución afecta la absorción de nutrientes y el metabolismo de las plantas. Si la temperatura es demasiado alta, puede reducir el oxígeno disuelto en el agua, afectando el crecimiento radicular. Si es demasiado baja, las plantas pueden entrar en estado de shock y detener su crecimiento.

En la Tabla 2.7 se muestra una descripción de las causas que suceden con las temperaturas altas y bajas en la solución nutritiva.

Tabla 2.7: Temperatura en la solución nutritiva

Altas	Bajas
Las temperatura altas también pueden desacelerar la germinación y el crecimiento de las plantas, ya que el agua caliente contiene menos oxígeno disuelto.	El frío hace que las membranas celulares pierden fluidez y se vuelvan más rígidas. Impactando directamente el transporte del agua y nutrientes en toda la planta.

**CE:** La conductividad eléctrica (CE) de la solución de sistemas de cultivo hidropónico está en relación con la concentración de sales disueltas y con la cantidad Total de Sólidos Disueltos (TDS), principalmente sales minerales. El control de esta variable permite mantener el adecuado estado de la solución y evitar el riesgo de un exceso de salinidad, lo que provoca una disminución de la producción (Wurm y cols., 2019).

La CE indica la concentración de sales disueltas en la solución nutritiva, lo cual refleja la cantidad de nutrientes disponibles para las plantas. Una CE demasiado baja puede indicar una insuficiencia de nutrientes, mientras que una CE demasiado alta puede causar toxicidad por exceso de nutrientes.

La conductividad eléctrica afecta directamente la asimilación de nutrientes por parte de las plantas:

- Valores demasiado altos pueden ser fitotóxicos, lo que significa que son tóxicos para las plantas.
- Valores demasiado bajos indican una deficiencia de nutrientes.

Por lo que en la Tabla 2.8 se muestra el rango adecuado para el cultivo de hortalizas en hidroponía.

Tabla 2.8: Rango para el cultivo hidropónico

Rango
La EC se mide en Siemens por centímetro ( $\frac{S}{cm}$ ) o Partes por millón ( <i>ppm</i> )
<b>1.5 a 3 <math>\frac{mS}{cm}</math> o 750 a 1500 <i>ppm</i></b>

**TDS:** Sólidos Disueltos Totales (TDS) son básicamente la suma de todos los minerales, metales, y sales disueltos en el agua y es un buen indicador de la calidad del agua (Sigler y Bauder, 2017).

El TDS mide la cantidad total de minerales y sales disueltas en la solución nutritiva. Similar a la CE, un valor de TDS correcto asegura que las plantas reciben una cantidad equilibrada de nutrientes, mientras que un TDS desequilibrado puede llevar a problemas de nutrición.

**Salinidad:** La tolerancia a la salinidad se define en términos generales como la capacidad de las plantas para crecer satisfactoriamente en suelos salinos, independientemente del mecanismo que utilicen para disminuir el efecto negativo de las sales solubles (Saccoccia, 2020).

Está relacionada con la concentración de sales en la solución. Una salinidad alta puede ser perjudicial para las plantas, ya que puede interferir con la absorción de agua y nutrientes, generando estrés osmótico.

**S.G.:** La gravedad específica o densidad relativa de una sustancia se define como la razón entre la densidad de la sustancia y la densidad del agua a una temperatura determinada (4°C). La densidad y el peso específico están relacionados, la densidad relativa también se puede definir como la relación entre el peso específico de una sustancia y el peso específico del agua a una temperatura determinada (Cotos Morales, 2019).

En hidroponía, la gravedad específica puede utilizarse como un indicador del contenido de nutrientes o sales en la solución. Se refiere a la densidad de la solución nutritiva en comparación con el agua pura. Una gravedad específica correcta asegura que la concentración de nutrientes es la adecuada para las plantas.

## 2.7. Modelo dinámico propuesto

Un modelo dinámico es una representación matemática, lógica o computacional de un sistema que evoluciona con el tiempo. Se utiliza para analizar cómo cambian las variables del sistema en función de ciertas condiciones o entradas.

En esta sección se considera como caso de estudio desarrollar un modelo matemático que describe el comportamiento del flujo del agua en el circuito hidráulico con el propósito de aproximar el comportamiento del sistema hidropónico de esta tesis, véase en la Fig. 2.17.

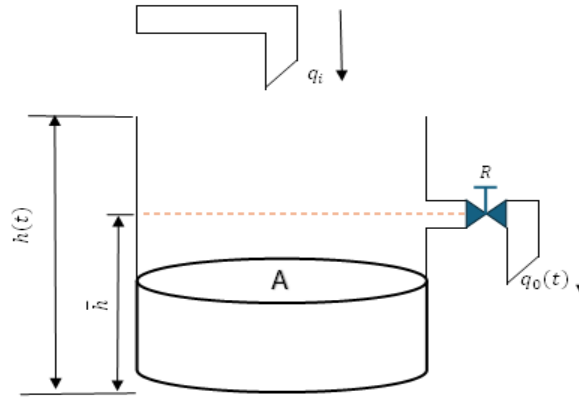


Figura 2.17: Diagrama esquemático de un tanque de agua.

En la Fig. 2.17 se muestra el esquema del modelo dinámico del tanque, teniendo como parámetro  $A$  se refiera a la sección transversal del tanque y  $R$  a la apertura de la válvula de salida. Las variables son las siguientes:

donde

$q_i$  = Flujo de entrada

$A$  = Área transversal del tanque.

$q_o(t)$  = Flujo de salida por desbordamiento.

$h(t)$  = Nivel del flujo.

$\bar{h}$  = Nivel de desbordamiento del flujo.

$R$  = Válvula de salida.

### Modelo del tanque

En el modelo del tanque se representa el llenado y desbordamiento de agua, donde la expresión para la variable  $q_o(t)$  representa el flujo de desbordamiento, se muestra en la siguiente ecuación:

$$q_o(t) = \begin{cases} \frac{h(t) - \bar{h}}{R}, & h(t) \geq \bar{h} \\ 0, & h(t) < \bar{h} \end{cases} \quad (2.1)$$

La diferencia  $h(t) - \bar{h}$  debe cumplir la condición de que  $h(t) \geq \bar{h}$  para caracterizar el flujo de salida, siempre y cuando  $R > 0$ , si no entonces no existe flujo de salida  $q_o(t)$ .

La ecuación para expresar la tasa de cambio del volumen del líquido en el tanque es la siguiente: donde:

$$\frac{dV(t)}{dt} = q_i - q_o \quad (2.2)$$

$$a) \quad V(t) = Ah(t) \quad (2.3)$$

$$b) \quad \text{Si } V(t) = Ah(t)$$

$$\frac{dV(t)}{dt} = \frac{d}{dt}(Ah(t)) \quad (2.4)$$

$$\frac{dV(t)}{dt} = A \frac{dh(t)}{dt} \quad (2.5)$$

Entonces;

$$\begin{aligned} \frac{dV(t)}{dt} &= q_i - q_0 \\ A \frac{dh(t)}{dt} &= q_i - q_0 \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$\sum_{TQ} : \begin{cases} \frac{dh(t)}{dt} = \frac{1}{A}q_i - \frac{q_0}{A} \\ q_0 = \begin{cases} \frac{h(t) - \bar{h}}{R}, h(t) \geq \bar{h} \\ 0, h(t) < \bar{h} \end{cases} \end{cases}, h(0) = h_{ini}; \quad (2.7)$$

### 2.7.1. Desarrollo del modelo dinámico de un tanque con desbordamiento

El proceso de entrada y salida de agua en un tanque consta de tres fenómenos importantes para su dinámica:

- Afluencia de agua hacia el tanque, que corresponde al flujo de entrada y puede ser controlado o libre.
- Equilibrio hidráulico en el interior del tanque, donde el nivel de agua circula dependiendo de la tasa de entrada y salida.
- Descarga del flujo de agua desde el tanque, regulada por la salida, que puede estar determinada por válvulas, bombas u otros mecanismos.

Para cada fenómeno del proceso, se puede plantear una ecuación diferencial que describa la dinámica del volumen de agua en cada etapa:

- Para la entrada, la ecuación podría describir el flujo de agua en función del tiempo y las condiciones de entrada.
- En el equilibrio hidráulico, se consideraría la variación del nivel de agua dentro del tanque.
- La descarga equilibrada en el flujo de salida en función del tiempo.

#### Consideraciones en las que se basa el modelo dinámico.

1. El sistema tiene cambios de nivel de flujo dentro del tanque, es la diferencia entre el flujo de entrada y el flujo de salida.
2. El nivel se relaciona directamente con el nivel de líquido en el tanque.

3. El flujo de entrada puede ser constante, controlado o depender de factores externos, como una bomba o una válvula.
4. El modelo considera el nivel de entrada inicial del tanque para resolver la ecuación diferencial.
5. El sistema considera tres fases (flujo de entrada, desbordamiento y líquido de salida).

## 2.8. Energía renovable

De acuerdo con el Inventario Nacional de Energías Renovables (INERE), las energías con mayor potencial son la solar y la eólica; Los factores claves en su desarrollo son la política, la reducción de costos y el desarrollo tecnológico. La inclusión de energías renovables en la matriz energética es a través de la producción de electricidad. Sin embargo, el gas natural está ganando importancia hoy en día debido a su bajo costo y al hecho de que es menos contaminante que otros hidrocarburos. En México su importancia ha incrementado: de 2002 a 2012 su participación pasó de 29 a 50 % en la producción de energía eléctrica, esto contrasta con la energía proveniente de fuentes renovables, la cual muestra una tendencia a la disminución, ya que del 2010 al 2013 pasó del 18 al 13.7 % (Vásquez, 2015).

Los generadores fotovoltaicos dependen de diferentes aspectos correlacionados con los términos de sus procesos de producción o de servicio de la infraestructura que los componen. Estos aspectos también están vinculados al marco regulatorio de la región donde se ubica la institución de interés. Las tarifas aplicadas a la entidad en función de la energía procedente de la red de distribución a la que está adherida. Las tarifas aplicadas a la energía producida mediante renovables que posteriormente sería adquirida por la empresa responsable para operar la red de distribución. El efecto que la integración de estos tipos de producción a partir de fuentes de energía renovables puede tener sobre el impacto ambiental y social de la institución (Carrera y cols., 2022).

Uno de estos términos es el de energía agrivoltaica, que se refiere al uso de la tierra para actividades agrícolas y para la generación de energía eléctrica mediante paneles fotovoltaicos. El desarrollo de sistemas capaces de combinar la actividad agrícola con la producción de electricidad, mediante la instalación de paneles solares fotovoltaicos en tierras agrícolas, se remonta a principios de la década de 1980. Muchas fuentes coinciden en que la idea de la agricultura y la energía fotovoltaica se originó en el instituto de investigación Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme. Se refiere a un sistema que permite utilizar simultáneamente una superficie de terreno para fines agrícolas y para la producción de electricidad mediante paneles solares fotovoltaicos (Maltagliati, 2024).

### 2.8.1. Potencia hidráulica de bomba

Las bombas de agua agrícolas son aquellas que favorecen el riego de los cultivos y rentabilizan el trabajo de los agricultores. Las bombas impulsan agua a diferentes profundidades, alcanzando distancias. Existen tipos diferentes de bombas de agua que satisfacen eficazmente las necesidades del campo. Las bombas de agua se utilizan para determinar la cantidad que necesita el cultivo en cuestión. Bomba hidráulica para uso agrícola, tiene mucha por lo tanto puede distribuir agua sobre un área más grande con más presión (Domínguez y cols., 2025).

La eficiencia de la bomba hidráulica se considera técnicamente como una relación de la potencia hidráulica y la potencia de la bomba, es decir:



$$\eta = \frac{Q\rho gh_B}{P_B} \quad (2.8)$$

Despejando la potencia de la bomba, es decir:

$$P_B = \frac{Q\rho gh_B}{746\eta} \quad (2.9)$$

donde:

$P_B$  = Potencia de la bomba

$g$  = Aceleración de la gravedad en  $\frac{m}{s^2}$

$Q$  = Caudal del fluido en  $\frac{m^3}{s}$

$\rho$  = Densidad del agua  $\frac{kg}{m^3}$

$h_B$  = Altura máxima de la bomba en  $m$

$\eta$  = Eficiencia de la bomba hidráulica

746W = 1HP

### 2.8.2. Consumo de energía

El consumo de energía de una bomba es fundamental para evaluar su eficiencia, costos operativos y sostenibilidad. Conocer cuánta energía consume permite tomar decisiones informadas sobre su selección y mantenimiento. Además, ayuda a identificar posibles ahorros energéticos, reducir el impacto ambiental y garantizar un funcionamiento adecuado dentro de los parámetros de diseño.

La energía consumida se mide en vatios-hora (Whr) y se calcula así:

$$E = Pt \quad (2.10)$$

donde:

$E$  = Energía consumida en kWhr

$P$  = Potencia de la bomba en W

$t$  = Tiempo de operación en horas (hr)

#### Consumo por hora

$$E = kW \times hr \quad (2.11)$$

$$E = kW \times 1 = E_{hora}$$

#### Consumo por día

$$E = kW \times hr \quad (2.12)$$

$$E = kW \times 24 = E_{día}$$

#### Consumo por mes

$$E = kW \times hr \times días \quad (2.13)$$

$$E = kW \times 24 \times 30 = E_{mes}$$

## Conclusion del capítulo

En el capítulo se abordó el análisis de los sistemas hidropónicos que han demostrado ser una alternativa efectiva y sustentable en la producción de hortalizas. A lo largo del capítulo se discuten diferentes métodos hidropónicos, desde la Técnica de Flujo de Nutrientes (NFT), aeroponía, sistemas en sustrato, de flujo y reflujos, de goteo, de mecha y acuapónicos. En la hidroponía la solución nutritiva se basa en proporcionar directamente a las plantas los macronutrientes y micronutrientes esenciales para su desarrollo. La composición de estos nutrientes influye en el crecimiento y la productividad de los cultivos, y el control de variables como el pH, la temperatura y la conductividad eléctrica es crucial, porque afectan la absorción de nutrientes y la salud de las plantas.

El capítulo también aborda el modelo dinámico de un tanque de agua, describiendo matemáticamente el flujo de entrada y salida del líquido. Este modelo permite analizar y optimizar el funcionamiento del sistema hidropónico. Por otra parte, se analiza el uso de energías renovables, especialmente la solar, en la producción agrícola. Se menciona la energía agrovoltaica, que combina la generación de electricidad mediante paneles solares con la actividad agrícola. Además, el consumo de energía de la bomba hidráulica.

En conclusión, la hidroponía representa una tecnología agrícola con potencial de expansión y aplicación en diversas regiones, especialmente donde el suelo y el agua son limitados. La continuación de la investigación de estos sistemas permitirán mejorar la productividad, reduciendo los costos y promoviendo una agricultura más sostenible, contribuyendo así a la seguridad alimentaria y al uso eficiente de los recursos naturales.

# Capítulo 3

---

## Diseño del sistema hidropónico

---

En este capítulo se presentan los diseños en distintas perspectivas del diseño esquemático, diseño en dos dimensiones (2D) y diseño en tres dimensiones (3D), con el objetivo de proporcionar una representación clara y detallada del sistema. Se detallan las especificaciones de los materiales utilizados para la construcción del del prototipo del sistema hidropónico, es una etapa fundamental en el desarrollo del proyecto, ya que permite visualizar la disposición y funcionamiento que conforman el sistema.

Este prototipo está diseñado para un sistema hidropónico en cascada, debido a literatura es ideal para cultivar hortalizas, hierbas o pequeñas plantas sin necesidad de suelo. Mi propuesta en este diseño es para que tenga una mejor distribución del agua por lo que la conexión de estrada del flujo es en forma de "T", lo permite la distribución eficiente del agua a través de las tuberías, por lo que su recirculación también tiene una conexión en forma de "T", asegurando que cada planta reciba la cantidad necesaria de solución nutritiva. Este diseño permite que el agua fluya a través de los tubos y regrese al depósito, minimizando el desperdicio de recursos hídricos.

En los sistemas hidropónicos se recomienda tener del 1% al 5% de inclinación o desnivel en las tuberías, para garantizar un flujo adecuado sin comprometer la absorción de nutrientes ni la oxigenación de las raíces. La inclinación en este prototipo es del 2% lo que permite que la solución nutritiva se desplace de manera controlada desde el punto de entrada hasta el punto de salida sin necesidad de una bomba en cada sección. Reduciendo el consumo de energía y el riesgo de acumulación de agua estancada. En conclusión la inclinación de la tubería en los sistemas hidropónicos es un aspecto fundamental para garantizar el flujo adecuado de la solución nutritiva y la correcta oxigenación para el desarrollo de las plantas.

En la sección 3.1 se presenta el diseño esquemático del prototipo hidropónico, siendo el primer diseño que se analizó para tener una visión de como se conformaría el prototipo.

En la sección 3.2 se presenta el diseño en 2D del prototipo hidropónico, ofreciendo una vista simple y clara de la disposición y distribución de la estructura general del prototipo.

En la sección 3.3 se presenta el diseño en 3D del prototipo hidropónico, con el objetivo de proporcionar una visión más detallada y realista de los componentes del prototipo.

En la sección 3.4 se presenta la lista de materiales a utilizar para la construcción del prototipo.

En la sección 3.5 se presenta el manual usuario para el procedimiento a seguir para el armado del prototipo.

En la sección 3.6 se presenta la el paso a paso de la construcción del prototipo hidropónico.

### 3.1. Diseño esquemático

El diseño esquemático del sistema hidropónico es fundamental en la visualización de la colocación del prototipo, ya que permite definir con precisión de la estructura y el funcionamiento del sistema hidropónico. En la Fig. 3.1 se realizó el diseño esquemático del sistema hidropónico con respecto al siguiente esquema mostrado.

