



Universidad
Nacional
de Loja

Universidad Nacional de Loja

Facultad de las Energías, las Industrias y los Recursos

Naturales no Renovables.

Carrera de Ingeniería Electromecánica

**Diseño y construcción de un prototipo hidropónico para cultivo de
hortalizas aplicable en cultivos urbanos**

Trabajo de Titulación previo, a la
obtención del título de Ingeniera
Electromecánica.

AUTORA:

Wendy Juliana Chuquimarca Jumbo

DIRECTOR:

Dr. C. Jorge Enrique Carrión González, PhD.

Loja - Ecuador

2023

Educamos para **Transformar**

Certificación

Loja, 30 de noviembre de 2023

Dr. C. Jorge Enrique Carrión González, PhD.
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

CERTIFICO:

Que he revisado y orientado todo el proceso de elaboración del Trabajo de Titulación denominado: **Diseño y construcción de un prototipo hidropónico para cultivo de hortalizas aplicable en cultivos urbanos**, previo a la obtención del título de **Ingeniera Electromecánica**, de la autoría de la señorita **Wendy Juliana Chuquimarca Jumbo** con **cédula de identidad Nro. 1724941693**, una vez que el trabajo cumple con todos los requisitos exigidos por la Universidad Nacional de Loja, para el efecto, autorizo la presentación del mismo para su respectiva sustentación y defensa.

Dr. C. Jorge Enrique Carrión González, PhD.
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Autoría

Yo, **Wendy Juliana Chuquimarca Jumbo**, declaro ser autora del presente Trabajo de Titulación y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos, de posibles reclamos y acciones legales, por el contenido del mismo. Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja, la publicación del Trabajo de Titulación en el Repositorio Institucional – Biblioteca Virtual.

Firma:



Cédula de identidad: 1724941693

Fecha: 30 de noviembre de 2023

Correo electrónico personal: julianacjumbo@gmail.com

Correo electrónico institucional: wendy.chuquimarca@unl.edu.ec

Teléfono: 0997686969

Carta de autorización por parte del autor para la consulta de reproducción parcial o total, y/o publicación electrónica del texto completo, Trabajo de Titulación.

Yo, **Wendy Juliana Chuquimarca Jumbo**, declaro ser autor del Trabajo de Titulación denominado: **Diseño y construcción de un prototipo hidropónico para el cultivo de hortalizas aplicable en cultivos urbanos**, como requisito para optar el grado de **Ingeniera Electromecánica**, autorizo al sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que, con fines académicos, muestre al mundo la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Institucional.

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el Repositorio Institucional, en las redes de información del país y del exterior, con los cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia del Trabajo de Titulación que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización en la ciudad de Loja, a los treinta días del mes de noviembre del dos mil veintitrés.

Firma:



Autora: Wendy Juliana Chuquimarca Jumbo

C.I: 1724941693

Dirección: Loja, Zarzas I, calle Américo Vespucio y Diego de Rojas.

Teléfono: +593 997686969

Correo Electrónico: wendy.chuquimarca@unl.edu.ec

DATOS COMPLEMENTARIOS:

Director del Trabajo de Titulación: Dr. C. Jorge Enrique Carrión González, PhD.

Dedicatoria

Este trabajo es dedicado con profundo amor a mis padres, Rosario y Troadio (+), quienes han sido mi mayor fuente de inspiración y apoyo incondicional a lo largo de mi vida. Su amor, paciencia y confianza en mí han sido fundamentales para llegar hasta este momento.

A mis abuelitos, Macrina y Lauro (+) que, con su amor, bendiciones sabiduría y consejos me han guiado en momentos difíciles. A mi amigo gracias a su apoyo, comprensión, por su constante ánimo y motivación.

Este trabajo es un testimonio de mi esfuerzo, perseverancia y dedicación, pero también es un reflejo del amor y apoyo incondicional que he recibido a lo largo de mi camino.

Wendy Juliana Chuquimarca Jumbo.

Agradecimiento

Primero agradezco a Dios, por ser mi guía y mi fortaleza en todo momento de mi vida. Quiero expresar mi profundo agradecimiento a todas las personas que han contribuido de manera significativa en la realización de este trabajo.

Quiero agradecer a mi director del Trabajo de Titulación, Dr. C. Jorge Carrión González, por su orientación experta, apoyo constante y dedicación en cada etapa de este proyecto. Su sabiduría, conocimiento y compromiso han sido fundamentales para el éxito de esta investigación. Al centro de investigación I2TEC, por abrirme un espacio y ayudarme en cada duda y dificultad.

Quiero agradecer a mis padres, abuelitos y familiares por su amor, apoyo incondicional y sacrificio. Su aliento constante y confianza en mí han sido mi mayor motivación. Su ejemplo de perseverancia y dedicación ha sido una fuente de inspiración a lo largo de este camino. A mis amigos y seres queridos que me han brindado su compañía y palabras de aliento en momentos difíciles. Su apoyo moral y emocional ha sido invaluable para superar los desafíos que he enfrentado durante esta etapa.

A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento por su generosidad, confianza y apoyo. Este trabajo es el resultado de un esfuerzo colectivo y representa el inicio de un nuevo capítulo en mi vida académica y profesional.

Wendy Juliana Chuquimarca Jumbo.

Índice de contenidos.

Portada	i
Certificación	ii
Autoría	iii
Carta de autorización.	iv
Dedicatoria	v
Agradecimiento	vi
Índice de contenidos	vii
Índice de tablas	ii
Índice de figuras.....	iii
Índice de anexos.....	v
Simbología	vi
1. Título	1
2. Resumen	2
Abstract	3
3. Introducción	4
4. Marco teórico	6
4.1 Capítulo I: La Hidroponía.....	6
4.1.1 Concepto de hidroponía.....	6
4.1.1.1 Ventajas y desventajas de los cultivos hidropónicos.....	6
4.1.1.2 La hidroponía en el mundo.....	7
4.1.1.3 La hidroponía en el Ecuador.	7
4.1.1.4 La hidroponía en cultivos urbanos.	8
4.1.1.5 Técnicas de hidroponía.....	9
4.1.1.6 Fases de un cultivo hidropónico.....	12
4.1.1.7 Especies adecuadas para los cultivos hidropónicos.	13
4.1.2 Nutrición de las plantas en hidroponía	14
4.1.2.1 Nutrientes esenciales para el desarrollo de las plantas.....	14
4.1.2.2 Composición de una solución nutritiva.	14
4.1.2.2.1 Aplicación de la solución nutritiva en un medio líquido.....	15
4.1.2.3 Frecuencia de riego.	15
4.1.2.4 Factores que afectan la solución nutritiva.	16
4.2 Capítulo II: Fundamentos para la construcción de un Cultivo Hidropónico	19
4.2.1 Componentes de un sistema aeropónico.....	19

4.2.2	Dispositivos de monitoreo de cultivos hidropónicos.....	21
4.2.2.1	Sensor de Temperatura y humedad.	21
4.2.2.2	Controlador de pH y EC.....	21
4.2.2.3	El Internet de las cosas (IoT).....	21
4.2.3	Sistema de bombeo	22
4.2.3.1	Red de distribución.....	23
4.2.3.2	Pérdidas primarias.	24
4.2.3.3	Pérdidas secundarias.....	25
4.2.3.4	Pérdidas totales.....	25
4.2.3.5	Bomba centrífuga.	26
4.2.3.5.1	Carga hidrostática del sistema.	26
4.2.3.5.2	Selección de la bomba	27
5.	Metodología	28
5.1	Área de estudio	28
5.2	Equipos y materiales	28
5.2.1	Recursos Tecnológicos	28
5.2.2	Recursos Humanos	28
5.2.3	Materiales	29
5.2.3.1	Materiales de construcción.....	29
5.2.3.2	Materiales agrónomos.	29
5.3	Procedimiento	29
5.3.1	Análisis de las técnicas hidropónicas	30
5.3.2	Diseño y construcción del prototipo	31
5.3.3	Validación del prototipo construido	32
5.4	Procesamiento y análisis de datos.....	32
5.4.1	Determinación de la técnica hidropónica a implementarse	32
5.4.2	Diseño, dimensionamiento y construcción del prototipo	34
5.4.2.1	Selección de especie a cultivar.....	34
5.4.2.2	Modelos de cultivos aeropónicos.	34
5.4.2.3	Selección de material de construcción del prototipo.....	36
5.4.2.4	Diseño de los canales de cultivo.....	36
5.4.2.5	Tanque colector	37
5.4.2.6	Diseño del sistema de bombeo.	38
5.4.2.6.1	Cálculos de la red de distribución.....	39