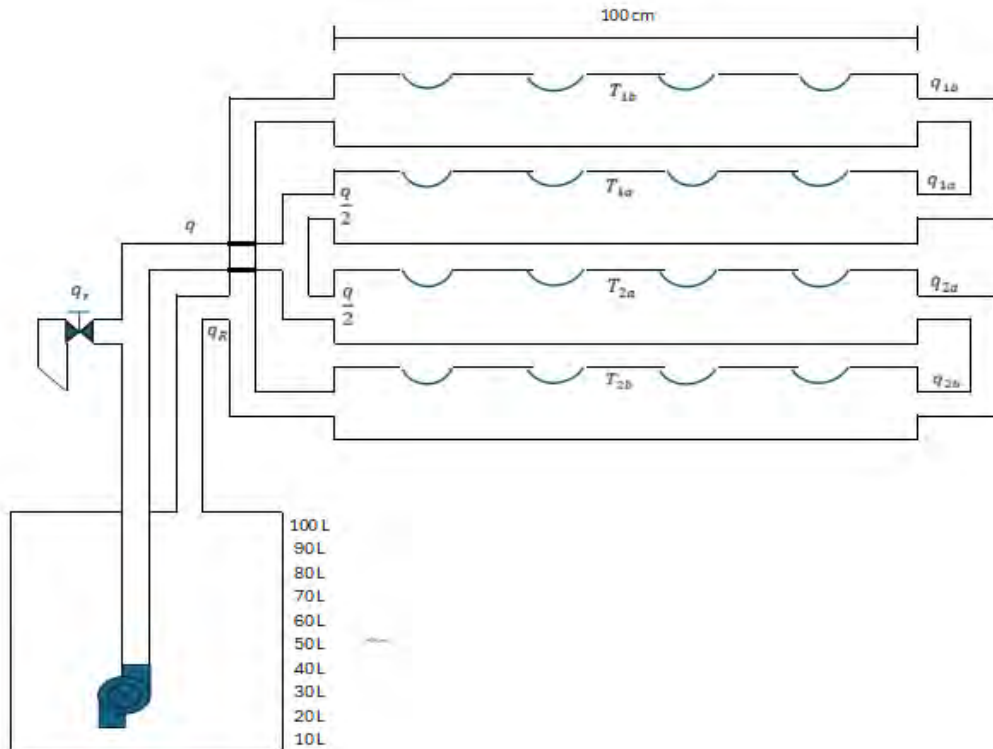


Figura 3.1: Esquema del diseño hidropónico

donde:

$q$  = Flujo de entrada.

$\frac{q}{2}$  = Flujo de entrada a los dos tanques hidropónicos.

$q_R$  = Flujo de retorno

$q_r$  = Flujo de resistencia

$q_{1a}$  y  $q_{2a}$  = Flujo de los tanques superiores

$q_{1b}$  y  $q_{2b}$  = Flujo de los tanques inferiores

En la Fig. 3.2 se realizó el diseño esquemático del tanque hidropónico, se pueden observar sus respectivas medidas que son utilizadas para los tanques hidropónicos del prototipo.

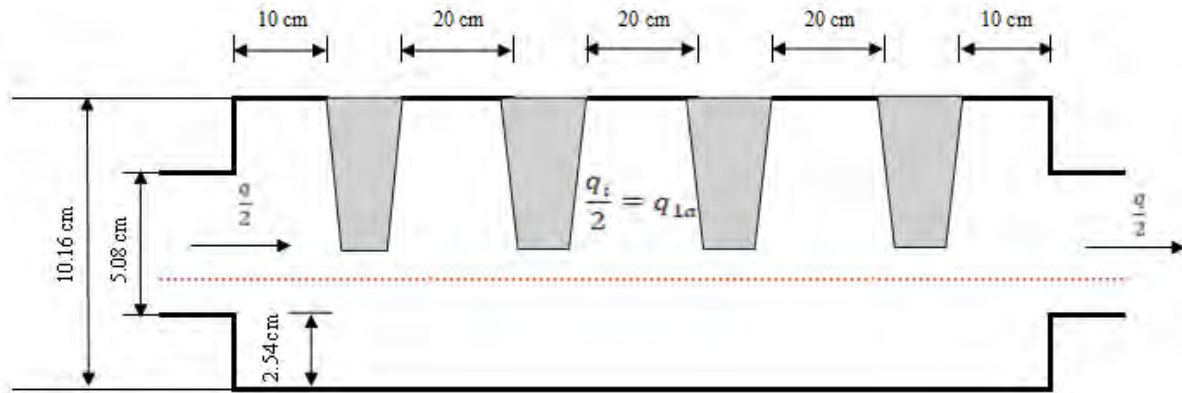


Figura 3.2: Diseño axial del tanque hidropónico

En la Fig. 3.3 se realizó el diseño axial del interior del tanque hidropónico. El objetivo es tener una vista esquemática del volumen interior de agua que tendrá cada tanque hidropónico.

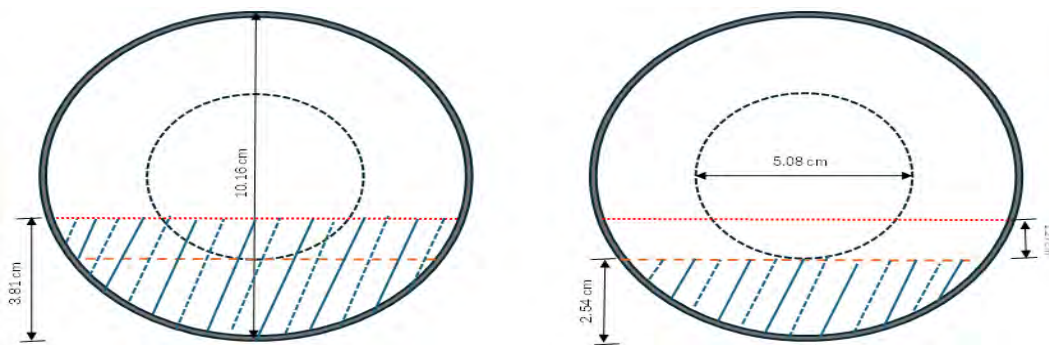


Figura 3.3: Vista axial interior del tanque hidropónico

En la Fig. 3.4 se realizó el diseño de las dimensiones de las canastillas hidropónicas que estarán siendo utilizadas en el sistema hidropónico.

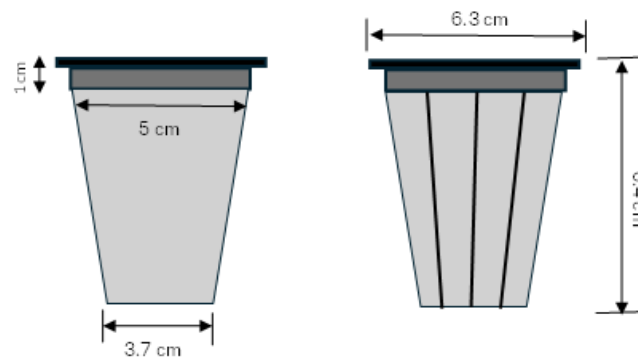


Figura 3.4: Dimensiones de las canastillas hidropónicas

Con la visualización del esquema se optó por realizar un diseño en 2D del sistema hidropónico, el objetivo de este diseño es tener una perspectiva de las conexiones y orientación de los componentes del prototipo.

### 3.2. Diseño en 2D

El diseño en 2D permite analizar de manera sencilla una mejor visualización de la representación y disposición de los componentes en el sistema, como tuberías, conexiones, interconexiones, tanque de agua y bomba del prototipo. El diseño en 2D muestra las distintas perspectivas y dimensiones del prototipo, con el objetivo de proporcionar una representación gráfica del sistema hidropónico..

La disposición de los tubos en niveles inclinados permite un mejor aprovechamiento del espacio y facilita el drenaje hacia el interior del tanque, promoviendo un flujo constante y sin estancamientos. Véase el Anexo (A.1) para más información de las medidas del prototipo.

En la Fig. 3.5 se realizó el diseño en 2D del sistema hidropónico con respecto a la siguiente figura mostrada.

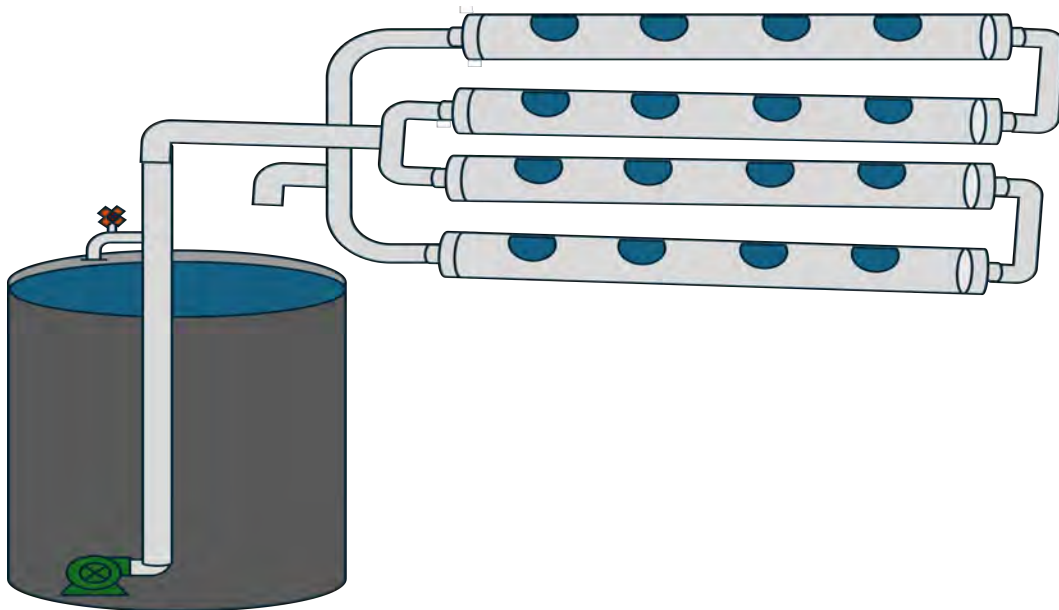


Figura 3.5: Esquema en 2D del sistema hidropónico

Para tener una mejor visualización del prototipo del sistema hidropónico, se optó por realizar un diseño en 3D, con el objetivo de tener más claros los materiales a utilizar.

### 3.3. Diseño en 3D

El diseño en tercer dimensión permite tener una visualización clara y completa de como queda ensamblado el prototipo del sistema hidropónico. También ayuda a tener las especificaciones de las medidas de donde va cada pieza, garantizan la correcta colocación y ensamblaje de los componentes, asegurando la eficiencia y durabilidad del sistema.

En la Fig. 3.6 se realizó el diseño en 3D con el software SolidWorks del sistema hidropónico. Podemos observar la vista isométrica del sistema hidropónico con respecto a la siguiente figura mostrada.

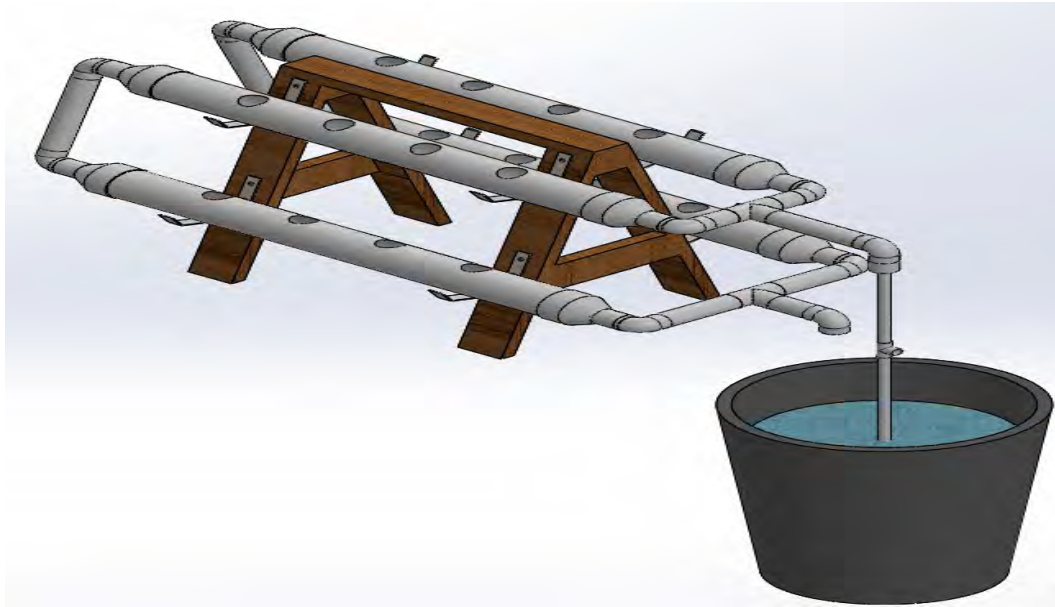


Figura 3.6: Diseño 3D del sistema hidropónico

La estructura de soporte de madera brinda estabilidad y facilita el mantenimiento del sistema, asegurando que los tubos permanezcan en su lugar sin desplazamientos.

En la Fig. 3.7 se puede observar la vista lateral del sistema hidropónico, proporcionando una referencia clara para ensamblar el sistema correctamente, asegurando que cada parte encaje como se planeó.

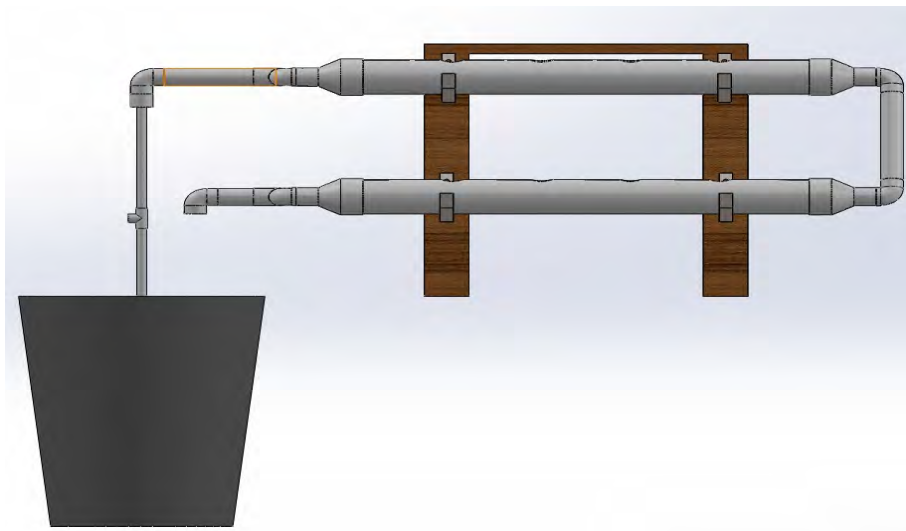


Figura 3.7: Vista 3D lateral

Diseñar en 3D tiene como ventaja que permite tener la identificación de posibles problemas en la posición de los componentes, como tuberías, soportes y depósito de agua. En la Fig. 3.8 se puede observar la vista superior del sistema hidropónico.

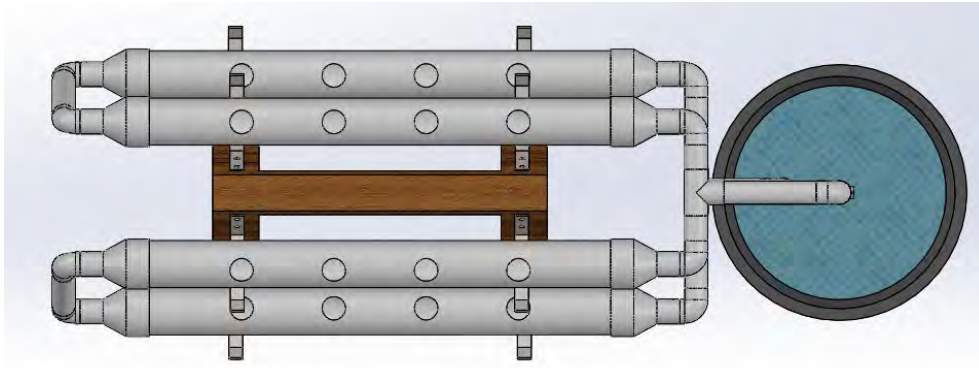


Figura 3.8: Vista 3D superior

Otra de las ventajas es que permite visualizar la estructura desde diferentes ángulos para entender mejor su distribución, posicionamiento y funcionamiento del sistema. En la Fig. 3.9 se puede observar la vista frontal del sistema hidropónico.

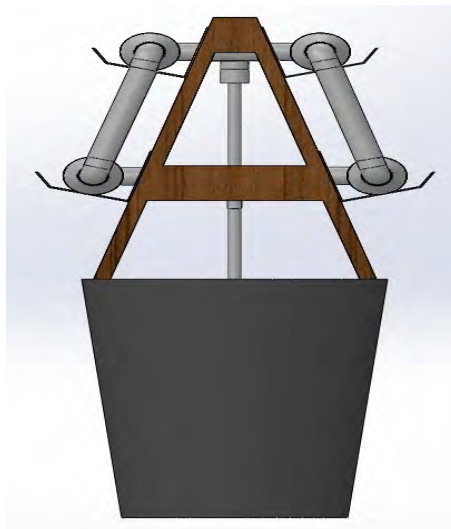


Figura 3.9: Vista 3D frontal

Este diseño en 3D permite analizar el prototipo desde diferentes perspectivas de la vista (lateral, frontal e isométrica), facilitando la identificación de posibles errores, también permite tener la correcta distribución del espacio y mejora en la funcionalidad del sistema.

Además, la vista en 3D del prototipo no solo ayuda en la etapa de planificación y construcción, sino que también para su análisis. Permitiendo tener su capacidad para simular el flujo de agua y nutrientes, no obstante también permite anticipar problemas antes de la implementación real del prototipo.

### 3.4. Especificaciones de los materiales

Se detallan las especificaciones de los materiales utilizados para la construcción del prototipo del sistema hidropónico, proporcionando lista de piezas, componentes y herramientas necesarias.



En la Tabla 3.1 se muestra la lista de materiales que son conformados para la construcción del sistema hidropónico, estas especificaciones de materiales corresponden al sistema hidropónico.

Tabla 3.1: Materiales para el sistema hidropónico

Cantidad	Nombre	Medida
8	Tubos de PVC de 1m	4 in
8	Coples de PVC	4 in
8	Reducciones de PVC	4 in a 2in
10	Codos de PVC	2 in
10	Coples de PVC	2 in
1	Conexión T de PVC	2 in
2	Tubos de PVC de 36cm	2 in
3	Tubos de PVC de 18cm	2 in
2	Tubos de PVC de 14cm	2 in
1	Tubo de PVC de 80cm	1/2 in
1	Tubo de PVC de 40cm	1/2 in
1	Reducción de PVC	2 in a 1/2 in
1	Conexión T de PVC	1/2 in
1	Tubo de PVC de 5cm	1/2 in
1	Llave de PVC	1/2 in
1	Conector cuerda interior de PVC	1/2 in
1	Conector hembra cuerda interior de PVC	1/2 in
1	Bomba sumergible	3500L/h, 60W
1	Tanque de plástico	105L
1	Burro de madera	75.7cm x 72.3cm x 52.2cm
8	Escuadras con soporte	4 in
16	Pijas para madera	2 in
1	Pegamento para PVC	475 ml
1	Lija para PVC	28 cm x 22.9 cm

En la Tabla 3.2 se muestra la lista de herramientas y accesorios a utilizar para hacer la construcción del prototipo hidropónico.

Tabla 3.2: Herramientas y accesorios

Cantidad	Nombre
1	Taladro
1	Broca sierra 2"
1	Desarmador de cruz
1	Segueta para PVC
1	Lentes protección

### 3.5. Manual usuario

Se realizó un manual de construcción con el paso a paso para la construcción del sistema hidropónico.

En la Tabla 3.3 se muestra la lista de piezas a utilizar para hacer la construcción del prototipo hidropónico.

Tabla 3.3: Lista de las piezas a utilizar para la construcción y montaje del sistema hidropónico

Número de pieza	Descripción
1	Tubo de PVC de 4in de 1 m
2	Reducción de PVC de 4in a 2in
3	Cople de PVC de 4in
4	Cople de PVC de 2in
5	Codo de PVC de 2in
6	Tubo de PVC de 2in de 14 cm
7	Conexión T de PVC de 2in
8	Tubo de PVC de 2in de 18 cm
9	Tubo de PVC de 2in de 36 cm
10	Reductor de PVC de 2in a 1/2"
11	Tubo de PVC de 40cm de 1/2in
12	Conexión T de 1/2in
13	Tubo de PVC de 80cm de 1/2in
14	Conector hembra cuerda interior de PVC de 1/2"
15	Tubo de PVC de 1/2in de 5 cm
16	Conector hembra cuerda interior de PVC 1/2in
17	Llave de PVC de 1/2"
18	Soporte de 4in
19	Base de madera
20	Bomba sumergible
21	Tanque de plastico de 100 L
22	Pegamento para PVC
23	Pijas de 2in

El manual de construcción se muestra en el Anexo (A.2) donde se puede observar el procedimiento a seguir para la construcción del prototipo hidropónico.

### 3.6. Construcción del prototipo

Para la construcción del sistema hidropónico se realizan varias actividades en las cuales las principales son cortar la tubería de PVC, la perforación de los orificios para las canastillas, hasta hacer el montaje del sistema.

En las Figuras 3.10(a-d), se muestra el procedimiento a seguir para la construcción del prototipo del sistema hidropónico, esta visualización de las imágenes nos permite mostrar que se fue realizando la construcción.



(a) Tubería de 4"



(b) Perforando cada 20 cm



(c) Tubos lijados



(d) Coples pegado

Figura 3.10: Actividades a realizar para la construcción del prototipo del sistema hidropónico

En las Figuras 3.11(a-d), se muestra la visualización del procedimiento que se realizó para el armado del prototipo hidropónico, permitiendo tener claro como debe de ser construido.



(a) Ensamblaje



(b) Codos de 2"



(c) Codos y reducciones



(d) Prototipo terminado

Figura 3.11: Construcción y ensamblaje del prototipo hidropónico.

### 3.6.1. Montaje del sistema hidropónico

Se realizó el montaje del sistema hidropónico de recirculación con sustrato, para los nutrientes se utilizó una solución nutritiva que nos aporta los nutrientes requeridos para el funcionamiento de este sistema hidropónico.

En las Figuras 3.12(a-f), se muestra en procedimiento del montaje del prototipo del sistema hidropónico, esto permite tener la fiabilidad de que el prototipo está funcionando correctamente como se analizó.



(a) Montaje del sistema



(b) Adaptabilidad de los chiles habaneros



(c) Sistema en funcionamiento



(d) Vista superior del prototipo



(e) Visión lateral del prototipo



(f) Chiles habaneros en crecimiento

Figura 3.12: Montaje del prototipo del sistema hidropónico NFT

## Conclusión del capítulo

El diseño del sistema hidropónico presentado en este capítulo permitió establecer un plan claro y estructurado para la construcción del prototipo. A lo largo del desarrollo se detallaron los distintos componentes, materiales y procesos involucrados, asegurando la eficiencia del sistema desde su diseño hasta su montaje final.

En un primer paso se abordó la representación esquemática del sistema a través del diseño axial de los tanques, permitiendo visualizar el volumen de agua y la disposición de las canastillas. Este enfoque facilitó la mejora del espacio y la distribución de los componentes dentro del sistema. Luego se desarrollaron representaciones bidimensionales que permitieron comprender la interconexión entre los diferentes elementos, como los accesorios y la bomba de agua.

Durante la construcción del prototipo se llevaron a cabo varias actividades clave, como cortar y lijar tuberías, perforar agujeros para las canastillas. La documentación visual del proceso permitió verificar cada etapa de la construcción, asegurando que el diseño se implementara correctamente.

Finalmente, la implementación del sistema hidropónico confirmó su funcionalidad mediante la implementación de una solución nutritiva y la evaluación del crecimiento de cultivos, como los chiles habaneros, demostrando la viabilidad del sistema de recirculación.

# Capítulo 4

---

## Resultados de la Implementación del Sistema Hidropónico

---

En este capítulo se presentan los resultados de esta tesis, donde se puede observar el análisis de la implementación del sistema hidropónico NFT con sustrato, teniendo en cuenta el estudio de un modelo dinámico de los tanques hidropónicos, junto con su desarrollo y simulaciones para poder ponerlo en práctica en el sistema hidropónico, el prototipo se encuentra ubicado en el edificio de Ciencias de la Ingeniería del Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), campus de Mécanica, localizado en calle Apatzingan 212, Palmira, 62490 Cuernavaca, Mor., México. Por lo cual se tuvo que considerar la temperatura ambiente bajo la cual estuvo implementado el funcionamiento del sistema hidropónico. También se presenta el diseño del sistema hidropónico, teniendo en cuenta desde un esquema hasta el diseño en tercera dimensión.

En la sección 4.1 se considera el desarrollo dinámico con desbordamiento de los tanques hidropónicos. El principal objetivo es tener una aproximación del nivel de agua donde se efectúa el desbordamiento del líquido.

En la sección 4.2 se documenta el proceso de construcción del prototipo con sus diferentes adecuaciones adecuaciones. Se describe el diseño inicial del sistema, los desafíos encontrados y las soluciones implementadas a través de tres iteraciones del prototipo. Cada modificación se llevó a cabo con el objetivo de mejorar el rendimiento del sistema, garantizar un crecimiento eficiente de las plantas y mitigar los problemas identificados.

En la sección 4.3 se considera la instrumentación del prototipo, ya que es una parte fundamental en el desarrollo y funcionamiento de los sistemas hidropónicos modernos, permitiendo la supervisión y monitoreo en tiempo real de las variables críticas que influyen directamente en el crecimiento y salud de las plantas. Detallando el proceso de selección, calibración y análisis de los datos obtenidos mediante el sistema de sensores implementado en el prototipo hidropónico.

En la sección 4.4 se documenta el periodo de producción de chile habanero empleado en el sistema hidropónico NFT (Nutrient Film Technique) con sustrato. Incluyendo la experimentación, el monitoreo y la supervisión semanal del ciclo de producción, lo que permitió obtener resultados favorables reflejados. A lo largo del proceso, se documentó las distintas etapas del cultivo.

### 4.1. Modelo del tanque hidropónico con desbordamiento

Propuesta de un modelo dinámico que es capaz de representar adecuadamente la dinámica de flujo del agua dentro del sistema, desde su ingreso hasta su posterior drenaje o recirculación. Este proceso incluye la dosificación de nutrientes y el monitoreo de parámetros como el nivel de agua, la oxigenación y la conductividad eléctrica, los cuales son fundamentales para el crecimiento ideal de las plantas, como se

muestra en la Fig. 4.1.

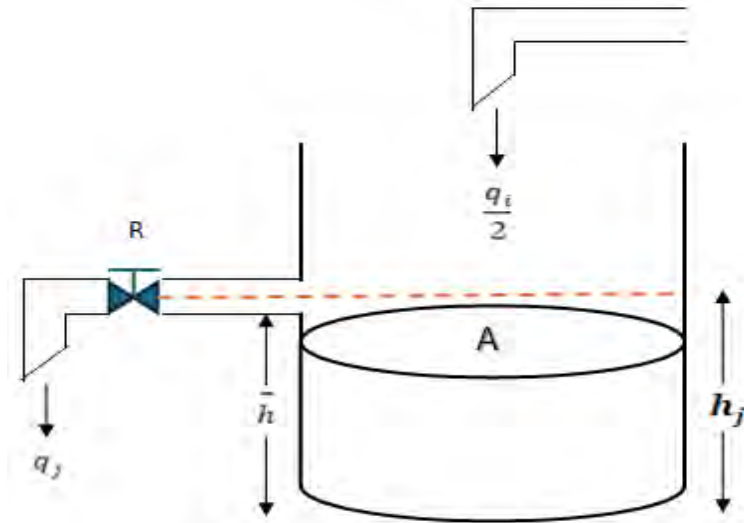


Figura 4.1: Diagrama esquemático de un tanque del sistema hidropónico.

donde

$\frac{q_i}{2}$ : Flujo de entrada

$A$ : Área transversal del tanque.

$q_j$ : Flujo de salida.

$h_j$ : Nivel del flujo.

$\bar{h}$ : Nivel de desbordamiento del flujo.

$R$ : Válvula de salida.

Para representar el llenado y desbordamiento de agua del tanque hidropónico, es posible expresar esto mediante la Ec. (4.1).

$$q_j(h_j(t)) = \begin{cases} \frac{1}{R}(h_j(t) - \bar{h}), & h_j(t) \geq \bar{h} \\ 0, & h_j(t) < \bar{h} \end{cases} \quad (4.1)$$

#### 4.1.1. Modelo dinámico y Simulación del sistema de tanques del prototipo

Otra manera de reescribir la Ec. (4.1), para denotar el nivel de entrada y salida del flujo del tanque, se muestra en la ecuación diferencial siguiente:

$$\sum_{T_{Q_{ja}}} : \begin{cases} \frac{dh_{ja}(t)}{dt} = -\frac{1}{A}q_{ja}(h_{ja}(t)) + \frac{1}{2A}q_i(t) \\ q_{ja}(h_{ja}(t)) = \begin{cases} \frac{h_{ja}(t) - \bar{h}}{R}; & h_{ja}(t) \geq \bar{h} \\ 0; & h_{ja}(t) < \bar{h} \end{cases} \end{cases}, h_{ja}(0) = h_{ja_{ini}}; \quad (4.2)$$



$$\sum_{T_{q_{jb}}} : \begin{cases} \frac{dh_{jb}(t)}{dt} = -\frac{1}{A}q_{jb}(h_{jb}(t)) + \frac{1}{A}q_{ja}(t) \\ q_{jb}(h_{jb}(t)) = \begin{cases} \frac{h_{jb}(t) - \bar{h}}{R}; h_{jb}(t) \geq \bar{h} \\ 0; h_{jb}(t) < \bar{h} \end{cases} \end{cases}, h_{jb}(0) = h_{jb_{ini}}; \quad (4.3)$$

$$j = 1, 2; \quad (4.4)$$

Considerando los modelos del tanque de arriba expresados en la Ec. (4.2), y los modelos de los tanques de abajo expresados en la Ec. (4.3), mediante el metodo de integración numérica de Euler para simular la trayectoria del nivel de líquido, se obtienen en las siguientes ecuaciones:

$$h_{ja}(t_{k+1}) = h_{ja}(t_k) + \delta \cdot \left[ -\frac{1}{A}q_{ja}(h_{ja}(t_k)) + \frac{1}{A}q_{ja}(t_k) \right] \quad (4.5)$$

$$q_{ja}(t_k) = \begin{cases} \frac{h_{ja}(t_k) - \bar{h}}{R}, h_{ja}(t_k) \geq \bar{h} \\ 0, h_{ja}(t_k) < \bar{h} \end{cases} \quad (4.6)$$

$$h_{jb}(t_{k+1}) = h_{jb}(t_k) + \delta \cdot \left[ -\frac{1}{A}q_{jb}(h_{jb}(t_k)) + \frac{1}{A}q_{ja}(t_k) \right] \quad (4.7)$$

$$q_{jb}(t_k) = \begin{cases} \frac{h_{jb}(t_k) - \bar{h}}{R}, h_{jb}(t_k) \geq \bar{h} \\ 0, h_{jb}(t_k) < \bar{h} \end{cases} \quad (4.8)$$

### 4.1.2. Resultados de simulación

Para comprobar los resultados de la Ec. (4.8) se realizaron 4 simulaciones representativas de cada uno de los tanques del sistema hidroponico.

Tabla 4.1: Variables para la entrada y salida de flujo de los tanques

Símbolo	Nombre	Valor	Unidades
$A$	Área de la sección transversal	0.1	[m]
$R$	Constante de la resistencia de apertura de la válvula	0.2	$1 > R > 0$
$\sigma$	Paso de integración	0.01	[seg]
$\bar{h}$	Altura de equilibrio	0.03	[m]
$t_k$	Tiempo	12	[seg]
$h_{1a}(t_k)$	Altura inicial del líquido en tanque 1 <sub>a</sub>	0.001	[m]
$h_{1b}(t_k)$	Altura inicial del líquido en tanque 1 <sub>b</sub>	0.001	[m]
$h_{2a}(t_k)$	Altura inicial del líquido en tanque 2 <sub>a</sub>	0.001	[m]
$h_{2b}(t_k)$	Altura inicial del líquido en tanque 2 <sub>b</sub>	0.001	[m]

4.1.2.1. Circuito hidráulico con 4 tanques acoplados

En la Fig. 4.2 se realizó el siguiente circuito hidráulico del sistema hidropónico.

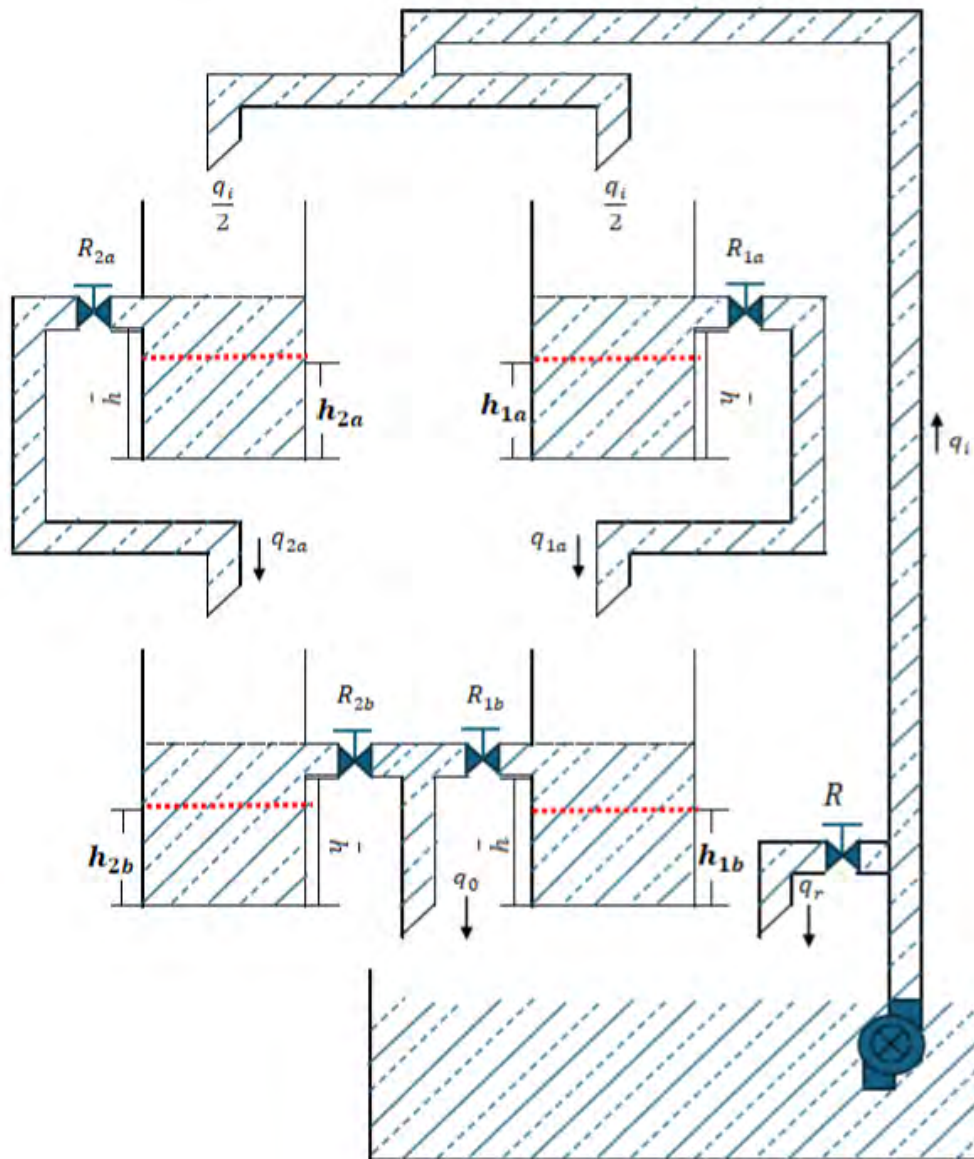


Figura 4.2: Circuito hidráulico

4.1.3. Simulación de los tanques superiores  $1_a$  y  $2_a$

El objetivo de esta simulación es describir el comportamiento del sistema expresado en Ec. (4.6) con  $j = 1, 2$ ; del sistema hidropónico y darles una interpretación coherente en relación al caudal de entrada y salida del agua, también para tener la interpretación del desbordamiento del tanque.

La simulación numérica se llevó a cabo en una hoja de cálculo de EXCEL donde se programó el sistema de ecuaciones del sistema hidráulico mediante el método de integración de Euler, hacia adelante con un paso de integración  $\sigma = 0.01\text{seg}$  y un tiempo de simulación  $t_k = 12\text{seg}$  y con número de interacciones en

la simulación  $k = 1200$ . Las condiciones iniciales que el tanque tiene son  $q_i(t_0) = 0.002 \frac{l}{seg}$ .

En las Figuras. 4.3a y 4.3b muestran la dinámica del flujo de entrada y salida de agua que sale del interior del tanque  $1_a$  y  $2_a$ , la cual tienen un comportamiento oscilatorio decreciente, por lo que físicamente representa la cantidad de flujo que ingresa y el tiempo en que tiene el equilibrio del flujo de agua, indicándonos que al segundo 3.1 empieza el desbordamiento de agua de los tanques superiores  $1_a$  y  $2_a$  el cual tienen conexión con los tanques inferiores  $1_b$  y  $2_b$ .