5.4.2.6.2	Cálculo de la potencia necesaria y selección de la bomba.	45
5.4.2.7	Determinación de la frecuencia de riego	45
5.4.2.8	Selección de los dispositivos de monitoreo.....	46
5.4.2.8.1	Parámetros a controlar en el cultivo.	47
5.4.2.9	Construcción del prototipo.	47
5.4.2.9.1	Base del cultivo.	47
5.4.2.9.2	Torres o canales de cultivo.	48
5.4.2.9.3	Red de distribución.....	50
5.4.3	Validación del prototipo construido	50
5.4.3.1	Preparación del prototipo.	50
5.4.3.2	Cultivo hidropónico de lechuga.	51
5.4.3.2.1	Análisis de la evolución de la lechuga en cultivo aeropónico y comparación con el método tradicional.....	52
5.4.3.2.2	Control de parámetros.	53
5.4.3.2.3	Consumo energético del cultivo	53
6.	Resultados.....	54
6.1	Análisis de las técnicas hidropónicas.....	54
6.2	Diseño y construcción del prototipo	54
6.2.1	Diseño del prototipo	54
6.2.2	Construcción del prototipo	60
6.3	Validación del prototipo	60
6.3.1	Comparación de la técnica aeropónica con el método tradicional	62
6.3.1.1	Análisis de evolución del cultivo.	63
6.3.1.2	Análisis de producción.	67
6.3.2	Control de parámetros de la solución nutritiva.....	68
6.3.3	Eficiencia del uso del recurso hídrico.....	70
6.3.4	Consumo energético del cultivo	71
7.	Discusión	72
8.	Conclusiones	76
9.	Recomendaciones	77
10.	Bibliografía	78
11.	Anexos	82

Índice de tablas:

Tabla 1. Comparación de las técnicas hidropónicas.	12
Tabla 2. Solución nutritiva propuesta por la FAO.	15
Tabla 3. Relación entre Temperatura y oxígeno en solución nutritiva.	16
Tabla 4. Nivel de pH recomendado según el tipo de cultivo.	17
Tabla 5. Niveles de conductividad eléctrica de diferentes cultivos en su primera etapa.	18
Tabla 6. Demanda diaria de solución nutritiva por especie.	20
Tabla 7. Materiales de construcción.	29
Tabla 8. Materiales agrónomos.	29
Tabla 9. Matriz de ponderación para definir la técnica hidropónica a implementarse.	33
Tabla 10. Valoración aplicada a la matriz de ponderación.	33
Tabla 11. Parámetros necesarios para la producción de lechuga.	34
Tabla 12. Ventajas y desventajas de los modelos de cultivos aeropónicos.	35
Tabla 13. Matriz de ponderación para definir el modelo del prototipo.	36
Tabla 14. Coeficientes de resistencia de los accesorios utilizados en la red de distribución.	43
Tabla 15. Comparación de los dispositivos de monitoreo para el cultivo hidropónico.	46
Tabla 16. Longitudes de las partes de la estructura del cultivo aeropónico.	47
Tabla 17. Valoración de cada técnica hidropónica a partir de la matriz de ponderación.	54
Tabla 18. Valoración total para cada modelo según la matriz de ponderación elaborada.	54
Tabla 19. Características del primer tramo de la red de distribución.	56
Tabla 20. Características de la tubería principal, secundaria y ramales de riego.	56
Tabla 21. Características y especificaciones de la bomba seleccionada.	57
Tabla 22. Frecuencia de riego establecida según la etapa del cultivo.	58
Tabla 23. Rangos de medición y parámetros de PH-W2823US-A.	59
Tabla 24. Tamaño y número de hojas de lechuga cultivadas en el método tradicional y aeropónico.	63
Tabla 25. Diámetro de las lechugas cultivadas por método tradicional y aeropónico.	65
Tabla 26. Consumo hídrico en los métodos tradicional y técnica aeropónica.	70
Tabla 27. Valores de diámetros y espesor de tubos y accesorios.	85
Tabla 28. Características de los elementos de la base del cultivo.	85
Tabla 29. Valores de diámetros y espesor de tubos y accesorios de tubería roscada.	89

Índice de figuras:

Figura 1. Cultivo en solución nutritiva	10
Figura 2. Cultivo hidropónico NFT	10
Figura 3. Técnica del flujo y reflujo.	11
Figura 4. Cultivo aeropónico	11
Figura 5. Cultivo por goteo.....	11
Figura 6. Rango de disponibilidad de nutrientes	17
Figura 7. Cultivo aeropónico	19
Figura 8. Bomba centrífuga	26
Figura 9. Ubicación geográfica del proyecto.....	28
Figura 10. Metodología aplicada para el desarrollo del primer objetivo.....	30
Figura 11. Metodología aplicada para el desarrollo del segundo objetivo	31
Figura 12. Metodología aplicada para el desarrollo del tercer objetivo	32
Figura 13. Distancia entre orificios en las torres del cultivo	37
Figura 14. Red de distribución del cultivo aeropónico.....	38
Figura 15. Unión roscable de 1/2 in.....	43
Figura 16. Parámetros a controlar en el cultivo hidropónico.....	47
Figura 17. Montaje de la base del cultivo.....	48
Figura 18. Marcación de distancias en el canal de cultivo (torre).	48
Figura 19. Corte longitudinal y realización de los orificios en la tubería.....	49
Figura 20. Unión de torres y base del cultivo.....	49
Figura 21. Canastilla hidropónica S5,5.....	50
Figura 22. Red de distribución del cultivo.....	50
Figura 23. Colocación del sustrato en las canastillas hidropónicas.....	51
Figura 24. Caudal de riego en el interior de los canales de cultivo.	51
Figura 25. Trasplante de las plántulas de lechuga en el prototipo.....	52
Figura 26. Aplicación manual de la solución nutritiva al tanque colector del cultivo.	53
Figura 27. Modelo aeropónico seleccionado.	55
Figura 28. Bomba centrífuga seleccionada (RIO PLUS 1100).	57
Figura 29. Temporizador digital MAVIJU de 8 tiempos.....	58
Figura 30. Equipo de monitoreo (PH-W2823US-A).....	59
Figura 31. Estructura del prototipo aeropónico.	60
Figura 32. Problemas experimentados en el cultivo de la lechuga aeropónico.	61
Figura 33. Recuperación del cultivo luego de 10 días.....	61

Figura 34. Método tradicional y técnica aeropónica para el cultivo de lechuga.	62
Figura 35. Medición del tamaño de las hojas de la lechuga.	63
Figura 36. Comparación del método tradicional y aeroponía con respecto al tamaño hojas .	64
Figura 37. Comparación del método tradicional y aeroponía con respecto al número hojas .	65
Figura 38. Comparación del método tradicional y la aeroponía con respecto al diámetro.....	66
Figura 39. Tamaño de las raíces de las plantas.....	67
Figura 40. Pérdida de producción en el método tradicional.	67
Figura 41. Pérdidas de producción con la técnica de aeroponía.	68
Figura 42. Valores de temperatura de la solución nutritiva.....	69
Figura 43. Niveles de pH de la solución nutritiva.	69
Figura 44. Valores de conductividad eléctrica EC.	70
Figura 45. Comparación del consumo hídrico en el método tradicional y aeroponía.	71
Figura 46. Elementos que conforman la base del cultivo hidropónico.....	85

Índice de anexos:

Anexo 1. Propiedades del agua en unidades del Sistema Internacional	82
Anexo 2. Ecuaciones para calcular el factor de fricción (f) según el régimen del fluido.....	83
Anexo 3. Valores del coeficiente de resistencia (k) según el tipo de accesorio	84
Anexo 4. Cálculos del tanque colector – base del cultivo aeropónico	85
Anexo 5. Rugosidad (ϵ) según el tipo de material.....	87
Anexo 6. Tuberías comerciales de polietileno (PE)	88
Anexo 7. Tuberías comerciales de policloruro de vinilo (PVC)	89
Anexo 8. Cálculo de las horas de funcionamiento de la bomba centrífuga.....	90
Anexo 9. Planos del prototipo construido.....	91
Anexo 10. Valores de monitoreo de la solución nutritiva	105
Anexo 11. Construcción del prototipo.....	106
Anexo 12. Costo total de la implementación del prototipo	115
Anexo 13. Certificado de traducción del resumen.....	116

Simbología:

C_{MT}	=	Capacidad mínima del depósito colector [L]
D_D	=	Demanda diaria de solución nutritiva por planta $\left[\frac{L}{\text{día}}\right]$.
N	=	Cantidad de periodos de autonomía [día].
C	=	Cantidad de total de plantas [adimensional].
K_S	=	Factor de seguridad por pérdidas [adimensional].
Q	=	Caudal $\left[\frac{m^3}{s}\right]$.
v	=	Velocidad del fluido $\left[\frac{m}{s}\right]$.
A	=	Área de la sección [m^2].
D	=	Diámetro de la tubería [m].
N_R	=	Número de Reynolds [adimensional].
ρ	=	Densidad del fluido $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$.
η	=	Viscosidad dinámica $\left[\frac{kg}{m \cdot s}\right]$.
h_{Lp}	=	Pérdida primaria de energía [m].
f	=	Factor de fricción [adimensional].
ε	=	Rugosidad según el tipo de material [mm].
l	=	Longitud de la corriente de flujo [m].
g	=	Gravedad = $9.81 \left[\frac{m}{s^2}\right]$.
v_r	=	Velocidad real del fluido $\left[\frac{m}{s}\right]$.
d_i	=	Diámetro interno de la tubería [m].
h_{Ls}	=	Pérdidas secundarias [m].
K	=	Coefficiente de resistencia [adimensional].
P_1	=	Presión en la entrada del sistema [Pa].
P_2	=	Presión en la salida del sistema [Pa].
γ	=	Peso específico del fluido $\left[\frac{KN}{m^3}\right]$.
v_1	=	Velocidad en la entrada del sistema $\left[\frac{m}{s}\right]$.
v_2	=	Velocidad en la salida del sistema $\left[\frac{m}{s}\right]$.
z_1	=	Altura inicial [m].
z_2	=	Altura final [m].

$h_A =$	Energía que se agrega al fluido con un dispositivo mecánico; es frecuente que se le denomine carga total sobre la bomba o carga hidrostática del sistema [m].
$h_R =$	Energía que se remueve del fluido por medio de un dispositivo mecánico como un motor de fluido [m].
$h_L =$	Pérdidas de energía del sistema por fricción y accesorios [m].
$P_B =$	Potencia de la bomba [kW].
$\gamma =$	Peso específico del fluido $\left[\frac{kN}{m^3}\right]$.
$Q_{total} =$	Caudal total del sistema [m^3].
$T_{amb} =$	Temperatura ambiente [$^{\circ}C$]
$CE_{bomba} =$	Consumo energético de la bomba [Wh ; kWh].
$P_{bomba} =$	Potencia de la bomba [W ; kW].
$T_{bomba} =$	Tiempo de funcionamiento de la bomba [h].
$CE_{monitor} =$	Consumo energético del dispositivo de monitoreo [Wh ; kWh].
$P_{monitor} =$	Potencia del dispositivo de monitoreo [W ; kW].
$T_{monitor} =$	Tiempo de funcionamiento del dispositivo de monitoreo [h].
$CE_{Total} =$	Consumo energético total [Wh ; kWh].
$Costo_{ener} =$	Costo de energía total [USD].
$Tarifa =$	Tarifa energética por $1kWh$ $\left[\frac{USD}{kWh}\right]$.
$r =$	Radio de la tubería [m].
$V_{tramo} =$	Volumen del tramo (1; 2; 3; 4; 5) de la base del cultivo [m^3].
$V_{codo90} =$	Volumen del codo de 90° [m^3].
$h =$	Altura de la tubería de cada tramo (2; 3; 4; 5) [m].
$V_{TOTAL} =$	Volumen total de la base del cultivo [m^3 ; L].
$T_{plántula} =$	Tiempo de riego de la etapa de plántula [min ; h]
$T_{vegetativo} =$	Tiempo de riego de la etapa vegetativa de la planta [min ; h]
$T_{madurez} =$	Tiempo de riego de la etapa de madurez de la planta [min ; h]
$T_{encendido} =$	Tiempo de encendido de la bomba [min ; h].
$días_{etapa} =$	Días de duración de la etapa.

1. Título

Diseño y construcción de un prototipo hidropónico para el cultivo de hortalizas aplicable en cultivos urbanos.

2. Resumen

El presente Trabajo de Titulación permite conocer las técnicas hidropónicas, materiales y dispositivos que intervienen en el diseño y construcción de un prototipo aeropónico aplicable en espacios urbanos para el cultivo de hortalizas, con la finalidad de ofrecer una solución sostenible y eficiente para los desafíos actuales que enfrenta la agricultura y la sociedad debido al incremento poblacional y escasos recursos que se utilizan tradicionalmente para obtener alimentos; presentando varias ventajas como: alta producción, ciclo de cultivo corto, disminución de enfermedades y plagas de los cultivos y máxima eficiencia en el uso de recursos, todo esto en espacios limitados como balcones, terrazas y áreas urbanas en general. Mediante una metodología analítica de las diferentes técnicas hidropónicas y modelos de prototipos se seleccionó las técnicas más adecuadas a las necesidades de esta investigación, considerando la adaptabilidad, eficiencia, facilidad de mantenimiento y disponibilidad de materiales en el mercado, con esto se inició el diseño, construcción e implementación del prototipo. Para la distribución de la solución nutritiva se efectuaron cálculos para la selección de las tuberías y bomba centrífuga; en el control de las variables de la solución como: nivel de pH, conductividad eléctrica (EC) y temperatura se instaló un monitor de parámetros para un control total de la calidad del agua. Para la validación del prototipo se realizó una comparación de productividad y el análisis del consumo hídrico entre el método de cultivo tradicional y la técnica seleccionada, obteniendo que el método de cultivo hidropónico representa un 89,3% de efectividad en la producción y un 93% de mayor ahorro de consumo del agua; concluyendo así que la implementación de la hidroponía es una solución innovadora y eficiente para los cultivos de ciclo corto.

Palabras clave: Aeroponía, cultivo de hortalizas, cultivos urbanos, cultivos hidropónicos

2.1 Abstract

The following thesis work aims to explore hydroponic techniques, materials, and devices involved in designing and constructing an aeroponic prototype applicable in urban spaces for vegetable cultivation, being its goal to offer a sustainable and efficient solution to the current challenges faced by agriculture and society due to population growth and scarcity of resources traditionally used in food production; showing several advantages like high production rates, short crop cycles, reduced crop diseases and pests, and maximum resource efficiency, all within limited spaces such as balconies, terraces, and urban areas in general. An analytical methodology was employed to evaluate various hydroponic techniques and prototype models, leading to the selection of the most suitable techniques for this research based on adaptability, efficiency, ease of maintenance, and material availability in the market. Subsequently, the design, construction, and implementation of the prototype began. For the nutrient solution distribution, calculations were made to select appropriate pipes and a centrifugal pump; to control variables such as pH level, electrical conductivity (EC), and temperature, a parameter monitor was installed for comprehensive water quality control. The prototype's validation involved a productivity comparison and a water consumption analysis between the traditional cultivation method and the selected technique, showing that hydroponic cultivation represents an 89.3% in production effectiveness and a 93% increase in water conservation; therefore, implementing hydroponics is an innovative and efficient solution for short-cycle crop cultivation.

***Keywords:** Aeroponics, vegetable cultivation, urban crops, hydroponic crops*

3. Introducción

En la actualidad, uno de los mayores desafíos que enfrenta la agricultura es la disminución de las zonas agrícolas debido a diversos factores como la contaminación, el cambio climático, el crecimiento de las zonas urbanas y la necesidad de producir alimentos saludables y orgánicos. Estos factores han llevado a una mayor demanda de soluciones alternativas para la producción de alimentos, los cultivos hidropónicos se presentan como una opción atractiva debido a su eficiencia y productividad (Beltrano & Gimenez, 2015).

En los cultivos hidropónicos, las plantas crecen en composiciones de nutrientes en lugar de suelo, lo que permite una mayor eficiencia en el uso de recursos y una mayor capacidad para controlar las condiciones de cultivo. Esto significa que los cultivos hidropónicos pueden producir más alimentos con menos agua, nutrientes y espacio en comparación con los métodos de cultivo convencionales. Existen varias investigaciones con respecto a los cultivos hidropónicos, donde principalmente se mencionan las ventajas de utilizar este método en comparación con los tradicionales en la agricultura, su eficiencia y productividad, sus beneficios y el impacto que han tenido en la sociedad; siendo así que López (2018) manifiesta que la hidroponía puede ser “implementada con tecnologías sencillas en zonas urbanas y suburbanas, en forma de huertos familiares, mejorando así las condiciones de vida, el nivel de ingresos y la alimentación de los pobladores en el área urbana y rural” (p. 140).

Por lo tanto, los cultivos hidropónicos ofrecen una solución sostenible y eficiente para los desafíos actuales que enfrenta la agricultura, con su capacidad para producir más alimentos con menos recursos y menos productos químicos. Así mismo, estos cultivos pueden ubicarse en espacios reducidos e interiores, lo que los hace ideales para la agricultura urbana, mejorando la calidad de vida de los habitantes (Beltrano & Gimenez, 2015). Además, tienen el potencial de mejorar la seguridad alimentaria y reducir la presión sobre las zonas agrícolas tradicionales favoreciendo al cuidado y preservación del Medio Ambiente.

En este proyecto se lleva a cabo el diseño y construcción de un prototipo hidropónico de cuatro ejes verticales para el cultivo de hortalizas, el mismo que se empleará en cultivos urbanos para la ciudad de Loja, ya que según la Ordenanza No. 034-2021 del Municipio de Loja la agricultura urbana contribuye mejorando el consumo de alimentos seguros y saludables para la ciudadanía, tiene un impacto positivo en el presupuesto familiar debido a que se realizan menos compras de alimentos y en algunos casos, la agricultura urbana genera nuevos empleos y dinamiza la economía local (Municipio de Loja, 2021).

El objetivo general de esta investigación es el de “Construir un prototipo hidropónico para cultivo de hortalizas aplicable en cultivos urbanos”.

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Analizar las diferentes técnicas hidropónicas aplicables en los cultivos urbanos.
- Diseñar y construir un prototipo hidropónico para cultivos urbanos.
- Validar el prototipo hidropónico con un caso práctico.

Por ende, la primera parte de este documento se centra en la revisión bibliográfica que abarca las generalidades de la hidroponía, técnicas de hidroponía, demanda de nutrientes de las plántulas, especies adecuadas para los cultivos hidropónicos, características y elementos de los cultivos hidropónicos, dimensionamiento, parámetros operacionales, fundamentos de diseño de un cultivo aeropónico y conceptos de los elementos que intervienen en la construcción del prototipo.

En la segunda parte se detalla el desarrollo del diseño y construcción del prototipo, el cual se enfoca en la selección de componentes hidráulicos y electrónicos del prototipo, los cálculos para el dimensionamiento de los equipos y materiales para la implementación. Así mismo se establece la técnica hidropónica a utilizarse y la propuesta de diseño, se detalla la construcción del prototipo basado en la técnica aeropónica y se valida su funcionamiento.

En la tercera parte se presenta la discusión sobre la técnica seleccionada, diseño y eficiencia del prototipo construido, además las conclusiones y recomendaciones. Por último, se tiene los anexos sobre el diseño y construcción del prototipo de cultivo hidropónico.

4. Marco teórico

4.1 Capítulo I: La Hidroponía

4.1.1 Concepto de hidroponía

La hidroponía, se define como la ciencia de cultivar plantas en soluciones minerales nutritivas, en ausencia de suelo, con el fin de obtener una mejor productividad y calidad de la cosecha en condiciones controladas (Resh, 2013). Es decir, la hidroponía es una técnica de cultivo de plantas que utiliza soluciones nutritivas en lugar de tierra para proporcionar a las plantas los nutrientes necesarios para su crecimiento y desarrollo.

Actualmente la hidroponía es un método de cultivo en expansión ya que ofrece una forma eficiente y sostenible de cultivar plantas en cualquier lugar y en cualquier época del año, además de la capacidad de plantar en espacios reducidos y con menor cantidad de recursos (Inca Sánchez, 2013).

4.1.1.1 Ventajas y desventajas de los cultivos hidropónicos.

Ventajas:

- Eficiencia en el uso de nutrientes y recursos.
- Mayor control de calidad del cultivo.
- Producen hasta cinco veces más por metro cuadrado de siembra.
- Disminuyen el tiempo de cultivo, lo que permite tener más cosechas al año.
- Bajo costo en el control de plagas y muy bajo nivel de contaminación con pesticidas.
- Cultivos libres de contaminación.
- Reducción de costo de producción.
- Independencia de los fenómenos meteorológicos.
- Ausencia en el control de malezas.
- Se puede utilizar cualquier espacio para cultivar.
- Mayor limpieza e higiene en los productos obtenidos.
- Los productos obtenidos son orgánicos.

Desventajas:

- Costo inicial muy elevado.
- Control continuo y regulación de las propiedades del agua.
- Conocimiento técnico para el manejo adecuado del cultivo (fisiología vegetal).
- Mayor precaución con las cantidades de solución nutritiva, ya que las plántulas son más sensibles a cambios o desbalance de alimentación.

(Beltrano & Gimenez, 2015; Meza A., 2018; Valenzuela N. et al., 2019)

4.1.1.2 La hidroponía en el mundo.

La hidroponía es una técnica que, a partir de 1950, se extendió por todo el mundo, contribuyendo especialmente en ampliar el cultivo de plantas donde la agricultura tradicional era difícil de ejecutar. Algunos de los países donde existían mayores plantaciones con el uso de la hidroponía son: Japón, Holanda, Alemania, España, Italia, Rusia, entre otros. Además, en los países del primer mundo esta técnica es una de las más empleadas para el cultivo de plantas por sus ventajas frente a los métodos tradicionales y en Europa son más aceptados los productos cultivados por hidroponía por ser 100 % orgánicos (Beltrano & Gimenez, 2015).

Así mismo, en Estados Unidos, especialmente en Ohio, California, Arizona, Missouri y Florida, existen cultivos hidropónicos comerciales que producen extensas cantidades de alimentos; varios estudios señalan que existen más de un millón de dispositivos hidropónicos domésticos en Estados Unidos (Beltrano & Gimenez, 2015). En New York, existe una granja urbana que utiliza la agricultura vertical, conformada por diez contenedores llenos de dispositivos tecnológicos, los cuales controlan las condiciones climáticas, donde crecen las plantas, para obtener productos con determinadas características. Por ejemplo, en el caso de la albahaca, se conoce que la mejor viene de Génova, por lo que esta empresa cultiva las semillas provenientes de esta ciudad y recrea las condiciones específicas en las que crece normalmente como: las horas de luz, la humedad, los niveles de CO₂, condiciones climáticas, etc., todo esto se realiza en cultivos hidropónicos (Hotten, 2019).

Por otro lado, en Japón, la empresa “Mirai Group” es pionera en el uso de cultivos hidropónicos dado que se considera que cosechan alrededor de 10 000 lechugas al día y con esto afirman que la productividad es cien veces mayor comparado con las técnicas tradicionales (Kamata, 2019).