#### 4.1.3.1. Conclusión de las simulaciones de los tanques $1_a$ y $2_a$

En estas simulaciones se puede verificar que el comportamiento del nivel de flujo del agua tiene oscilaciones posteriores que indican que hay pequeñas variaciones en la entrada y salida de flujo de agua, lo que podría deberse a fluctuaciones en la presión del caudal. El sistema parece estabilizarse en torno a un valor máximo de 3.1 segundos, pero con un patrón oscilatorio que probablemente se deba a efectos como el desequilibrio del flujo o la inercia del sistema hidráulico. El modelo también considera un desbordamiento de agua la cual alcanza un valor máximo de estababilización a los 3.1 *seg* en el caudal, sin embargo, se pierde una vez que el flujo se desborda y vuelve a estabilizarse a los 0.5 *seg* lo cuál nos indica que después de estar el tanque en equilibrio oscila cada 0.5 segundos como se muestra en las Figuras. 4.3a y 4.3b.

#### 4.1.4. Simulación de los Tanques inferiores $1_b$ y $2_b$

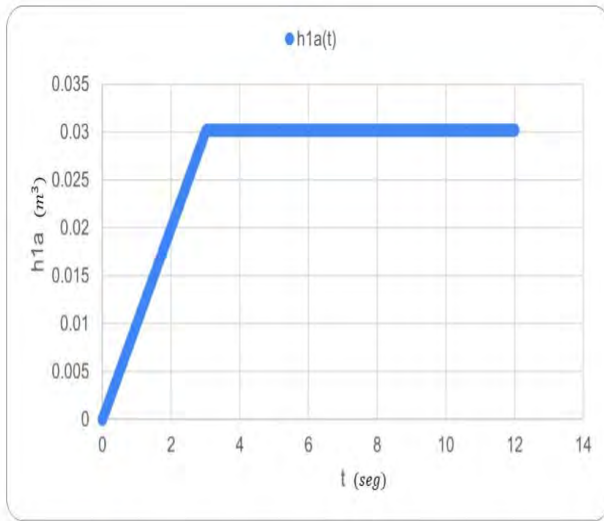
El objetivo de estas simulaciones es describir el comportamiento del sistema expresado en Ec. (4.8) con  $j = 1, 2$ ; del sistema hidropónico y darles una interpretación coherente en relación al caudal de entrada y salida de los tanques hidropónicos y darles una interpretación coherente, también para tener la interpretación del desbordamiento del tanque.

La simulación numérica se llevó a cabo en una hoja de cálculo de EXCEL donde se programó el sistema de ecuaciones del sistema hidráulico mediante el método de integración de Euler, hacia adelante con un paso de integración  $\sigma = 0.01 \text{seg}$  y un tiempo de simulación  $t_k = 12 \text{seg}$  y con número de interacciones en la simulación  $k = 1200$ . Las condiciones iniciales que el tanque tiene son  $q_i(t_0) = \text{salida de flujo de } q_{i_{1_a}} = \frac{l}{seg}$ .

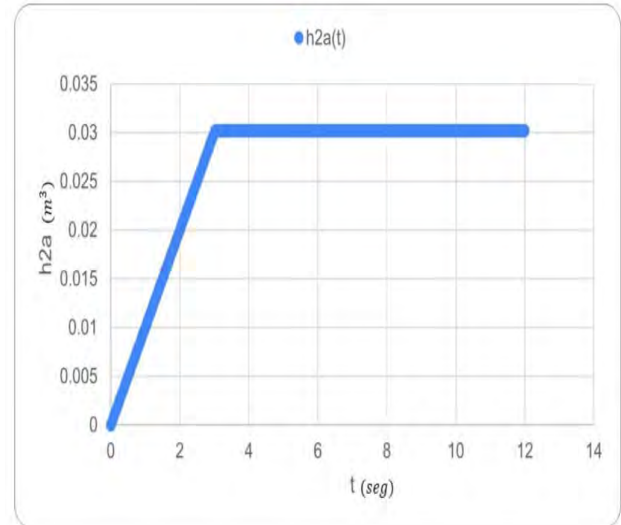
En las Figuras. 4.3c y 4.3d se muestra la dinámica del flujo de entrada y salida de agua que sale del interior del tanque  $1_a$  y  $2_a$ , el cual tiene un comportamiento oscilatoriamente decreciente, pues físicamente representa la cantidad de flujo que ingresa y el tiempo en que tiene el equilibrio del flujo de agua, indicando que al segundo 3.2 empieza a llenarse los tanques  $1_b$  y  $2_b$ .

##### 4.1.4.1. Conclusión de las simulaciones de los tanques $1_b$ y $2_b$

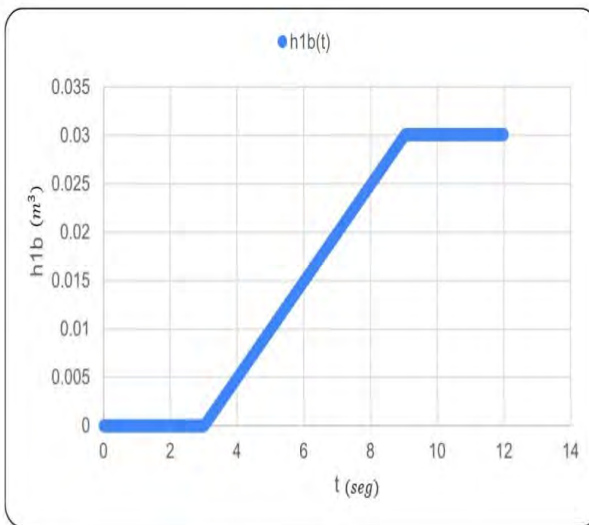
En esta simulación se puede verificar que el comportamiento del nivel de flujo del agua tiene oscilaciones posteriores que indican que hay pequeñas variaciones en la entrada y salida de flujo de agua, lo que podría deberse a fluctuaciones en la presión del caudal. El sistema empieza a llenarse en torno a un valor de 3.2 segundos, pero con un patrón oscilatorio que en el desequilibrio del flujo del sistema hidráulico. El modelo también considera un desbordamiento de agua la cual alcanza un valor máximo de estababilización a los 3.2 *seg* en el caudal, sin embargo, se pierde una vez que el flujo se desborda y vuelve a estabilizarse a los 0.5 *seg* lo cuál nos indica que después de estar el tanque en equilibrio irá subiendo el flujo cada 0.5 segundos ya que la entrada es la salida de flujo de agua de  $q_{i_{1_a}}$  como se muestra en la Fig. 4.3c y 4.3d.



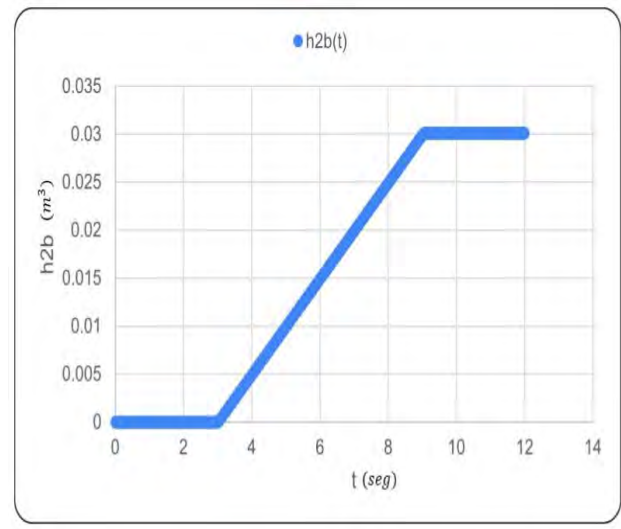
(a) Gráfica de llenado del tanque 1a



(b) Gráfica de llenado del tanque 2a



(c) Gráfica de llenado del tanque 1b



(d) Gráfica de llenado del tanque 2b

Figura 4.3: Gráficas de llenado del tanque 1a, 1b, 2a y 2b

La gráfica en la Fig. 4.4 muestra dos representaciones del flujo de entrada  $q_i$  y el flujo de salida  $q_o(t)$  en función del tiempo.

- **Flujo de entrada  $q_i$  (línea azul):** mantiene constante el flujo en una aproximación de 0.002seg durante todo el tiempo. Esto indica que el suministro de líquido del tanque es estable.
- **Flujo de salida  $q_o(t)$  (línea roja):** inicialmente es cero y en un punto específico (alrededor de  $t = 301$ ) aumenta rápidamente hasta alcanzar el mismo nivel de  $q_i$ . Esto sugiere que el tanque se llena hasta un punto en el que empieza a descargar el líquido con la misma tasa de entrada, alcanzando un estado constante.

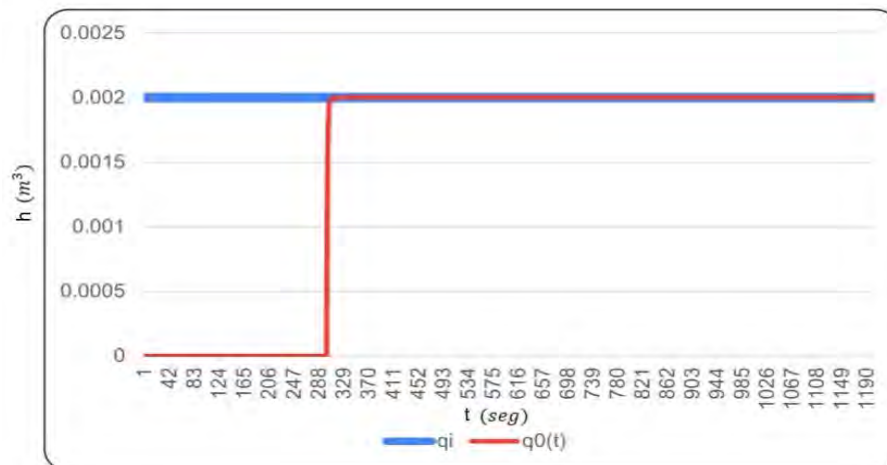


Figura 4.4: Gráfica del flujo de entrada y salida de agua.

## 4.2. Construcción y adecuaciones del prototipo

En esta sección se presenta la implementación del diseño del sistema hidropónico con la técnica de película nutritiva o común mente conocido por sus siglas en inglés NFT (Nutrient Film Technique) y con sustrato. También se describe el diseño de un actuador encargado del flujo de nutrientes y otros factores del sistema. Se realizó un solo prototipo con 3 diferentes modificaciones el cual fueron nombrados por modificación 1, modificación 2 y modificación 3.

### 4.2.1. Construcción del Prototipo

Se inició con un prototipo construido con material de PVC, en el cual el diseño véase en las Figuras 4.5 y 4.6 se fundamentó en la operatividad de los componentes, estableciendo así una prototipo sólido para un sistema hidropónico funcional.



Figura 4.5: Trasplante al sistema hidropónico

Sin embargo, el prototipo presentó limitaciones que afectaron su rendimiento y capacidad para cultivar plantas de manera eficiente. Estas restricciones incluyen:

- **Fluctuaciones de temperatura en la solución nutritiva:** La temperatura del ambiente influye



Figura 4.6: Plántulas en crecimiento

directamente en la temperatura de la solución nutritiva que circula en el sistema. Si la solución se calienta demasiado, puede reducir el oxígeno disuelto disponible para las raíces, afectando el crecimiento de las plantas. Idealmente, la solución nutritiva debe mantenerse entre 18°C y 25°C. Temperaturas superiores a 26°C pueden estresar las plantas y disminuir la absorción de nutrientes.

- **Aumento de la evaporación:** En un sistema NFT, donde la película de agua que nutre a las plantas es delgada, el exceso de sol puede acelerar la evaporación de la solución nutritiva. Esto no solo desbalancea los nutrientes, sino que también obliga al sistema a ser reabastecido con más frecuencia para mantener los niveles de agua adecuados.
- **Estrés térmico en las plantas:** Las altas temperaturas ambientales pueden generar estrés en las plantas, lo que alenta su crecimiento e incluso puede causar marchitamiento. Las raíces en un sistema hidropónico están expuestas directamente al agua, lo que las hace más sensibles a estos cambios de temperatura.
- **Crecimiento de algas:** La luz solar directa favorece el crecimiento de algas en los canales del sistema NFT. Las algas pueden obstruir los conductos de agua y competir con las plantas por nutrientes, afectando la mejora del sistema y su capacidad para sostener el cultivo.

Una de las limitaciones que fueron presentes fue el exceso de flujo, el cual su caudal era el siguiente:

$$0.3030 \frac{l}{seg} \left( \frac{1m^3}{1000l} \right) = 0.000303 \frac{m^3}{seg}$$

$$= 3.03 \times 10^{-4} \frac{m^3}{seg}$$

Mediante el transcurso de los días se observaron algunas limitaciones encontradas en este prototipo hidropónico, por lo que se decidió realizar modificaciones para resolver estas problemáticas.

#### 4.2.2. Modificación 1 del Prototipo

Para el rediseño 1 del Prototipo véase en las Figs. 4.7 y 4.8, se llevó a cabo un rediseño considerando las restricciones del prototipo inicial. En este proceso, se encontraron algunas limitaciones de crecimiento de la plántulas por el exceso de temperatura, por lo cual se optó por colocar una malla sombra. Otra limitación fue el exceso de flujo de agua lo cual se optó por reutilizar la bomba que ya se tenía y se le colocó una llave para ocuparla como desfogue del flujo de agua que ingresa al sistema hidropónico.



Figura 4.7: Sistema con la malla sombra



Figura 4.8: Llave de desfogue de agua

Sin embargo, la primera modificación del prototipo siguió presentando limitaciones de rendimiento y capacidad para cultivar de manera eficiente. Estas restricciones incluyen:

- **Exceso de flujo de agua:** El sistema presentaba un flujo de agua excesivo, lo que provocaba la sobresaturación de las raíces de las plantas, afectando su capacidad de absorción de oxígeno y causando problemas de crecimiento.
- **Fugas de agua y nutrientes:** El prototipo presentaba filtraciones que comprometían el mejoramiento en la distribución de nutrientes y agua, afectando el crecimiento de las plantas.

Por lo cuál se optó por hacer una segunda modificación para resolver las problemáticas encontradas en esta primera modificación.

### 4.2.3. Modificación 2 del Prototipo

El rediseño de la segunda modificación ha sido pensado en las condiciones ideales para el cultivo hidropónico véase en la Fig. 4.9, utilizando una bomba de menos caudalidad, asegurando el flujo de calidad de las plantas.

## Instalación del panel solar

Se realizó la instalación de un panel solar, con su respectivo controlador, bomba y caja de alimentación externa. El panel fue instalado en la ciudad de Cuernavaca, Morelos. Con una orientación hacia el sur y una inclinación de 18°.



Figura 4.9: Diagrama físico de la instalación del panel solar

## Características

- **Tipo de artículo:** Bomba de agua solar
- **Material:** ABS
- **Tamaño del panel solar:** aprox. 28,5 x 28 cm/11,2 x 11 pulgadas
- **Potencia del panel solar:** 50 W (sin función de almacenamiento de energía)
- **Caja de batería:** 3 baterías 18650
- **Controlador:** QC3.0 MPPT
- **Parámetro de la bomba de agua:**
  - **Voltaje:** DC12V
  - **Potencia:** 22W
  - **Caudal:** 720  $\frac{L}{h}$
  - **Elevación:** 5m
  - **Ruido:**  $\leq 35dB$

En las Figuras 4.10, 4.11 y 4.12 se muestra la instalación del panel solar, junto con sus respectivos componentes.





Figura 4.10: Panel solar



Figura 4.11: Bomba solar



Figura 4.12: Controlador y batería

Aunque el sistema estaba funcionando, se tuvo una pequeña limitación, lo cuál fue el estado del clima, ya que la radiación solar era mínima y no lograba mantener encendida mucho tiempo la bomba, por lo que su almacenamiento de energía también era mínimo. Por lo que se optó por colocar un nuevo panel solar y regresar a la bomba que se tenía en el primer prototipo.

#### 4.2.4. Modificación 3 del Prototipo

El rediseño de la tercera modificación ha sido satisfactoria ya que se penso en las condiciones ideales para el cultivo hidropónico véase en Fig. 4.13, utilizando una bomba de menos caudalidad, asegurando el flujo

de calidad de las plantas.

### Instalación del panel solar

Se realizó la instalación de una bomba solar, con su respectivo controlador y caja de alimentación externa. El panel fue instalado en la ciudad de Cuernavaca, Moreles. Con una orientación hacia el sur y una inclinación de 20°.

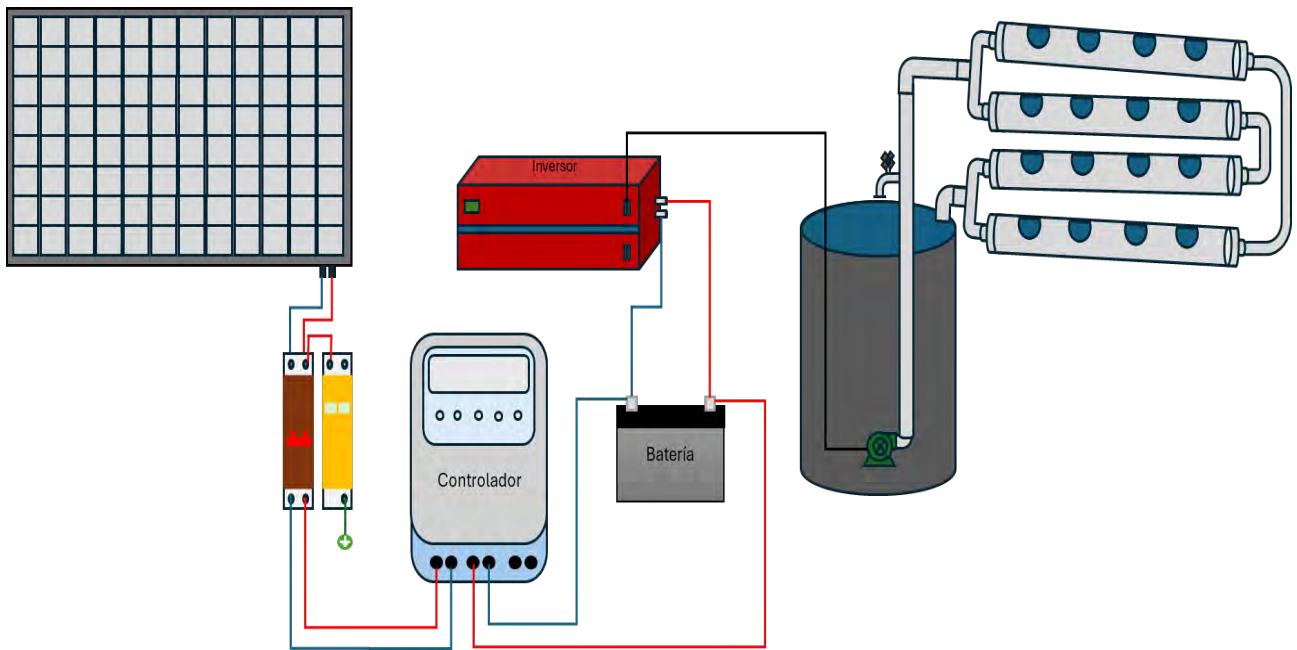


Figura 4.13: Diagrama de la instalación del panel solar

En la Fig. 4.14 se muestra la segunda instalación del panel solar.



Figura 4.14: Instalación del segundo panel solar.

En la Fig. 4.15 se muestra la instalación del controlador de energía que va conectado directamente al panel solar, también se puede observar instalada la batería y el inversor de corriente DC a AC.



Figura 4.15: Controlador, batería e inversor de corriente.

En la Fig. 4.16 se muestra el panel solar en funcionamiento, donde se puede observar que la bomba esta funcionando correctamente.



Figura 4.16: Funcionamiento del sistema con el panel solar

Se realizó la instalación completa del panel solar, favorablemente se encuentra funcionamiento con sus respectivos componentes que lo conforman.

En la Tabla 4.2 se muestran las características específicas de los componentes que conforma la instalación de panel solar.

Tabla 4.2: Funcionamiento de los componentes

Pieza	Nombre	Función
	Controlador de carga solar EPEVER MPPT 30A 12V 24V Auto Max PV 100V	Se utiliza como controlador de carga solar que regula la energía proveniente de los paneles solares antes de enviarla a las baterías y a la carga (consumo).
	Supresor de picos para Corriente Alterna 127/220vca Solar	Se utiliza para proteger los equipos eléctricos y electrónicos conectados al sistema contra sobretensiones o picos de voltaje. Estos picos pueden ser causados por descargas atmosféricas (rayos), fallas en la red eléctrica o incluso conmutaciones dentro del sistema fotovoltaico.
	Interruptor Termomagnético Dc Solar Fotovoltaico 600v	Se utiliza para proteger el sistema eléctrico de sobrecargas y cortocircuitos en el lado de corriente continua (DC). Evita daños en los cables y equipos al cortar el suministro si la corriente supera el límite seguro.
	Inversor de onda isinusoidal pura 12v/110v 6000w	Se utiliza para convertir la corriente continua (DC) generada por los paneles solares en corriente alterna (AC), que es la forma de energía que utilizan la mayoría de los electrodomésticos y dispositivos eléctricos en el hogar o negocio.
	Batería Recargable Genesis Np18-12 12v 17ah	Comúnmente utilizada en sistemas de energía solar, especialmente en aplicaciones como UPS (fuentes de alimentación ininterrumpida), sistemas de alarmas, o pequeños sistemas fotovoltaicos. En una instalación de panel solar,

Hasta el momento, la modificación 3 del prototipo no presenta restricciones que impacten el funcionamiento del sistema hidropónico. Se han obtenido favorables resultados gracias a la implementación de las energías renovables.

#### 4.2.4.1. Demanda Energética de consumo del prototipo

Tabla 4.3: Demanda energética

Elemento	Voltaje	Potencia (W)	Caudal / Función
Monitor Guardian de Bluelab	100-240 A AC → 5CDC	5 W	Monitoreo de pH, EC y Temperatura
Bomba de agua	110-120 A AC	60 W	3500 L/h
Analizador digital de agua 6 en 1	110-120 V AC -230 V AC	10 W	Medición de pH, EC, TDS, Temperatura, Salinidad y Gravedad específica

#### Cálculo de la Demanda Energética Total

La demanda energética total es la suma de la potencia de todos los dispositivos conectados:

$$P_{total} = P_1 + P_2 + P_3 + P_n \quad (4.9)$$

donde:

$P_2 = 60W$  (Bomba de Agua)

$P_1 = 5W$  (Monitor Guardian de Bluelab)

$P_3 = 10W$  (Analizador de Agua 6 en 1)

$$P_{total} = 5W + 60W + 10W = 75W \quad (4.10)$$

La energía demandada por hora:

$$E_{demanda} = P_{total} \times t \quad (4.11)$$

Si los dispositivos operan 1 hora:

$$E_{demanda} = 75W \times 1h = 75Wh \quad (4.12)$$

#### Energía Producción del Panel Solar

El panel EPL33024 tiene una potencia máxima de 330 W bajo condiciones estándar. La energía generada en 1 hora bajo condiciones ideales es:

$$E_{panel} = P_{panel} \times t \quad (4.13)$$

$$E_{panel} = 330W \times 1h = 330Wh \quad (4.14)$$

Sin embargo, en condiciones reales (NOCT), el panel genera 244.13 W:

$$E_{panel_{real}} = 244.13W \times 1h = 244.13Wh \quad (4.15)$$

#### Energía Desperdiciada

La energía desperdiciada es la diferencia entre la energía producida y la energía consumida:

$$E_{desperdiciada} = E_{panel_{real}} - E_{demanda} \quad (4.16)$$

$$E_{desperdiciada} = 244.13Wh - 75Wh = 169.13Wh \quad (4.17)$$

Esto nos indica que si hay pérdidas en el sistema.

### Capacidad de la batería en Wh

Sabemos que la batería es de 12V, 17.2Ah, lo que en energía es:

$$E_{batería} = V \times Ah \quad (4.18)$$

$$E_{batería} = 12V \times 17.2Ah = 206.4Wh \quad (4.19)$$

### Tiempo de descarga teórico

El tiempo que la batería puede alimentar los dispositivos suponiendo eficiencia del 100 % es:

$$t_{autonomía_{teórico}} = \frac{E_{batería}}{P_{total}} \quad (4.20)$$

$$t_{autonomía_{teórico}} = \frac{206.4Wh}{75W} \approx 2.75horas \quad (4.21)$$

Pero en la práctica solo dura 1.5 horas (1 hora y media aproximadamente). Esto sugiere que hay pérdidas en el sistema.

### Eficiencia de la batería

Para determinar la eficiencia real de la batería, usamos:

$$\eta_{bateria} = \frac{P_{total} \times t_{real}}{E_{batería}} \quad (4.22)$$

Sustituyendo los valores:

$$\eta_{bateria} = \frac{75W \times 1.5h}{206.4Wh} \quad (4.23)$$

$$\eta_{bateria} = \frac{112.5Wh}{206.4Wh} = 0.545 = 54.5\% \quad (4.24)$$

### ¿Por qué la batería solo dura 1.5 horas?

La batería no entrega el 100 % de su energía útil debido a:

1. **Pérdidas en la conversión:** La batería es de 12V, pero los dispositivos funcionan con diferentes voltajes. El inversor y reguladores consumen parte de la energía.
2. **Eficiencia del inversor:** Los inversores típicos tienen una eficiencia del 80-90 %, lo que reduce la energía disponible.
3. **Protección de la batería:** Muchas baterías no se descargan completamente para evitar daños. Probablemente, el sistema corta la energía cuando la batería baja a un cierto nivel.
4. **Autodescarga y temperatura:** Factores ambientales como temperatura y edad de la batería pueden reducir su rendimiento.

### 4.3. Instrumentación del prototipo

#### 4.3.1. Análisis comparativo de los sensores disponibles

Se realizó un análisis comparativo de los sensores de pH, temperatura y conductividad eléctrica, con el objetivo de evaluar y seleccionar el sensor adecuado para el sistema hidropónico, veáse en la Tabla 4.4

Tabla 4.4: Comparación de sensores

Sensor	Nombre / Marca	Tipo	Características
pH	Bluelab pH Pen	Medidor de pH portátil	Portátil, resistente al agua, calibración automática, pantalla LCD
	Hanna Instruments HI98103 Checker	Medidor de pH de bolsillo	Compacto, fácil de usar, calibración sencilla, pantalla LCD
	Apera Instruments AI209 Pocket pH Tester	Medidor de pH de bolsillo	Electrodo reemplazable, calibración automática, pantalla LCD
	Milwaukee Instruments MW102 pH and Temperature Meter	Medidor de pH con medición de temperatura	Pantalla dual, sonda reemplazable, calibración manual
	Atlas Scientific pH Kit	Kit completo de medición de pH	Incluye electrodo, módulo y accesorios, alta precisión
	Bluelab Guardian Monitor	Medidor portátil multiparamétrico de pH, conductividad y temperatura	Lecturas continuas, alarma ajustable
Temperatura	DS18B20	Sensor de temperatura digital DS18B20	Ideal para sistemas de control de temperatura en entornos industriales. Lectura digital y precisión. Fácil interfaz Wire para conexión a microcontroladores
	Termopares	Termopar tipo K (Omega)	Amplio rango de temperatura, perfecto para aplicaciones en la industria metalúrgica. Robusto y resistente a entornos hostiles.
	Termistor NTC	Termistor NTC 10K	Sensibilidad a cambios rápidos, adecuado para respuestas rápidas en sistemas de climatización.
	Sensor infrarrojo (IR)	Sensor de temperatura infrarrojo MLX9061	Medición sin contacto, ideal para objetos inaccesibles. Precisión en la medición de objetos en aplicaciones industriales y de control de calidad.

	DHT22	Sensor de temperatura y humedad DHT22	Medición combinada de temperatura y humedad. Fácil interfaz digital para conectar a microcontroladores
	SHT31	Sensor de temperatura y humedad SHT31	Alta precisión en la medición de temperatura y humedad. Robustez y durabilidad, adecuado para entornos exigentes
Conductividad eléctrica	Bluelab Combo Meter	Medidor portátil multiparamétrico de pH, conductividad y temperatura	Es portátil, mide pH, conductividad eléctrica (EC), y temperatura. Es fácil de usar y adecuado para sistemas hidropónicos
	Hanna Instruments HI98331 Soil Test Direct Soil EC Tester	Medidor portátil de conductividad para suelos	Este medidor está diseñado específicamente para medir la conductividad eléctrica en sustratos de cultivo, como los utilizados en sistemas hidropónicos
	Atlas Scientific EZO-EC Embedded Conductivity Sensor	Sensor embebido de conductividad eléctrica	Un sensor compacto y preciso diseñado para integrarse en sistemas automatizados. Es compatible con microcontroladores como Arduino y Raspberry Pi
	Milwaukee Instruments MW802 Smart pH/EC/TDS Combination Meter	Medidor portátil multiparamétrico	Combina la medición de pH, conductividad eléctrica (EC), y sólidos totales disueltos (TDS) en un solo dispositivo compacto.
	Gravity: Analog EC Sensor/Meter Kit for Arduino	Sensor analógico de conductividad para microcontroladores	Un kit que incluye un sensor de conductividad eléctrica compatible con Arduino. Puede ser una opción DIY para proyectos personalizados
	Eutech Instruments CON 700 Conductivity	Medidor de conductividad de mesa	Un medidor de mesa que ofrece mediciones precisas de la conductividad eléctrica y es adecuado para aplicaciones avanzadas en sistemas hidropónicos.

Teniendo el análisis comparativo se seleccionaron 3 sensores los cuales se compararon para determinar que sensor es adecuado de acuerdo a sus características, su precio, su precisión, su resolución, su tiempo de respuesta y su sensibilidad de distintos sensores.

En conclusión, tras realizar un análisis comparativo de los sensores disponibles en el mercado para la medición de pH, temperatura y conductividad eléctrica (EC), se determinó que el Bluelab Guardian Monitor es la opción más adecuada para la implementación en sistemas hidropónicos. La elección de este sensor



se basa en una combinación de factores clave, como la precisión, la facilidad de uso, la integración de múltiples parámetros y la capacidad de monitoreo continuo.

En la Tabla 4.5 se realizó una nueva comparativa de otras 3 alternativas de sensores todo en 1, y dentro de los sensores todo en uno se tienen 3 opciones que se muestran a continuación para el sistema hidropónico.

Tabla 4.5: Comparativa de características de los sensores

Características	Medidor continuo GroLine	Bluelab Guardian Monitor	Sensor pH-W3988
Parámetros Medidos	pH, CE (Conductividad Eléctrica), Temperatura	pH, CE (Conductividad Eléctrica), Temperatura	pH, CE (Conductividad Eléctrica), Temperatura, Total de Sólidos Disueltos, Salinidad y Gravedad específica
Tipo de Medición	Monitoreo continuo en tiempo real	Monitoreo continuo en tiempo real	Monitoreo puntual en tiempo real
Rango de pH	0 a 14 pH	0 a 14 pH	0 a 14 pH
Rango de CE	0 a 5.0 mS/cm (500 a 700 ppm)	0 a 5.0 mS/cm	0 a 5.0 mS/cm ó 0-19000us/cm, 0-199.0mS/cm
Temperatura Soportada	0 a 50°C	0 a 50°C	0 a 50°C
Calibración	Automática, con solución de calibración	Manual con soluciones de calibración	Automática, con manual de solución buffer
Fuente de Alimentación	Adaptador de corriente	Adaptador de corriente	Adaptador de corriente
Tipo de Instalación	Fijo, para sistemas de riego o tanques	Fijo, para sistemas de riego o tanques	Portátil, para mediciones puntuales para sistemas de riego o tanques
Uso Principal	Hidroponía, acuicultura, agricultura	Hidroponía, invernaderos, cultivos hidropónicos	Hidroponía, invernaderos, cultivos hidropónicos, laboratorios, acuarios y piscinas

En conclusión, a realizar esta comparativa de estos sensores todo en uno, el sensor pH-W3988 se destaca frente a los otros dos sensores preseleccionados debido a su mayor versatilidad y capacidad de medición. A diferencia de los sensores GroLine Bluelab Guardian Monitor, que solo miden pH, conductividad eléctrica (CE) y temperatura, el sensor pH-W3988 también es capaz de medir el total de sólidos disueltos (TDS), salinidad y gravedad específica. Esta ventaja permite obtener una caracterización más completa del agua en el sistema hidropónico, facilitando un monitoreo más preciso y una mejor toma de decisiones en el manejo de los nutrientes.

### 4.3.2. Análisis del sensor seleccionado (pH-W3988) para el sistema hidropónico

El sensor pH-W3988 seleccionado para el monitoreo y supervisión de las que se encuentra en el sistema hidropónico, véase en la Fig. 4.17

- Este sensor es 6 en 1, lo cual mide pH, Conductividad eléctrica (CE), Temperatura, Total de Sólidos

Disueltos (TDS), Salinidad y Gravedad específica (S.G).

- Su conectividad es vía Wi-Fi.
- Este sensor nos ofrece mediciones de pH de alta precisión, lo cual es fundamental en sistemas hidropónicos, manteniendo una lecturas estable durante período de medición, sin necesidad de recalibraciones frecuentes.
- Diseñado para trabajar en soluciones acuosas, lo que lo hace ideal para hidroponía. Puede integrarse fácilmente con controladores de automatización y sistemas IoT para monitoreo remoto.
- Su construcción está diseñada para resistir ambientes húmedos y condiciones extremas que pueden dañar sensores convencionales.
- Su material es resistente a la corrosión, yes esencial cuando se trabaja con soluciones nutritivas.
- Algunos modelos de sensores convencionales requieren calibraciones frecuentes o reemplazos de electrodos en períodos cortos. Por lo que el pH-W3988 puede ofrecer un mantenimiento más sencillo y un tiempo de vida útil más largo.
- Aunque puede tener un costo inicial más alto que sensores convencionales, su precisión, estabilidad y durabilidad pueden reducir costos a largo plazo por menor mantenimiento y recalibración.
- Cuenta con su manual e instructivo de calibración.
- Es compatible con aplicaciones lo que facilita el almacenamiento de datos obtenidos durante el monitoreo remoto, guardandolos en la nube.
- Permite configurar alertas cuando el pH sale de los rangos



Figura 4.17: Sensor seleccionado

### 4.3.3. Instrumentación del prototipo

En esta subsección se abarca la instrumentación que utiliza actualmente el sistema hidropónico, para llevar a cabo el proceso de monitoreo y supervisión de las variables del sistema hidropónico las cuáles son el pH, la Conductividad Eléctrica (CE), la temperatura en la solución nutritiva y en el ambiente, la humedad relativa, el Total de Sólidos Disueltos (TDS), la Salinidad y la Gravedad Específica (S.G.),

siendo variables críticas del proceso hidropónico, veáse en la Fig4.18.

El sensor pH-W3988 seleccionado tiene como características las siguientes especificaciones.

1. **PH:** 0.00-14.00pH
2. **Temperatura:** 0°C -50°C (32°F-1220°F)
3. **CE:** 0-19000us/cm, 0-199.0ms/cm
4. **TDS:** 0-19990ppm, 0-199.0ppt
5. **SAL:** 0-199.9ppt, 0 % -20 %
6. **S.G:** 0.990-1.400



Figura 4.18: Sistema instrumentado

#### 4.3.3.1. Calibración del sensor pH-W3988

Se realizó la calibración del sensor de pH, Temperatura, TDS, CE, Salinidad y S.G, ver las Figuras 4.19a, 4.19b, 4.19c y 4.19d.

Para calibrar el sensor de pH PH-W3988, es necesario seguir estos pasos:

- Primero, se debe preparar el sensor retirando la tapa de protección del electrodo, enjuagándolo con agua destilada y secándolo suavemente con papel absorbente. Se sumerge el electrodo en la solución de pH 4.0 (si se mide en rangos ácidos) o de pH 10.0 (si se mide en rangos alcalinos). De nuevo, se sumerge el electrodo en la solución, se esperan unos minutos para que se estabilice y se ajusta el valor en el dispositivo de medición hasta que marque el pH correspondiente (4.0 o 10.0). Luego, se enjuaga y se seca el electrodo.
- En el siguiente paso se realiza la calibración de la solución de pH 6.86, se sumerge el electrodo en una solución y se esperan unos minutos hasta que el sensor se estabilice, evitando moverlo para obtener una lectura precisa. Se ajusta el valor en el dispositivo de medición hasta que marque exactamente 6.86. Luego, se enjuaga y se seca el electrodo.