En México, el crecimiento anual de la horticultura protegida, que es un sistema de producción que modifica el ambiente natural donde se desarrollan los cultivos para obtener un crecimiento óptimo y un alto rendimiento, es de 15 % a 20 % (Castellanos, 2009).

4.1.1.3 La hidroponía en el Ecuador.

En el Ecuador, el Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP) promueve el uso de cultivos hidropónicos capacitando y proporcionando información técnica para su producción, con la finalidad mejorar el desarrollo económico de las familias y la obtención de hortalizas en lugares poco convencionales y durante todo el año (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2019).

De igual manera, el Ministerio del Ambiente y Agua conjuntamente con el proyecto AICCA (Adaptación a los Impactos de Cambio Climático en recursos hídricos en los Andes)

implementan dos sistemas para cultivos hidropónicos en la subcuenca del río Machángara, en las parroquias Chiquintad y Sinincay, en la provincia de Azuay; con este proyecto se busca mejorar la economía, seguridad alimentaria y producción de cultivos de la zona, ya que las amenazas climáticas, lluvias intensas y sequía producen cultivos sensibles, disminución de producción y pérdidas económicas (Ministerio de Ambiente y Agua, 2020).

Además, en varias ciudades del Ecuador existen empresas que cultivan hortalizas a gran escala, tal es el caso de Green Lab, ubicada en San Vicente en la provincia de Manabí, donde cultivan 30 toneladas de lechugas al mes y con un total de USD 30 000 en ventas mensuales, comercializando su producto en supermercados como Corporación Favorita y Mi Comisariato (Green Lab, 2020). Otro ejemplo es la empresa “La Comarca”, empresa ubicada en Pichincha, donde al mes producen 70 000 lechugas, distribuyendo el producto en Pichincha, Guayas y Azuay. Asimismo, “La Parcela”, la cual produce alrededor de 15 000 kilogramos de lechugas, que debido a su calidad distribuyen a la cadena de supermercados Supermaxi, obtienen cerca de USD 3 000 a la semana por este producto (Revista Líderes, 2020). Por otro lado, pequeños productores utilizan los cultivos hidropónicos para obtener alimentos más saludables, sin contaminantes y de alta calidad para comercializarlos en el mercado local. Los sistemas implementados, en su mayoría, utilizan la técnica NFT y aeroponía, así como tubos PVC, bombas para impulsar el líquido nutritivo y tanques colectores para almacenar el agua; gran parte de estos cultivos no cuentan con equipos automatizados, ya que existe un desconocimiento de las técnicas y materiales para medición y control de pH y conductividad eléctrica, por esta razón la revisión de estos parámetros se realiza de forma manual lo que ocasiona sustancias nutritivas de manera desproporcionada desaprovechando todo las propiedades de la solución (Valles F., 2020).

4.1.1.4 La hidroponía en cultivos urbanos.

La hidroponía se ha convertido en una técnica de cultivo cada vez más popular en los entornos urbanos, ya que permite a los productores cultivar plantas en un espacio reducido y con un consumo de agua mucho menor que en los cultivos tradicionales. Además, esta técnica permite un mayor control sobre las condiciones ambientales y los nutrientes suministrados a las plantas, lo que resulta en una producción más eficiente, sostenible y mejora el ambiente urbano.

Un estudio realizado por Gómez Castro et al. (2020) en México analizó la eficiencia del cultivo hidropónico en un ambiente urbano. Los resultados mostraron que la hidroponía permitió una producción de lechuga y cilantro 2,5 veces mayor por metro cuadrado en comparación con los cultivos tradicionales. Además, se encontró que el consumo de agua en la

hidroponía fue un 60 % menor en comparación con los sistemas de riego por gravedad, lo que sugiere que la hidroponía es una opción más sostenible para la producción de alimentos en entornos urbanos.

Asimismo, en Colombia, Marulanda (2007), manifiesta que el rendimiento de los cultivos urbanos por hidroponía, comparados con los métodos convencionales, son bastante superiores; por ejemplo: en hortalizas se logra una rentabilidad anual de hasta 113 % (citado por Gómez R., 2014, p. 42).

Otro estudio realizado por Roosta et al. (2021) en Irán examinó la producción de tomates en sistemas hidropónicos en un ambiente urbano. Los resultados mostraron que el cultivo hidropónico produjo un mayor rendimiento y una mayor calidad en comparación con los cultivos convencionales. Además, se encontró que la hidroponía permitió un control más preciso de los nutrientes y las condiciones ambientales, lo que resultó en una producción más eficiente y sostenible en un ambiente urbano.

Además, la hidroponía dentro de los hogares, se encuentra en auge ya que se conoce que la producción por área es mayor, más limpia y sana, se reduce el tiempo de producción y su calidad es superior (Bazan et al., 2021).

4.1.1.5 Técnicas de hidroponía.

Existen diferentes tipos de sistemas hidropónicos, que se diferencian en la forma en que se suministra la solución nutritiva a las plantas y en la estructura del medio de cultivo utilizado.

A continuación, se presentan algunos de las técnicas hidropónicas más comunes:

- **Hidroponía en solución nutritiva o estacionaria.**

También conocido como cultivo en solución líquida, es el tipo de hidroponía más simple y económico. La solución nutritiva es una mezcla de agua con nutrientes minerales en cantidades y proporciones adecuadas para que las plantas cubran sus necesidades de crecimiento y desarrollo. Las plantas se cultivan en recipientes que contienen una solución nutritiva que se suministra continuamente, como se observa en la **Figura 1**. Este tipo de cultivo hidropónico es adecuado para una amplia variedad de plantas, desde hortalizas hasta frutas y flores (Inca Sánchez, 2013)

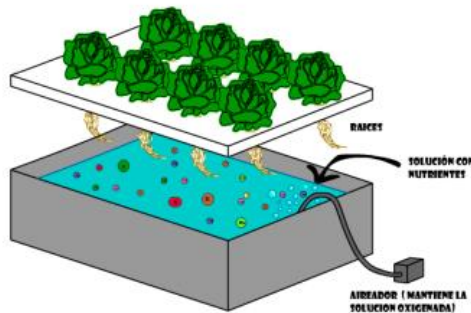


Figura 1. Cultivo en solución nutritiva
Fuente: (Smithers Oasis, 2015)

- **Hidroponía NFT (Nutrient Film Technique-Técnica de película de nutrientes).**

El método hidropónico NFT (Nutrient Film Technique) es la técnica de la solución nutritiva recirculante, la cual fluye por caños o tuberías, en el cual se colocan las raíces de las plantas. El agua fluye continuamente, de manera que las raíces están constantemente sumergidas en nutrientes, oxígeno y agua, como se observa en la **Figura 2**. Esta técnica se utiliza principalmente para la producción de hortalizas de alta calidad y de raíces pequeñas, como hierbas y lechugas (Inca Sánchez, 2013).

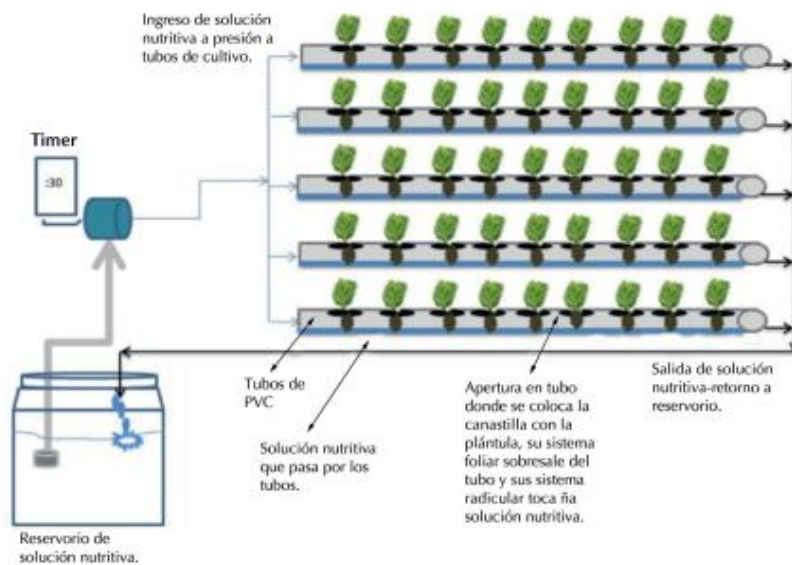


Figura 2. Cultivo hidropónico NFT
Fuente: (Brenes Peralta & Jimenez Morales, 2014)

- **Hidroponía de flujo y reflujo.**

Esta técnica implica inundar el estrato de cultivo con solución nutritiva y luego drenarla para permitir que las raíces de la planta se oxigenen, según se muestra en la **Figura 3**. Esta técnica es popular para cultivar plantas de tamaño pequeño a mediano (Resh, 2013).