Figura 4.19: Calibración del sensor pH-W3988.

- El último paso es realizar la calibración de la solución de pH 9.18, se sumerge el electrodo en la solución y se esperan unos minutos para que se estabilice y se ajuste el valor en el dispositivo de medición hasta que marque el pH correspondiente 9.18. Una vez hecho esto, se enjuaga el electrodo con agua destilada y se secas.

Finalmente, para comprobar que el sensor ha sido calibrado correctamente, se sumerge nuevamente en una de las soluciones de pH para verificar que las lecturas sean correctas.

#### 4.3.4. Gráficas de los datos obtenidos

Se realizó el monitoreo de los datos de las variables de proceso del sistema hidropónico, las cuales son 7 variables las cuales sus mediciones fueron representadas en gráficas.

La Fig. 4.20 muestra las mediciones del pH de la solución nutritiva del sistema hidropónico, el cual tiene un comportamiento exponencialmente decreciente, pues físicamente representa la cantidad de acidez o alcalinidad de la solución nutritiva.

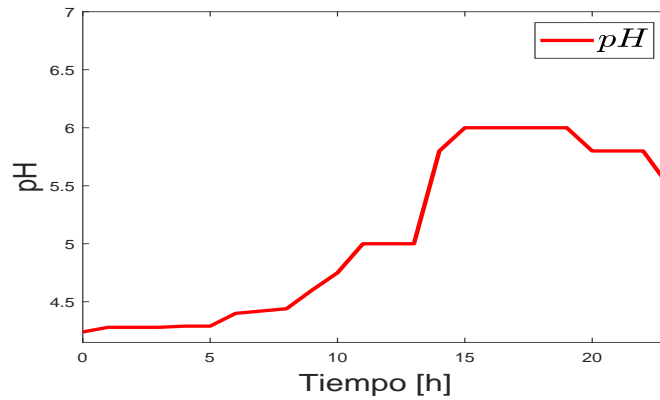


Figura 4.20: Medición de datos obtenidos de pH

Como se puede observar en los valores de la gráfica mostrada en la Fig. 4.20 al comienzo empieza en 2ph, lo que sucedió es que se colocó mucho ácido fosfórico, este es un compuesto que sirve para bajar los niveles de pH, por lo que las primeras horas se obtuvo un nivel bajo de pH hasta que se condiguio bicarbonato de sodio que sirve como base para aumenta el pH. Gracias a que se actuó a tiempo, las plantas no presentaron daños de marchitación.

La Fig. 4.21 muestra las mediciones de temperatura de la solución nutritiva y la temperatura ambiental. La temperatura del agua debe de estar entre 18°C y 25°C, lo cual es ideal para la mayoría de las plantas, permitiendo una absorción útil de nutrientes y promoviendo un crecimiento saludable, y la temperatura ambiental en el día debe estar en los rangos de 20°C a 25°C y en la noche de 15°C a 20°C, por ello, al principio la gráfica tiene un comportamiento decreciente pero después de cierto tiempo crece debido a la evapotranspiración de las plantas.

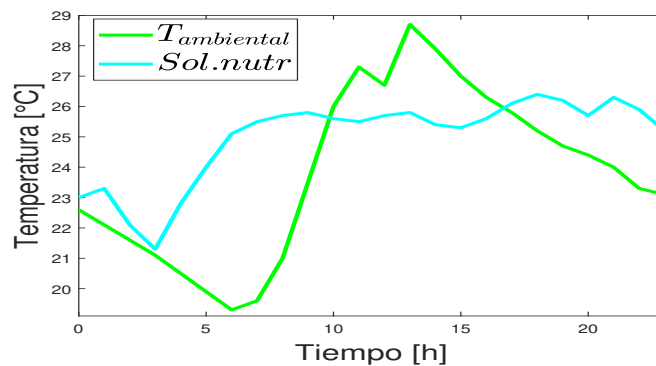


Figura 4.21: Medición de datos obtenidos de Temperatura en la solución nutritiva y ambiental

La Fig. 4.22 muestra las mediciones de las partes por millón (ppm) de la Conductividad Eléctrica (CE), Total de Sólidos Disueltos (TDS) y Salinidad de la solución nutritiva del sistema hidropónico, es por ello que la gráfica muestra un comportamiento creciente hasta llegar un punto donde se estabiliza, refiriéndose a las sales que tiene el agua.

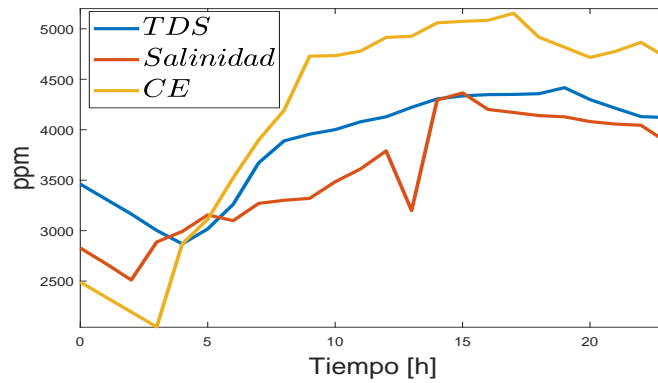


Figura 4.22: Medición de datos obtenidos de la conductividad eléctrica, el total de solidos disueltos y salinidad

La Fig. 4.23 muestra las mediciones del porcentaje de humedad relativa del lugar donde se encuentra el sistema hidropónico. Es por ello que la gráfica muestra un comportamiento decreciente y creciente refiriéndose a que está directamente relacionada con la temperatura. A mayor temperatura, el aire puede contener más vapor de agua, lo que afecta la humedad relativa.

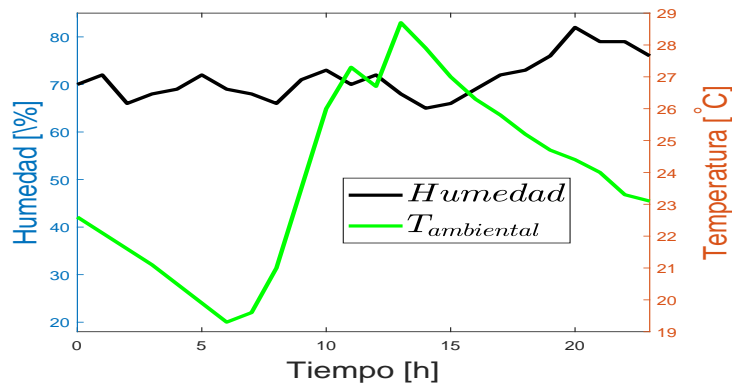


Figura 4.23: Medición de datos obtenidos de humedad relativa

#### 4.4. Implementación funcional: Cosecha de Chiles habaneros

Durante 12 semanas se realizó la producción de chiles habaneros, se obtuvieron resultados de chiles cosechados gracias al monitoreo y supervisión semanal del ciclo de producción, lo cuál se obtuvieron buenos resultados. En la Fig. 4.24 se puede observar una gráfica de las unidades cosechadas semanalmente mediante este ciclo de cosecha de chiles habaneros. Sin embargo en la semana 13 se lograron obtener los ultimos chiles habaneros.

En la gráfica anterior se observa un aumento progresivo en la cosecha de chiles habaneros, con algunos altibajos. En las primeras semanas de (agosto-septiembre), la cantidad de chiles cosechados se mantiene entre 4 y 6 unidades por semana. Luego, en el mes de octubre, hay un incremento notable. Por lo que el 25 de octubre se alcanzó la mayor cosecha con 16 unidades, seguido del 18 de octubre con 12 unidades.

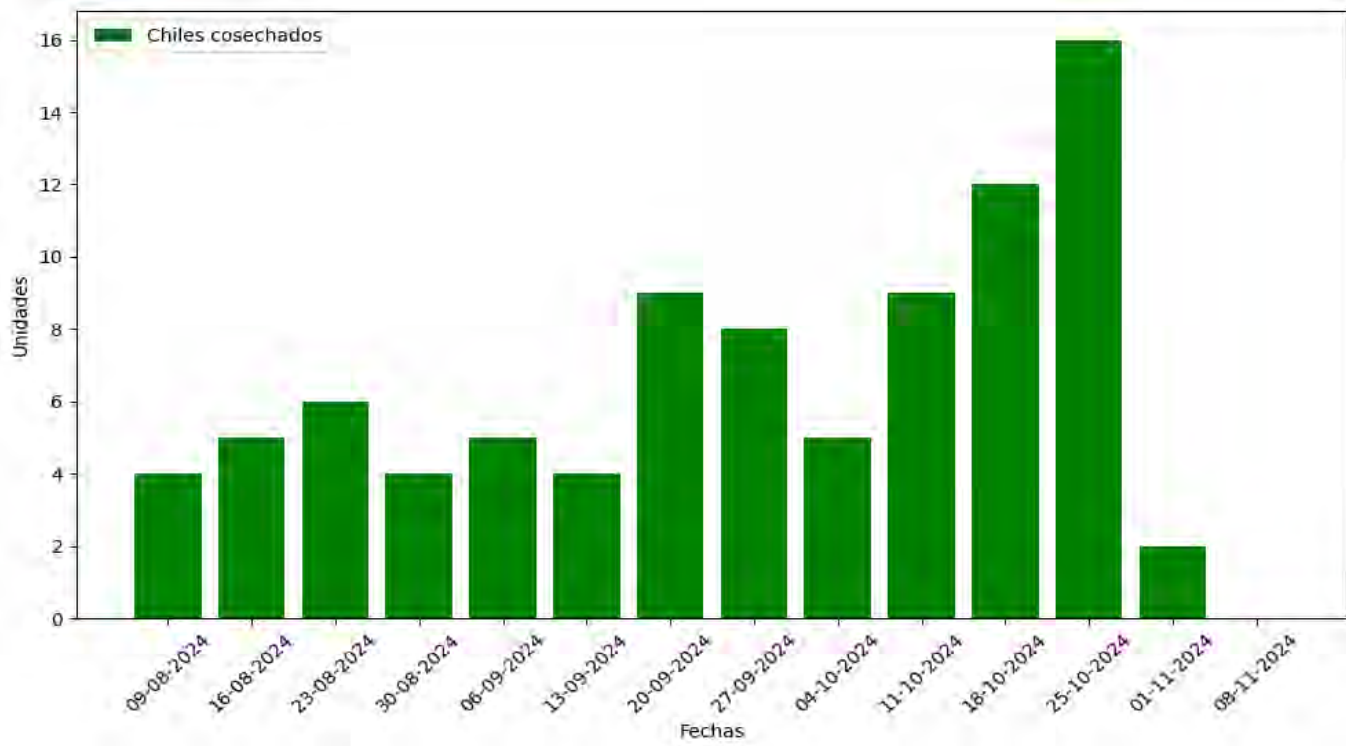


Figura 4.24: Producción de chiles habaneros cosechados semanalmente

Sin embargo, otro periodo de alta producción fue el 20 y 27 de septiembre, con 9 y 8 unidades respectivamente.

El incremento en octubre fue favorable debido a las condiciones climáticas que fueron de una máxima de  $25.5^{\circ}\text{C}$ , y una mínima de  $17.5^{\circ}\text{C}$ , con una media de  $21.5^{\circ}\text{C}$ , lo que favoreció a la producción mayor de los chiles habaneros debido a que su temperatura ideal para su producción es de  $25^{\circ}\text{C}$  a  $18^{\circ}\text{C}$ . Gracias a que la temperatura favoreció en la producción, se logró tener una mayor maduración de frutos al mismo tiempo.

La baja recolección del 1 de noviembre fue de 2 unidades, lo que representa una caída drástica de producción después de haber tenido una semana anterior una cosecha alta, por lo que este descenso se debe a que las plantas ya estaban en el final de su ciclo productivo.

En conclusión las condiciones y variables fueron favorables por lo que la cosecha mostró una tendencia creciente hasta finales de octubre cuando alcanzó su punto máximo, sin embargo a la semana siguiente tuvo una drástica reducción debido a que el ciclo de producción de los chiles habaneros es de 12 semanas, por lo que las últimas 2 semanas fue el final del ciclo de producción.

#### 4.4.1. Experimentación

En esta subsección se muestra el proceso de experimentación de la producción de Chiles habaneros en el sistema hidropónico NFT utilizando sustrato, así como las etapas del cultivo y detalles fotográficos del proceso de producción.



Figura 4.25: Sistema hidropónico en funcionamiento

#### 4.4.1.1. Imágenes del proceso de la experimentación

Se puede observar en las siguientes imágenes el proceso por el cual ha ido transcurrido la producción y cosecha del cultivo de chiles habaneros en hidroponía.



(a) Floración



(b) Primeros brotes del fruto



(c) Evolución de crecimiento

Figura 4.26: Etapa de floración y crecimiento (junio-julio)



(a) Fruto empezando madurez



(b) Frutos en crecimiento



(c) Madurez de los frutos

Figura 4.27: Etapa de madurez del cultivo y cosecha (julio-agosto)

Son algunas de la evidencia fotografica con la que se cuenta registrado el proceso del funcionamiento del sistema hidropónico, junto con el crecimiento y producción de chiles habaneros.





(a) Primera cosecha



(b) Segunda cosecha



(c) Peso de la cosecha

Figura 4.28: Etapa de producción continua (agosto-septiembre)

## Conclusión del capítulo

En conclusión, teóricamente la batería debería durar 2.75 horas. Sin embargo, solo dura 1.5 horas debido a pérdidas del sistema. La eficiencia de la batería es del 54.5 %, lo que significa que casi el 45.5 % de la energía se pierde en la conversión y regulación.

El inversor de onda sinusoidal tiene una potencia de salida continua de 2200 W y una potencia máxima (pico) de 6000 W. Su eficiencia de conversión es superior al 90 %.

Dado que la demanda total de los dispositivos es de 75 W, el inversor está operando muy por debajo de su capacidad máxima. Sin embargo, es importante considerar que los inversores suelen tener una eficiencia óptima cuando operan cerca del 50-75 % de su capacidad nominal. Operar a cargas muy bajas puede resultar en una eficiencia ligeramente menor, lo que podría contribuir a las pérdidas de energía observadas.

Además, los inversores consumen energía incluso sin carga, conocida como "corriente sin carga". Aunque no se especifica este valor para el inversor en cuestión, este consumo puede influir en la duración de la batería cuando el sistema no está generando energía solar.

Aunque existen áreas que podrían mejorarse, el sistema se encuentra en una fase funcional que permite obtener resultados consistentes en términos de crecimiento y desarrollo de las plantas, aportando evaluaciones valiosas para futuras mejoras.

# Capítulo 5

---

## Conclusiones

---

### 5.1. Conclusiones

El sistema hidropónico monitoreado mostró mejoras en el uso de recursos, particularmente en agua y nutrientes, reduciendo el desperdicio y mejoramiento del crecimiento de las plantas. Gracias a la implementación de sensores y controladores, se logró un monitoreo constante de variables como el pH, la temperatura y la humedad, lo que permitió un ambiente favorable para el crecimiento de los cultivos.

El análisis y las simulaciones realizadas demuestran que el modelo matemático desarrollado captura adecuadamente la dinámica del flujo de agua en los tanques del sistema hidropónico. Las oscilaciones observadas en los niveles de flujo reflejan los efectos de fluctuaciones en la presión y el equilibrio del sistema hidráulico, destacando la importancia de considerar estos factores para un diseño eficiente. Además, se identificaron patrones de desbordamiento y estabilización que ofrecen información valiosa para la regulación y control del nivel de agua.

El diseño del sistema permitió identificar las condiciones ideales para el cultivo de diversas hortalizas, seleccionando el tipo de sistema hidropónico NFT. Proporcionando una base sólida para la construcción y operación del prototipo. Desde los esquemas iniciales hasta los modelos tridimensionales, se ha priorizado la claridad y la funcionalidad en cada etapa del proceso. Además, las especificaciones de materiales detalladas garantizan una construcción eficiente y económica. Este diseño representa un paso fundamental para el desarrollo de sistemas hidropónicos más eficientes y adaptables a diversos espacios.

A lo largo de las tres modificaciones del prototipo, se logró desarrollar un sistema hidropónico funcional y eficiente, superando las limitaciones iniciales mediante ajustes en el diseño. La implementación de energías renovables demostró ser una solución estable y efectiva para el sistema hidropónico, permitiendo la incorporación de tecnologías para garantizar un suministro energético sustentable. Aunque el sistema aún presenta oportunidades de mejora, los resultados obtenidos ofrecen una base sólida para futuras investigaciones, consolidando el prototipo como una herramienta valiosa para la agricultura sostenible.

El análisis detallado de las mediciones obtenidas mediante la instrumentación seleccionada demuestra la capacidad del sistema para monitorear las variables críticas de manera precisa y confiable. Estos resultados resaltan la importancia de la instrumentación en la supervisión y mejora de los procesos agrícolas, permitiendo no solo un monitoreo favorable, sino también una base sólida para futuras aplicaciones en la agricultura hidropónica.

El desarrollo de la experimentación permitió evaluar la efectividad del sistema hidropónico NFT para la producción de chiles habaneros, logrando resultados exitosos en cuanto al crecimiento, calidad y cantidad de los frutos cosechados. La supervisión semanal y el control de variables fueron factores clave para el

buen desempeño del cultivo. Las evidencias fotográficas y gráficas obtenidas no solo respaldan el éxito del proceso, sino que también contribuyen al análisis y mejora de futuros proyectos de producción agrícola en sistemas hidropónicos.

La ventaja más importante en este prototipo fue la conservación de suelos, mediante la reducción de la erosión, favoreciendo a la sostenibilidad.

## 5.2. Actividades futuras

### 5.2.1. Análisis de un sistema hidropónico automatizado

Se llevó a cabo un estudio basado en un método de investigación en hidroponía, con el objetivo de determinar la viabilidad de automatizar el proceso y asegurar que los parámetros sean controlables para obtener un cultivo estandarizado. En este caso, se controlaran factores como la conductividad eléctrica, la temperatura, el nivel de nutrientes y el pH para comparar los resultados.

#### 1. Cultivo en un ambiente controlado

Siguiendo el método establecido, se utilizarán nutrientes específicos, se monitoreará la concentración de soluciones nutritivas y se automatizará el suministro de agua y nutrientes. Las condiciones ambientales, como la iluminación y la ventilación, serán controladas para proporcionar un entorno óptimo para el crecimiento de las plantas.

#### 2. Monitoreo y toma de Datos

Se realizarán las mediciones regulares de parámetros clave, como el nivel de nutrientes en la solución, la temperatura del agua y la humedad ambiental. Estos datos serán recopilados a lo largo del tiempo para analizar el comportamiento del sistema.

#### 3. Control de Variables Críticas

En este estudio, se dará especial atención al control de variables críticas, como el pH del agua. Se utilizará un sistema de monitoreo automático con ajuste en tiempo real para mantener el pH dentro de un rango específico y garantizar condiciones ideales para el crecimiento de las plantas.

#### 4. Resultados esperados del sistema hidropónico automatizado

Al final del experimento, se obtendrán los resultados que indicarán un crecimiento saludable de las hortalizas, con parámetros controlados dentro de los límites deseados. La automatización demostrará ser efectiva para mantener condiciones óptimas y optimizar el rendimiento del cultivo.

En resumen, este análisis destacará la posibilidad y beneficios de implementar sistemas hidropónicos automatizados, abriendo oportunidades en el mercado agrícola y sostenible.

---

# Referencias

---

- Adhau, S., Surwase, R., y Kowdiki, K. (2017). Design of fully automated low cost hydroponic system using labview and avr microcontroller. En *2017 iee international conference on intelligent techniques in control, optimization and signal processing (incos)* (pp. 1–4).
- Albuja, V., Andrade, J., Lucano, C., y Rodriguez, M. (2021). Comparativa de las ventajas de los sistemas hidropónicos como alternativas agrícolas en zonas urbanas. *Minerva*, 2(4), 45–54.
- Alejo-Santiago, G., Luna-Esquivel, G., Sánchez-Hernández, R., Salcedo-Pérez, E., García-Paredes, J. D., y Jiménez-Meza, V. M. (2015). Determination of the nitrogen requirement for habanero pepper (capsicum chinense jacq.). *Revista Chapingo. Serie horticultura*, 21(3), 215–227.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M., y cols. (2006). Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. *Roma: FAO*, 298(0).
- Altieri, M. A., y Nicholls, C. I. (2009). Cambio climático y agricultura campesina: impactos y respuestas adaptativas. *LEISA revista de agroecología*, 14, 5–8.
- Ani, A., y Gopalakrishnan, P. (2020). Automated hydroponic drip irrigation using big data. En *2020 second international conference on inventive research in computing applications (icirca)* (pp. 370–375).
- Armoa, M. M. S., Casuriaga, O. L. C., y Ocampo, F. D. V. (2018). Producción de lechuga (lactuca sativa), hidropónica y convencional, en el distrito de concepción, departamento de concepción. *El Surco*, 26.
- Asao, T. (2012). *Hydroponics: a standard methodology for plant biological researches*. BoD–Books on Demand.
- Barbado, J. L. (2005). Hidroponía. *Su empresa en cultivos en agua*. Editorial Albatros SACI. 1a (Ed.). Buenos Aires.
- Belhekar, P., Thakare, A., Budhe, P., Shinde, U., y Waghmode, V. (2018). Automated system for farming with hydroponic style. En *2018 fourth international conference on computing communication control and automation (iccubea)* (pp. 1–4).
- Bounnady, K., Theppasolath, S., Chanthaminavong, S., y Louangvilay, X. (2022). Automatic nutrient control system base on internet of things for hydroponics crops. *Souphanouvong University Journal Multidisciplinary Research and Development*, 8(2), 361–370.
- Brenes-Peralta, L., y Jiménez-Morales, M. F. (2014). Experiencia de producción de lechuga americana (lactuca sativa) hidropónica, tipo NFT. *Rev. Tecnol. Marcha*, 27, 56.
- Carlos-Andrés, M.-B. (2014). *Evaluacion de tres sustratos en la produccion de plantines de lechuga (lactuca sativa l.) y su comportamiento postrasplante* (Tesis de Master no publicada). Universidad de Chile.

- Carmona Bayonas, J. (2022). Mejora en la producción y calidad de lechuga mediante la optimización de las condiciones de cultivo en sistemas hidropónicos bajo invernadero. *Proyecto de investigación: Nuevos sistemas de cultivo para la producción de hortalizas de hoja*.
- Carrera, L. A. I., Santana, E. M., Ramírez, J. A. R., Sánchez, R. A. M., y Alemán, E. M. L. (2022). Influencia de la gestión energética y utilización de fuentes renovables de energía. *Energías Renovables*, 9(48).
- Castañares, J. L. (2020). *El abc de la hidroponía* (Inf. Téc.). EEA AMBA.
- Castañares, J. L. (2022). Tipburn en hortalizas de hoja en hidroponia: posibles causas y control. *RIA. Revista de investigaciones agropecuarias*, 48(1), 3–9.
- Castillo, S.-D., Moreno-Pérez, E. d. C., Pineda-Pineda, J., Osuna, J. M., Rodríguez-Pérez, J. E., Osuna-Encino, T., y cols. (2014). Producción hidropónica de jitomate (*solanum lycopersicum* l.) con y sin recirculación de la solución nutritiva. *Agrociencia*, 48(2), 185–197.
- Castillo-Aguilar, C. d. l. C. (2015). Producción de planta de chile habanero (*capsicum chinense* jacq.). *Agro Productividad*, 8(4).
- Castorena, M. V., Valencia, E. A. C., Inzunza, M. A., Ibarra, A. R. L., Rodríguez, H. M., y Rodarte, D. C. (s.f.). Producción hidropónica de chile habanero en invernadero.
- Cervantes, A. A. H., Silva, G. G., y Marín, F. A. M. (2023). Aplicación de la mecánica de fluidos en el diseño de un sistema hidropónico. *Revista Educación en Ingeniería*, 18(36).
- Costa, P. C., Didone, E. B., Sesso, T. M., Cañizares, K. A. L., y Goto, R. (2001). Condutividade elétrica da solução nutritiva e produção de alface em hidroponia. *Scientia Agricola*, 58, 595–597.
- Cotos Morales, R. C. (2019). Mecánica de fluidos.
- Dávila Vera, A. S., y Santos Lazo, G. W. (2014). Diseño, construcción e instalación de un módulo aeropónico para el cultivo de plántulas de papa (*solanum tuberosum* l.) en las instalaciones del fundo “la banda” huasacache, jacobina hunter, arequipa.
- Domínguez, M. O., Avilés, A. C., Robles, Á. J. M., Silva, J. Z., y cols. (2025). Potencia hidráulica. *Ingenio y Conciencia Boletín Científico de la Escuela Superior Ciudad Sahagún*, 12(23), 128–143.
- Dorighele, J. V., Quintilhano, E. A., Rodler, G. H., Sapateiro, D. H., Lazarim, A., do Amaral Ecker, A. E., ... Matera, T. C. (2023). Análise da influência de diferentes substratos no desenvolvimento inicial de mudas de alface lisa e crespa. *Revista Contemporânea*, 3(12), 29220–29233.
- Enriquez, E. A. E., Rodriguez, L. K. L., Barrera, L. P. P., y Cedeño, J. M. L. (2022). Deficiencia nutricional de macronutrientes en plantas de pimiento (*capsicum annum* linneo) cultivadas en solución nutritiva. *Revista de Investigación TALENTOS*, 9(1), 69–82.
- Feinstein, M. A. (2022). Evaluación de la recarga del acuífero solana. análisis de escenarios de cambio climático.
- Firdaus, I. S. M., Fikri, M. R., y Rosmiati, M. (2021). Monitoring and controlling smart hidroponics using android and web application. En *2021 3rd east indonesia conference on computer and information technology (eiconcit)* (pp. 177–182).

- Fonseca, M. C., Raslan, K. R., Pereira, P. R., Barbosa, J. G., y Martínez, H. E. (2005). Tamponamento do pH da solução nutritiva na hidroponia de plantas ornamentais. *Ornamental Horticulture*, 11(2).
- G Allen, R., S Pereira, L., Raes, D., Smith, M., y cols. (2006). Evapotranspiración del cultivo.
- Gamboa, L. V. (2013). Sistemas de recirculación de agua (ras) en piscicultura. *Revista Electrónica de Ingeniería En Producción Acuícola*, 7(7).
- Guerrero, E. M., Revelo, J. C., Benavides, O., Chaves, G., y Moncayo, C. Á. (2014). Evaluación de sustratos en un cultivo de lechuga bajo un sistema hidropónico en el municipio de pasto. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 31(1), 3–16.
- Gutiérrez, M. E. M. (2012). Sistemas de recirculación acuapónicos. *Informador técnico*(76), 123–129.
- Guzmán, J. (2003). Sustratos y tecnología de almácigo. *Memoria de cursos de producción en ambientes protegidos. San José, Costa Rica: UCR-CYTED*.
- Helmy, H., Janah, D. A. M., Nursyahid, A., Mara, M. N., Setyawan, T. A., y Nugroho, A. S. (2020). Nutrient solution acidity control system on nft-based hydroponic plants using multiple linear regression method. En *2020 7th international conference on information technology, computer, and electrical engineering (icitacee)* (pp. 272–276).
- Hernández, C. J., y Hernández, J. L. (2005). Valoración productiva de lechuga hidropónica con la técnica de película de nutrientes (NFT). *Naturaleza y desarrollo*, 3(1), 11–16.
- INTAGRI, S. (2017). La hidroponía: cultivos sin suelo. *Recuperado de: <https://www.intagri.com/articulos/horticultura-prottegida/la-hidroponia-cultivos-sin-suelo>*.
- Jaimés Terceros, M., y Blanco Villacorta, W. (2019). Establecimiento de un sistema hidropónico con la técnica de película nutritiva (NFT) en el cultivo de lechuga (*lactuca sativa* l.) en la estación experimental patacamaya, la paz. *Apthapi*, 5, 1608.
- Jerez, Z. (2007). Comparación del sustrato de fibra de coco con los sustratos de corteza de pino compostada, perlita y vermiculita en la producción de plantas de *eucalyptus globulus* (labill).[monografía]. *Valdivia (CHL): Facultad de Ciencias Forestales-Universidad Austral de Chile*.
- Juarez-Lopez-Porfirio, Morales-Rodriguez, H.-J., Sandoval-Villa, M., Gomez-Danes, A.-A., Cruz-Crespo, E., Juarez-Rosete, C.-R., ... others (2013). Producción de forraje verde hidropónico. *CONACYT*.
- Kalovrektis, K., Lykas, C., Fountas, I., Gkotsinas, A., Lekakis, I., y cols. (2013). Development and application embedded systems and wireless network of sensors to control of hydroponic greenhouses. *International Journal of Agriculture and Forestry*, 3(5), 198–202.
- Kularbphetong, K., Ampant, U., y Kongrodj, N. (2019). An automated hydroponics system based on mobile application. *International Journal of Information and Education Technology*, 9(8), 548–552.
- Lara-Izaguirre, A. Y., Rojas-Velázquez, A. N., Romero-Méndez, M. J., Ramírez-Tobías, H. M., Cruz-Crespo, E., Alcalá-Jáuregui, J. A., y Loredó-Ostí, C. (2019). Crecimiento y acumulación de  $\text{NO}_3$  en lechuga hidropónica con relaciones nitrato/amonio en dos estaciones de cultivo. *Revista fitotecnia mexicana*, 42(1), 21–29.
- Longar Blanco, M. d. P., Pérez Hernández, M. d. P. M., y Ríos Martínez, E. (2013). El estado de técnica de la hidroponía. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 4(5), 803–809.

- López-Gómez, J. D., Sotelo Nava, H., Villegas-Torres, O. G., y Andrade Rodríguez, M. (2020). Rendimiento y calidad del chile habanero en respuesta a la poda de conducción y régimen nutrimental. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 11(2), 315–325.
- López-Gómez, J. D., Villegas-Torres, O. G., Sotelo Nava, H., Andrade Rodríguez, M., Juárez López, P., y Martínez Fernández, E. (2017). Rendimiento y calidad del chile habanero (*capsicum chinense jacq.*) por efecto del régimen nutrimental. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 8(8), 1747–1758.
- López-Pérez, L., Cárdenas-Navarro, R., Lobit, P., Martínez-Castro, O., y Escalante-Linares, O. (2005). Selección de un sustrato para el crecimiento de fresa en hidroponía. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 28(2), 171–171.
- Luis-Daniel, O.-M., Martínez-Valenzuela, C., Ocampo-Mendoza, J., Sandoval-Castro, E., y Armendáriz, B. P. (2016). Efficiency of substrates in soil and hydroponic system for greenhouse tomato production. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 7(3), 643–653.
- Maltagliati, F. (2024). Agrivoltaico. *Italiano digitale*(28).
- Manqueros-Avilés, V. (2015). Mediciones nutritivas en un sistema hidropónico nft mediante el uso de sensores de iones selectivos y labview. En *1er congreso internacional de ciencias de la ingeniera* (pp. 1–8).
- Maucieri, C., Nicoletto, C., Junge, R., Schmutz, Z., Sambo, P., y Borin, M. (2018). Hydroponic systems and water management in aquaponics: A review. *Italian Journal of Agronomy*, 13(1), 1–11.
- Medrano-García, P., Chipana-Rivera, R., Moreno-Pérez, M. F., y Roldán-Cañas, J. (2019). Riego capilar por mecha en el cultivo de lechuga (*lactuca sativa l.*) en sistema combinado de solución hidropónica y suelo, como alternativa en la agricultura urbana de bolivia. *Ing. Agua*, 23(1), 53.
- Muñoz Gutiérrez, M. E. (2012). Sistemas de recirculación acuapónicos. *Inf. téc.*, 76, 123.
- Neves, J. F. N. F., Nodari, I. D. E., Júnior, S. S., Dias, L. D. E., da Silva, L. B., y Dallacort, R. (2016). Produção de cultivares de alface americana sob diferentes ambientes em condições tropicais. *Revista Agro@ mbiente On-line*, 10(2), 130–136.
- Ochoa-Noriega, C. A., Aznar-Sánchez, J. A., Velasco-Muñoz, J. F., y Álvarez-Bejar, A. (2020). The use of water in agriculture in mexico and its sustainable management: A bibliometric review. *Agronomy*, 10(12), 1957.
- Ortega Martinez, L. D., Martinez Valenzuela, C., Ocampo Mendoza, J., Sandoval Castro, E., y Perez Armendariz, B. (2017). Eficiencia de sustratos en el sistema hidropónico y de suelo para la producción de tomate en invernadero. *Rev. Mex. De Cienc. Agric.*, 7(3), 643–653.
- Ortiz-Vásquez, A. C., Aguilar Mejía, F. J., y Pérez Díaz, L. Y. (2018). Desarrollo de un cultivo hidropónico de lechugas automatizado tipo flujo y reflujo, con solución nutritiva y utilizando un sustrato vegetal, en la fundación cultivos de amor ubicada en belén san bernardo municipio de medellín.
- Parra-Terraza, S., Angulo-Castro, A., López-Rodas, C. F., y Retes-Manjarrez, J. E. (2022). Relaciones magnesio y nitrógeno en soluciones nutritivas y el rendimiento de pepino en sistema hidropónico cerrado. *Terra Latinoamericana*, 40.
- Paulus, D., Dourado Neto, D., y Paulus, E. (2012). Análise sensorial, teores de nitrato e de nutrientes de alface cultivada em hidroponia sob águas salinas. *Horticultura Brasileira*, 30, 18–25.

- Pérez-Vazquez, E. L., Gaucín-Delgado, J. M., Ramírez-Rodríguez, S. C., Sariñana-Navarrete, M. d. l. Á., Zapata Sifuentes, G., y Zuñiga-Valenzuela, E. (2020). Conductividad eléctrica de la solución nutritiva efecto en el rendimiento y la calidad nutraceutica de pimiento morrón. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 11(7), 1669–1675.
- Pertierra Lazo, R., y Quispe Gonzabay, J. (2020a). Análisis económico de lechugas hidropónicas bajo sistema raíz flotante en clima semiárido. *Granja*, 31(1), 118–130.
- Pertierra Lazo, R., y Quispe Gonzabay, J. (2020b). Análisis económico de lechugas hidropónicas bajo sistema raíz flotante en clima semiárido. *LA GRANJA. Revista de Ciencias de la Vida*, 31(1), 118–130.
- Porras Pumalema, C. D. (2021). *Análisis, desarrollo e implementación de un sistema hidropónico ebb and flow automatizado para la fundación ecosur-ecuador* (B.S. thesis). Riobamba Universidad Nacional de Chimborazo.
- Pratt, L., Ortega, J. M., Nieto, E., y Braly-Cartillier, I. (2019). Agricultura protegida en México. *Elaboración de la metodología para el primer bono verde agrícola certificado*, 1–57.
- Preciado-Rangel, P., Rueda-Puente, E. O., Valdez-Aguilar, L. A., Reyes-Pérez, J. J., Gallegos-Robles, M. Á., y Murillo-Amador, B. (2021). Conductividad eléctrica de la solución nutritiva y su efecto en compuestos bioactivos y rendimiento de pimiento morrón (*capsicum annum* l.). *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 24(2), 52.
- Roldán, G. Q., y Soto, C. M. (2005). Evaluación de sustratos para almácigos de hortalizas. *Agronomía mesoamericana*, 16(2), 171–183.
- Saaïd, M., Sanuddin, A., Ali, M., y Yassin, M. (2015). Automated ph controller system for hydroponic cultivation. En *2015 IEEE Symposium on Computer Applications & Industrial Electronics (ISCAIE)* (pp. 186–190).
- Saaïd, M., Yahya, N., Noor, M., y Ali, M. M. (2013). A development of an automatic microcontroller system for deep water culture (dwc). En *2013 IEEE 9th International Colloquium on Signal Processing and its Applications* (pp. 328–332).
- Saccoccia, M. P. (2020). Estudio de la tolerancia a salinidad en etapas vegetativas tempranas de familias de festuca alta (*festuca arundinacea* schreb. var *arundinacea*). *Trabajo final de grado. Pergamino, Argentina. UNNOBA*.
- Salinas Lugo, A. G. (2016). Efecto sobre la calidad de la germinación en diferentes lotes de semillas de lechuga (*lactuca sativa* l.).
- Sánchez, G. (1982). Cultivo hidropónico. *Universidad de Panamá, Facultad de Ingeniería*, 01–50.
- Sánchez Cohen, I., Catalán Valencia, E., González Cervantes, G., Estrada Avalos, J., y García Arellano, D. (2006). Indicadores comparativos del uso del agua en la agricultura. *Agricultura técnica en México*, 32(3), 333–340.
- Sardare, M. D., y Admane, S. V. (2013). A review on plant without soil-hydroponics. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 2(3), 299–304.
- Sigler, A., y Bauder, J. (2017). Alcalinidad, ph, y sólidos disueltos totales. *Obtenido de Well Educated Educación en el Agua de Pozo: [http://region8water.colostate.edu/PDFs/we\\_espanol/Alkalinity\\_pH\\_TDS](http://region8water.colostate.edu/PDFs/we_espanol/Alkalinity_pH_TDS)*, 20, 2012–11.



- Sihombing, P., Karina, N., Tarigan, J., y Syarif, M. (2018). Automated hydroponics nutrition plants systems using arduino uno microcontroller based on android. En *Journal of physics: Conference series* (Vol. 978, p. 012014).
- Son, J. E., Kim, H. J., y Ahn, T. I. (2020). Hydroponic systems. En *Plant factory* (pp. 273–283). Elsevier.
- Sosa-Moguel, O., Cuevas-Glory, L., Pino, J. A., y Sauri-Duch, E. (2018). Conocimientos actuales sobre el aroma de chile habanero (*capsicum chinense jacq.*): Current knowledge about aroma of habanero pepper (*capsicum chinense jacq.*). *Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 28(3), 68–72.
- Souza, S. V., y Gimenes, R. M. T. (2018). Viabilidade econômica da utilização de energia solar em sistemas de produção hidroponica. *Informe Gepec*, 22(2), 27–45.
- Tagle, S., Pena, R., Oblea, F., Benoza, H., Ledesma, N., Gonzaga, J., y Lim, L. A. G. (2018). Development of an automated data acquisition system for hydroponic farming. En *2018 IEEE 10th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (hnicem)* (pp. 1–5).
- Tapia-Vargas, M., Larios-Guzmán, A., Díaz-Sánchez, D. D., Ramírez-Ojeda, G., Hernández-Pérez, A., Vidales-Fernández, I., y Guillén-Andrade, H. (2016). Producción hidropónica de chile habanero negro (*capsicum chinense jacq.*). *Revista fitotecnia mexicana*, 39(3), 241–245.
- Tucuch-Haas, C., Alcántar-González, G., Ordaz-Chaparro, V., Santizo-Rincón, J., y Larqué-Saavedra, A. (2012). Producción y calidad de chile habanero (*capsicum chinense jacq.*) con diferentes relaciones  $\text{nh}_4^+/\text{no}_3^-$  y tamaño de partícula de sustratos. *Terra Latinoamericana*, 30(1), 9–15.
- Vásconez, J. A. (2014). *Evaluación de los residuos picados de eastern red cedar (juniperus virginiana l.) como alternativa de sustrato a la perlita para el cultivo de pepino en hidroponía, en la universidad de kentucky, ee. uu.* (Tesis Doctoral no publicada). Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano.
- Vásquez, A. (2015). Desarrollo y prospectivas de energía renovable en México. *Revista Economía Informa*, 390, 132–153.
- Wurm, G. E., Urquijo, R. R., y Marinelli, M. J. (2019). Monitoreo en tiempo real de conductividad eléctrica en cultivos hidropónicos. En *XI Congreso de Agroinformática (cai)-jaino 48 (salta, 2019)*.
- Zamora-Peredo, L., Rodríguez-Jimenez, R., García González, L., Hernández Torres, J., y Hernandez Quiroz, T. (2018). Estudio del pericarpio de chile habanero (*capsicum chinense jacq.*) por espectroscopia raman. *Chilean journal of agricultural & animal sciences*, 34(1), 68–74.

# Capítulo A

---

## ANEXOS

---

### A.1. Anexo A

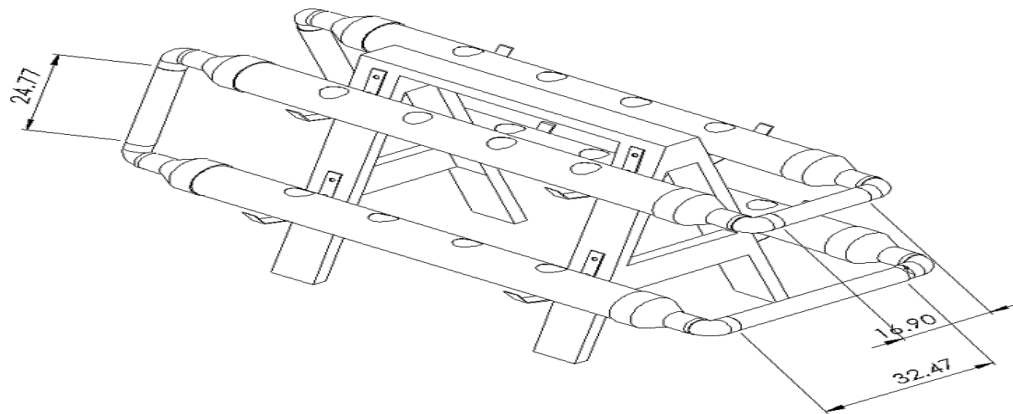


Figura A.1: Curso impartido en el 3er Congreso Internacional de Tecnología y Ciencia Aplicada (CITCA)

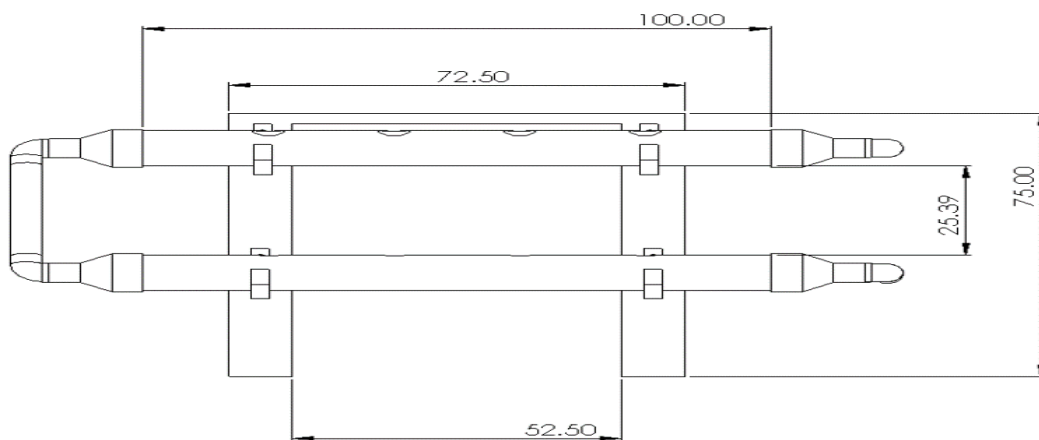


Figura A.2: Medidas laterales

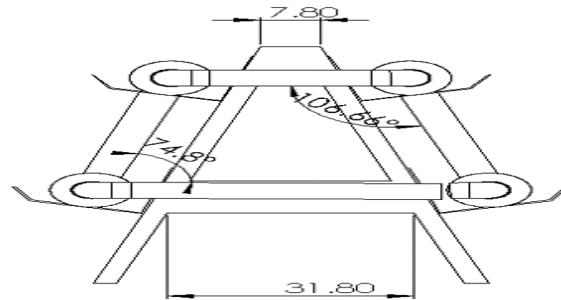


Figura A.3: Ángulos de las piezas

## A.2. Anexo B

### 1. Corte y perforación

- Marcar el tubo de PVC de 4" de 20 cm para hacer las 4 perforaciones.
- Hacer orificios donde fueron marcados los puntos en la parte superior de los tubos de PVC para las plantas.

### 2. Construcción de la Base

- Armar la base de madera (pieza 19) en forma de caballete, asegurando que pueda sostener el peso del sistema.
- Instalar los soportes de 4" (pieza 18) sobre la base de madera para fijar los tubos principales.

### 3. Ensamblaje de los canales de cultivo

- Conectar los tubos de PVC de 4" de 1 m (pieza 1) con coples de PVC de 4" (pieza 3).
- Conectar los extremos de los tubos con reducciones de PVC de 4" a 2" (pieza 2).
- Utilizar tubos de PVC de 2" (pieza 4) para conectar codos de PVC de 2" (pieza 5) y después los tubos de diferentes medidas (piezas 6, 8 y 9) para la interconexión entre niveles.
- Por último para hacer la interconexión de los tubos superiores se debe hacer la conexión con una T de PVC de 2" (pieza 7) al tubo (pieza 8) para redirigir el flujo de agua, así mismo para hacer la conexión de los tubos inferiores se debe de conectar con la T de PVC (pieza 7) al tubo (pieza 9).

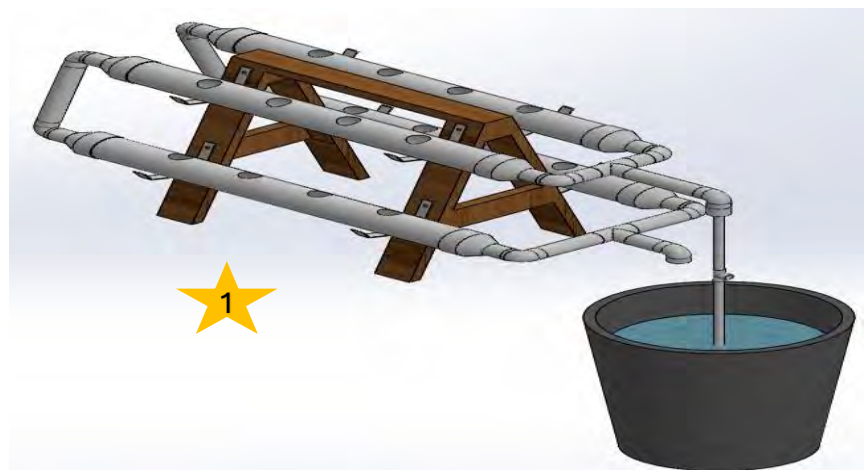
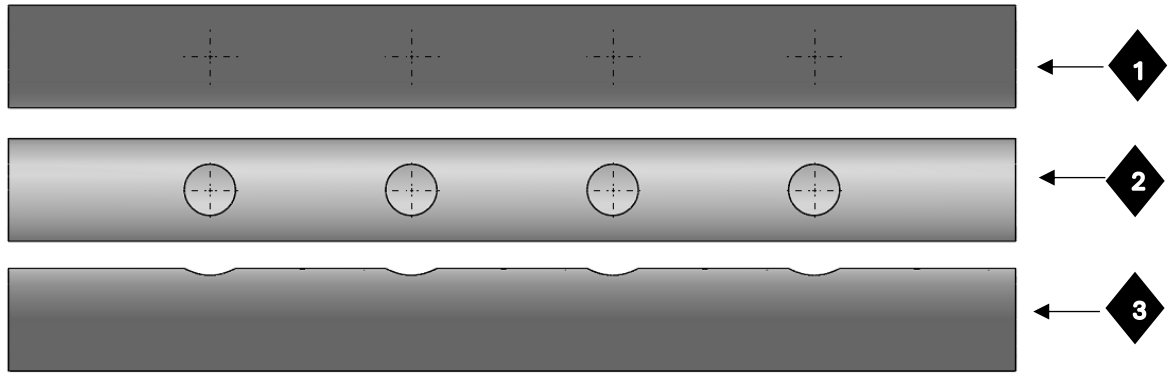
### 4. Instalación del Sistema hidropónico

- Conectar el reductor de PVC de 2" a 1/2" (pieza 10) al sistema de recirculación con el tubo (pieza 6) que va conectado a la T (pieza 7).
- Usar tubos de PVC de 1/2" (piezas 11 y 13) para conectar con la conexión en T de 1/2" (pieza 12) y conectores hembra (piezas 14, 15 y 16) en las uniones necesarias.
- A la (pieza 16) colocar la llave de PVC de 1/2" (pieza 17) para regular el flujo de agua.

### 5. Conexión de la Bomba y el Tanque

- Colocar el tanque de plástico de 100 L (pieza 21) debajo del sistema.
- Instalar la bomba sumergible (pieza 20) dentro del tanque.
- Conectar la salida de la bomba al sistema de irrigación utilizando los tubos de PVC de 1/2".

# Manual de construcción



## Pruebas y Ajustes

- Llenar el tanque de agua y encender la bomba para verificar el flujo de agua.
- Ajustar la inclinación de los tubos para asegurar un drenaje adecuado.
- Revisar que no haya fugas en las conexiones.

## Mantenimiento

- Revisar y limpiar regularmente la bomba y los tubos para evitar obstrucciones.
- Controlar el nivel de agua y nutrientes en el tanque.
- Inspeccionar las plantas y el sistema de riego para asegurar un funcionamiento óptimo.

### A.3. Artículo publicado

Se realizó un artículo titulado Analysis of the advantages and difficulties in the implementation of hydroponic systems, en el 1er Congreso Internacional de Tecnología y Ciencia Aplicada (CITCA), en el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET).

## Analysis of the advantages and difficulties in the implementation of hydroponic systems

Lizbeth Vidal Cortez\* Carlos M. Astorga Zaragoza\*  
Juan Reyes Reyes\*

\* *Tecnológico Nacional de México, CENIDET, Interna Internado  
Palmira s/n, C.P. 62490 Cuernavaca, Mor., México (e-mail:  
{m23ce039, carlos.az, juan.rr}@cenidet.tecnm.mx).*

### Abstract:

This article details six methods for the implementation of hydroponic systems, which are sustainable cultivation techniques that dispense with soil, opting instead for nutrient solutions or inert substrates. These techniques guarantee the absorption of all essential nutrients by the plant through an aqueous solution. Various modalities of hydroponic techniques are explored, each with its own advantages in terms of control and resource efficiency. However, the technical challenges and initial investment associated with their implementation are also addressed. This soilless growing approach is gaining significant ground in contemporary food production.

*Keywords:* Hydroponics, horticulture, monitoring, process control variables, soilless cultivation.

### 1. INTRODUCCIÓN

La hidroponía es una técnica de cultivo que prescinde del suelo como medio de producción y en su lugar utiliza soluciones nutritivas para proporcionar a las plantas los nutrientes esenciales que necesitan para crecer y prosperar. Esta técnica ha ganado popularidad en la agricultura sostenible debido a sus múltiples ventajas, como un mejor control del ambiente de crecimiento de las plantas, un uso más eficiente del agua y la posibilidad de crecer en espacios o en zonas de mala calidad del suelo (Longar Blanco et al., 2013).

Además, la hidroponía permite un control preciso de los nutrientes que reciben las plantas, asegurando un suministro adecuado para un crecimiento saludable. Esto conduce a un uso más eficiente de los recursos, ya que las plantas toman solo lo que necesitan, reduciendo el desperdicio de agua y nutrientes en comparación con la agricultura convencional (Barbado, 2005).

En los sistemas hidropónicos, exploraremos los fundamentos de esta técnica de cultivo, sus tipos más comunes, los beneficios que ofrece y algunas consideraciones clave para implementar con éxito un sistema hidropónico. Desde la antigüedad hasta la actualidad, la hidroponía ha evolucionado y se ha adaptado a las necesidades de la agricultura sostenible y su crecimiento continuo, promete desempeñar un papel crucial en la producción de alimentos en el futuro (Sánchez, 1982).

La velocidad de crecimiento en los sistemas hidropónicos también tienden a ser más rápidos, lo que significa que los ciclos de cultivo son más cortos y con una mayor producción en el mismo período de tiempo, al ser sistemas cerrados, se pueden implementar en una variedad de entornos, desde áreas urbanas hasta regiones con suelos poco fértiles, aprovechando el espacio de manera más efectiva y permitiendo la agricultura en lugares donde sería difícil o imposible de otra manera (Ani and Gopalakrishnan, 2020).

Se utilizan diferentes métodos y tecnologías para controlar la temperatura, la humedad, la iluminación y la ventilación, creando un entorno favorable para el desarrollo de las plantas. Esto permite cultivar una amplia variedad de cultivos durante todo el año, independientemente de las condiciones climáticas externas (López Elías, 2018).

A lo largo de este artículo, se presenta el funcionamiento de la hidroponía, sus aplicaciones en la agricultura y la horticultura, y en los diferentes sistemas hidropónicos disponibles, proporcionaremos una visión general de los factores clave que deben considerarse al embarcarse en un proyecto hidropónico, ofreciendo una alternativa innovadora y eficiente a la agricultura sostenible. Principalmente, al prescindir del suelo, eliminando muchos de los problemas asociados con enfermedades del suelo y plagas, lo que facilita el control y la prevención de problemas de cultivo.

#### A.4. Retribución social

Se impartió un curso titulado Introducción a la hidroponía: El futuro del cultivo urbano, en el 3er Congreso Internacional de Tecnología y Ciencia Aplicada (CITCA), en el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET).



Figura A.4: Curso impartido en el 3er Congreso Internacional de Tecnología y Ciencia Aplicada (CITCA)



**Educación**  
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

**EL TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO  
A TRAVÉS DEL CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN  
Y DESARROLLO TECNOLÓGICO**

OTORGA EL PRESENTE

**RECONOCIMIENTO**

A

**Lizbeth Vidal Cortez**

Por su invaluable participación impartiendo el taller:

Introducción a la hidroponía: El futuro del cultivo urbano

En el marco del 3er Congreso Internacional de Tecnología y Ciencias Aplicadas (CITCA), realizado del 19 al 22 de noviembre de 2024 en el Tecnológico Nacional de México campus Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico.

Cuernavaca, Morelos, 19 de noviembre de 2024



**LORENZO O. HERNÁNDEZ**

**DIRECTOR DEL CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN  
Y DESARROLLO TECNOLÓGICO**

Sello Digital:

*gM+WuyC7znZ+QV6vLcXX6EXUxUCbo94rxFHI0uLgwwiNd9YFRb1C37YB/+M/0JdeqkSxM7vuVD0bQuII1+rBxt  
faI1fMRrJcTzSXFkyDuW6h3oh1ct/M9PdQ1TKmSo7WRsmtYKmNyPnYvkW40vqyQv5ojL50xOr4/HbUsg4VGqvu  
OuCV61hlW+rngNjGSoBPvRHteRZhTqnZrhcgYS81C6inonheWyjhtAtXZHPQ01WFI5jog4cCrF0v0mDeAH601s  
n6XG1gaM9f0848vokx21+DV1KvNkUE3R/7se0tVuSPs6YHP/Vz5nGeyIRJHOg40dsd6XS1EJkp3uLPMcOrkg==*

CITCA45524

<http://constancias.cenidet.tecnm.mx>

**cenidet**<sup>®</sup>  
Centro Nacional de Investigación  
y Desarrollo Tecnológico

**CITCA**  
Ser. CONGRESO INTERNACIONAL  
DE TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA