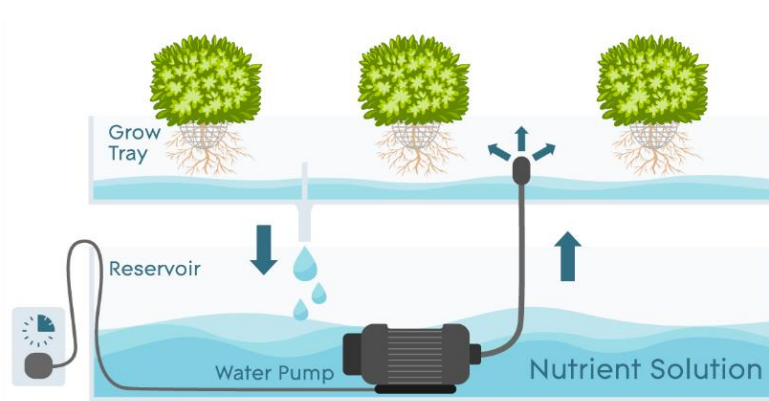


Figura 3. Técnica del flujo y reflujo.
Fuente: (AGrowTronics, 2020)

- **Hidroponía aeropónica.**

En este método, las raíces de las plantas se suspenden en el aire, en una cámara cerrada, y se rocían periódicamente con una niebla nutritiva en lugar de una solución nutritiva, como se expone en la **Figura 4**. Este tipo de cultivo hidropónico permite un mayor control del ambiente y una mayor eficiencia en el uso del agua (Resh, 2013).

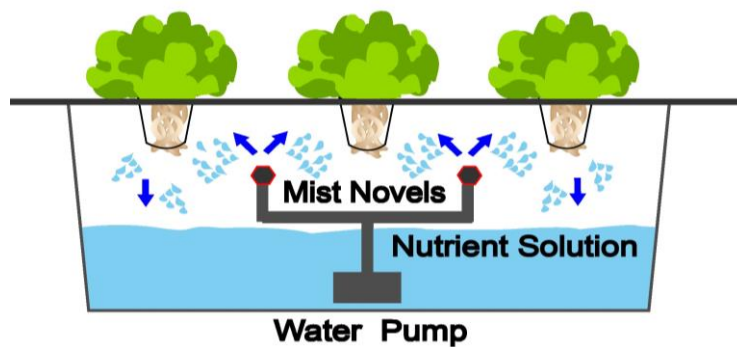


Figura 4. Cultivo aeropónico
Fuente: (NoSoilSolutions, 2019)

- **Hidroponía por goteo.**

Este sistema consiste en bombear la solución nutritiva en cantidades exactas requeridas por las plántulas, puede utilizarse con o sin sustrato, como indica la **Figura 5**. Se optimiza el uso de recursos energéticos, el consumo de agua y puede implementarse tanto en cultivos hidropónicos como en cultivos tradicionales (Castrillón & Duque, 2019).

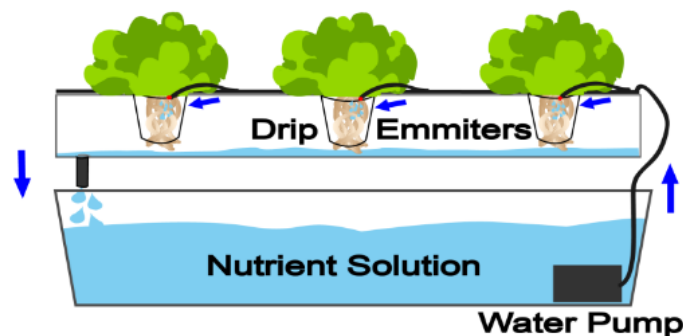


Figura 5. Cultivo por goteo.
Fuente: (NoSoilSolutions, 2019)

En la **Tabla 1**, se presenta una comparación de las técnicas de hidroponía donde se establece las ventajas y desventajas de cada técnica.

Tabla 1. Comparación de las técnicas hidropónicas.

Técnica Hidropónica	Ventajas	Desventajas
Técnica solución nutritiva estacionaria	Acumulación mínima de sales. Bajo costo. Cultivar en condiciones ambientales limitantes.	Absorción de nutrientes muy lenta. Cuidados especiales y atenciones particulares. Limitación de cultivos.
Técnica de flujo y reflujo	Facilita el tiempo de cosecha. Crecimiento mucho más rápido de las plántulas.	Gastos de instalación altos. Necesita luz natural para el crecimiento.
Técnica NFT	Mayor número de cosechas en menor tiempo. Uniformidad en la cosecha.	Gastos de instalación altos. Suministro de agua constante Requiere mayor control y conocimiento.
Técnica aeropónica	Mayor tipo de cultivos. Menor uso de agua y más rendimiento. Conveniente en áreas urbanas.	Infraestructura elaborada. Plántulas más sensibles a cambios de pH y nutrición.

Fuente: (Albuja et al., 2021; Castrillón & Duque, 2019)

4.1.1.6 Fases de un cultivo hidropónico.

En general, se pueden distinguir seis fases en un cultivo hidropónico:

1. Preparación del sistema: En esta fase se prepara el sistema de cultivo hidropónico, donde se incluye la instalación de las tuberías o recipientes donde se cultivarán las plantas, la selección del sustrato a utilizarse y la instalación de los dispositivos de control y suministro de nutrientes y agua.

2. Siembra o trasplante: En esta fase se siembran las semillas o plántulas en el sustrato o lugar de cultivo. Es importante asegurarse de que las semillas o plántulas tengan las condiciones adecuadas de humedad y temperatura para su germinación y crecimiento adecuado.

3. Fase vegetativa: En esta fase las plantas se desarrollan y crecen. Es necesario controlar la temperatura, la humedad y la cantidad de nutrientes y agua que se suministran a las plantas para que se desarrollen de manera apropiada.

4. *Fase de floración:* Esta fase es propia de las plantas que producen flores o frutos. En esta etapa se debe prestar atención a los nutrientes y al control del fotoperíodo para favorecer la floración y la producción de frutos.

5. *Cosecha:* En esta fase se realiza la cosecha de los cultivos hidropónicos, la cual debe hacerse en el momento adecuado para garantizar la calidad y el sabor de los productos.

6. *Mantenimiento del sistema:* Finalmente, en esta fase se realiza el mantenimiento del sistema, incluyendo la limpieza y desinfección de los recipientes y dispositivos, el control de plagas y enfermedades, y la reposición de nutrientes y agua según sea necesario.

Cabe destacar que la duración y características de cada fase pueden variar dependiendo del tipo de cultivo hidropónico y las condiciones ambientales en las que se desarrolle (Bazan et al., 2021; Cuasapaz, 2021; De la Rosa T. & Herrera V., 2015; Smithers Oasis, 2015).

4.1.1.7 Especies adecuadas para los cultivos hidropónicos.

Existen numerosas especies de plantas que se adaptan bien a los cultivos hidropónicos, incluyendo hortalizas, hierbas y plantas ornamentales. La elección de las especies adecuadas para los cultivos hidropónicos depende de varios factores, como las condiciones ambientales, la disponibilidad de luz y nutrientes, y la capacidad del sistema para soportar el peso y el tamaño de las plantas (Resh, 2013).

Las plantas para cultivar en hidroponía, en su mayoría, son de uso alimenticio u ornamental, debido a su alto valor comercial por su apariencia, tamaño y la calidad de frutos y flores. Entre las hortalizas más populares para estos cultivos se encuentran la lechuga, acelga, espinaca, berro, cebollín, tomate, pimiento, pepino, sandía, melón, berenjena, brócoli, coliflor entre otros; estas plantas son adecuadas para los sistemas hidropónicos debido a su ciclo de vida corto, la capacidad de adaptarse a diferentes condiciones ambientales y la producción de una alta cantidad de frutos por unidad de superficie (Smithers Oasis, 2015).

Las especias aromáticas también son una buena opción para los cultivos hidropónicos, ya que son plantas de rápido crecimiento y no requieren grandes cantidades de nutrientes. Algunos autores como Smithers Oasis (2015) señalan que las especias como el cilantro, menta, perejil, albahaca y el tomillo son adecuadas para los sistemas hidropónicos debido a su alta demanda en el mercado y la facilidad de cultivo en espacios reducidos.

Las plantas ornamentales, como las flores y las plantas de interior, también se pueden cultivar con éxito en sistemas hidropónicos. Las plantas ornamentales como las orquídeas, las rosas, anturios, los lirios y los helechos son adecuadas para los cultivos hidropónicos debido a su capacidad para adaptarse a diferentes niveles de luz y humedad (Smithers Oasis, 2015).

4.1.2 Nutrición de las plantas en hidroponía

Los nutrientes que necesitan las plantas cultivadas en hidroponía son suministrados a través de soluciones nutritivas, las cuales se pueden conseguir en el mercado agrícola o prepararse por los cultivadores (Marulanda, 2003). Así mismo, FAO (1996) menciona que, la formulación y control, conjuntamente con los elementos minerales de las soluciones nutritivas, establecen el éxito de un cultivo hidropónico (citado por Cevallos M., 2020, p.18).

La solución nutritiva está compuesta por sales minerales disueltas en agua. Esta solución, debe ser balanceada y equilibrada, se formula dependiendo de la especie vegetal, su etapa fenológica, calidad del agua y las condiciones ambientales que se posean (Smithers Oasis, 2015). Además, su composición debe contener todos los elementos necesarios en forma y cantidades adecuadas para que cumplan la función que realizan en el metabolismo de las plantas. La carencia de alguno de estos componentes esenciales ocasiona la aparición de anomalías en el crecimiento y desarrollo, que asimismo pueden contribuir a la muerte de la planta, es por esto que se vuelve indispensable realizar el control del pH y la conductividad eléctrica de la solución nutritiva (Beltrano & Gimenez, 2015).

4.1.2.1 Nutrientes esenciales para el desarrollo de las plantas.

Para que las plantas se desarrollen adecuadamente necesitan un conjunto de elementos esenciales, los cuales están contenidos en sales y en sustancias químicas compuestas.

Estos nutrientes se clasifican en dos grupos:

- **Nutrientes principales:** Conocidos también como macronutrientes, los cuales son requeridos en mayor cantidad por las plantas y son: el Nitrógeno (N), Fósforo (P), Potasio (K), Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Azufre (S).
- **Nutrientes menores:** También reciben el nombre de micronutrientes, requeridos en menor cantidad, son: el Cloro (Cl), Hierro (Fe), Sodio (Na), Cobre (Cu), Manganeso (Mn), Boro (B), Zinc (Zn), Silicio (Si), Níquel (Ni) y Molibdeno (Mo).

Cada uno de estos componentes cumple una o varias funciones en el proceso de crecimiento de las plantas y su carencia o exceso afectan a la estructura y desarrollo de las mismas (Meza A., 2018).

4.1.2.2 Composición de una solución nutritiva.

Una solución nutritiva concentrada, para cultivos hidropónicos, se constituye de la combinación de una **solución concentrada A** y una **solución concentrada B**, cada una con elementos o nutrientes específicos. Marulanda (2003) afirma que, esta fórmula ha sido probada

con éxito en más de 30 especies de hortalizas, plantas medicinales y ornamentales en varios países de América Latina y el Caribe.

Existen varios trabajos de investigación que han generado propuestas de formulaciones de soluciones nutritivas, siendo similares en su concentración debido a que la mayoría de estas soluciones están basadas en el trabajo de Hoagland y Arnon (1950) (citado por Smithers Oasis, 2015, p.12).

Asimismo, Carrasco & Izquierdo, (2015) señalan que varios estudios preliminares han demostrado que no existirían diferencias en el rendimiento y calidad de un cultivo si se utilizan las soluciones propuestas por los autores Cooper, Wye y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura – Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Para el presente trabajo se optó por la composición de la solución nutritiva propuesta por la FAO, en la **Tabla 2**, se observa los elementos que interviene en la preparación de 10 L de solución A y 4 L de solución B.

Tabla 2. Solución nutritiva propuesta por la FAO.

Solución A		Solución B	
Fosfato de amonio	340 g	Sulfato de magnesio	492 g
Nitrato de calcio	2 080 g	Sulfato de cobre	0,48 g
Nitrato de potasio	1 100 g	Sulfato de manganeso	2,5 g
		Sulfato de zinc	1,2 g
		Ácido bórico	6,2 g
		Molibdato de amonio	0,02 g
		Nitrato de magnesio	920 cm ³
		Quelato hierro	8,5 g

Fuente: (FAO, 1990)

4.1.2.2.1 Aplicación de la solución nutritiva en un medio líquido.

Para las técnicas de cultivo hidropónico, se debe conocer la cantidad de agua o el volumen del depósito que se utilizará para el cultivo. Según (Marulanda, 2003) por cada litro de agua que contiene el depósito, se debe aplicar cinco centímetros cúbicos (cm³) de la solución concentrada A y dos centímetros cúbicos (cm³) de la solución concentrada B. Además, se debe tener en cuenta que las soluciones concentradas deben mezclarse una a una con agua, nunca sin la presencia de agua ya que perderán sus propiedades nutritivas y pasarán a ser sustancias tóxicas para el cultivo.

4.1.2.3 Frecuencia de riego.

En los cultivos, la frecuencia de riego depende de la especie a plantarse, etapa de crecimiento, intensidad de luz, temperaturas y tipo de medio (sustrato). Para los cultivos hidropónicos, el riego se realiza dependiendo de la técnica hidropónica usada, en el caso de la

aeroponía el riego se ejecuta directamente a la raíz, manteniendo así un nivel de humedad adecuado para la planta, favoreciendo su desarrollo y crecimiento (Marulanda, 2003).

Además, el riego debe ser controlado debido a que su deficiencia ocasiona deshidratación o marchitamiento de la planta, y el exceso provoca ahogamiento y producción de bacterias y hongos en las raíces (Montero U., 2016), es por esto que el riego se debe realizar en periodos necesarios, Novagric (2016) manifiesta que se puede programar según:

- Por tiempos, según el criterio del agricultor.
- Por volúmenes, medidos por un medidor de caudal.
- En base a sensores según el estado hídrico de la planta.
- Basado en datos meteorológicos proporcionados por una estación meteorológica.

Asimismo, algunos autores recomiendan de tres a ocho ciclos de riego para diversas hortalizas, entre ellas la lechuga, esto en base a experimentos realizados concluyendo así que, se puede dar tres ciclos para el periodo de plántula y hasta ocho ciclos para el periodo de cosecha dependiendo del clima y condiciones ambientales en las que se encuentre el cultivo (Liriano & Rodríguez, 2022; B. Oñate, 2022).

4.1.2.4 Factores que afectan la solución nutritiva.

Para que la solución nutritiva de resultados satisfactorios se deben controlar una serie de parámetros, lo que garantiza el éxito del cultivo hidropónico. Sin embargo, las condiciones más importantes a controlar son las siguientes:

- **Temperatura de la solución:** Este parámetro es importante para la mayoría de cultivos, debido a la relación con el crecimiento y, en algunos casos, absorción de nutrientes, siendo necesario mantener un rango de temperatura no menor a los 14 °C y no mayor a 30 °C.

Martínez et al. (2012) manifiesta que la temperatura de la solución nutritiva afecta el balance de oxígeno, en la **Tabla 3** se observa la relación entre ambos, donde si la temperatura aumenta, el oxígeno del agua disminuye, causando la reducción de permeabilidad en las raíces, déficit y muerte de microorganismos benéficos y aumentando la susceptibilidad a plagas en las plantas (citado por Ricardo, 2019, p.15).

Tabla 3. Relación entre Temperatura y oxígeno en solución nutritiva.

Temperatura (°C)	Oxígeno disuelto (mg/L)
10	11,3
15	10,1
20	9,1
25	8,3
30	7,6
35	7,0

Fuente: (Santos & Ríos, 2016)

Sin embargo, se debe considerar el tipo de cultivo para conocer el valor de temperatura adecuado, por ejemplo: la lechuga es considerada la especie más resistente a la falta de oxígeno y crece mejor a temperaturas de entre 13 °C a 20°C (Smithers Oasis, 2015).

- **pH:** El pH define la acidez o alcalinidad de la solución nutritiva, en hidroponía se recomiendan valores entre 5,5 y 6,5 (ácidos) que es el rango donde se encuentran disponibles todos los nutrientes esenciales, como se muestra en la **Figura 6** (Castrillón & Duque, 2019; Inca Sánchez, 2013; Valles F., 2020).

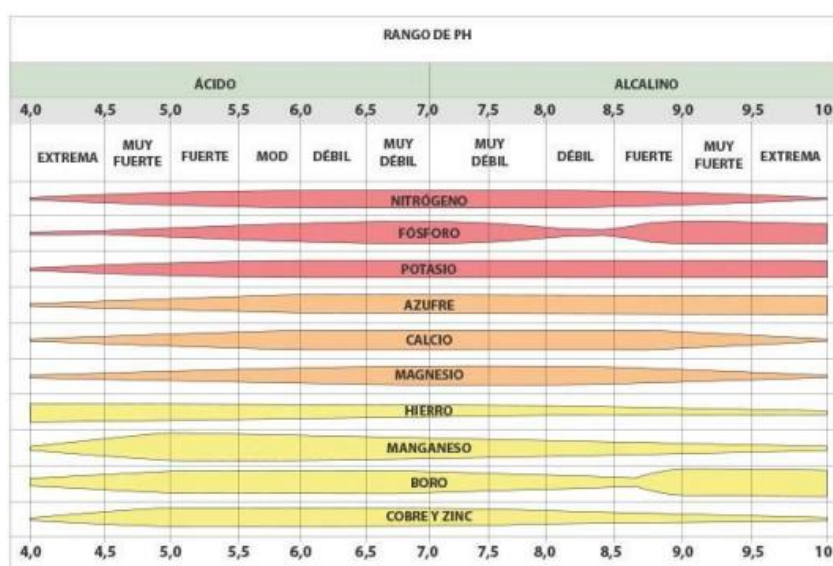


Figura 6. Rango de disponibilidad de nutrientes
Fuente: (Valles F., 2020)

De la misma manera, el valor del pH de la solución nutritiva depende de la variedad o especie del cultivo para garantizar el desarrollo adecuado de las plantas, en la **Tabla 4** se observan los niveles adecuados de pH según el tipo de cultivo.

Tabla 4. Nivel de pH recomendado según el tipo de cultivo.

Tipo de cultivo	pH recomendado	Escala de acidez y alcalinidad
Rosas	4,5 a 5,5	Moderadamente ácida
Tomate y lechuga	5,5 a 6,5	Ligeramente ácida
Apio	6,7 a 7,0	Neutra

Fuente: (Brenes Peralta & Jimenez Morales, 2014)

- **Conductividad eléctrica (EC):** La conductividad eléctrica (EC) indica la cantidad de sales de la solución nutritiva donde, a mayor EC mayor es el contenido de sales disueltas, las cuales se miden en milisiemes sobre centímetro (mS/cm) (Inca Sánchez, 2013). En la **Tabla**

5 se muestran los niveles de conductividad eléctrica óptima para la etapa de plántula, dependiendo del tipo de cultivo.

Tabla 5. Niveles de conductividad eléctrica de diferentes cultivos en su primera etapa.

Cultivo	Conductividad eléctrica (mS/cm)
Lechuga	1,3
Espinaca	2,0
Tomate	2,5
Frutilla	1,0
Apio	1,8

Fuente: (Inca Sánchez, 2013)

La EC varía dependiendo de la etapa en la que se encuentre el cultivo, en el caso de la lechuga en plántula el valor de EC deberá estar entre 1,2 a 1,8 mS/cm y para la etapa vegetativo reproductivo de entre 1,8 a 3 mS/cm (Valles F., 2020).

4.2 Capítulo II: Fundamentos para la construcción de un Cultivo Hidropónico

La construcción de un sistema de cultivo hidropónico requiere de diversos materiales y equipos para garantizar el éxito del proyecto. Según Bautista et al. (2017), algunos de los materiales necesarios son: contenedores para plantas (por ejemplo, canaletas de PVC), sistema de riego (por ejemplo, bombas y tuberías), solución nutritiva, medidores de pH y EC (conductividad eléctrica), entre otros, teniendo en cuenta que los materiales dependen del tipo de técnica hidropónica a implementarse.

Por otro lado, según García et al. (2020), los equipos necesarios para un cultivo hidropónico completo y automatizado, incluyen: sistema de iluminación (como lámparas LED), controladores de clima (por ejemplo, termostatos y humidificadores), filtros para agua, dosificadores de nutrientes y sensores de temperatura y humedad. Es importante elegir materiales y equipos de calidad para garantizar la durabilidad del sistema y evitar fallas que puedan afectar la producción de los cultivos.

4.2.1 Componentes de un sistema aeropónico

La técnica de aeroponía no requiere suelo para proporcionar los nutrientes necesarios para el crecimiento y desarrollo de las plantas ya que las raíces se encuentran suspendidas como se muestra en la **Figura 7**, y absorben los nutrientes directamente, por lo que los materiales más importantes que intervienen en la construcción se basan en la distribución de los nutrientes (Lakhari et al., 2018). A continuación, se describe cada uno de los componentes de un cultivo aeropónico:

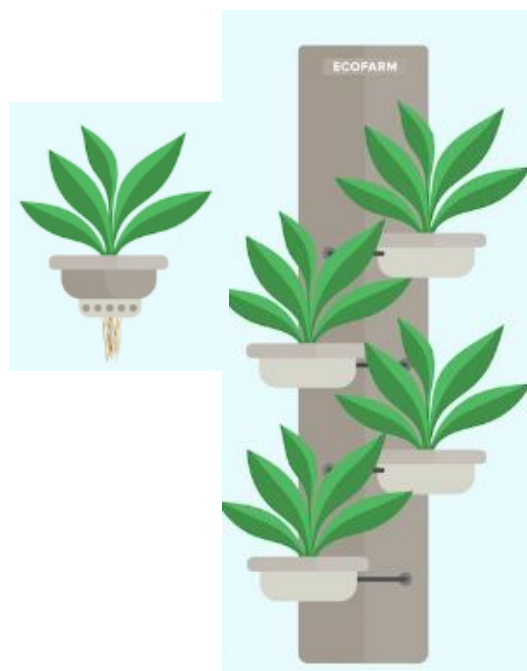


Figura 7. Cultivo aeropónico
Fuente: (PortalFruticola, 2018)

- **Depósito colector o estanque colector**

El estanque colector almacena la solución nutritiva durante el periodo de cultivo; existe un sinnúmero de tipos de contenedores que se pueden utilizar. Sin embargo, la elección debe ser en base a tipo de material, tamaño y aislación. El uso de estanques colectores de material de PVC o de fibra de vidrio, son los más recomendados por sus características.

Asimismo, se recomienda que el reservorio se encuentre cubierto con una tapa y bajo sombra, para evitar el calentamiento de la solución nutritiva y el desarrollo de algas, las cuales consumen oxígeno de la solución (Carrasco & Izquierdo, 2015).

El cálculo del volumen del reservorio se realiza bajo el criterio de L. Oñate, (2022), donde manifiesta que el estanque debe tener la capacidad suficiente para abastecer de solución nutritiva al cultivo en tiempos donde no se pueda realizar una recarga, se recomienda no superar 7 días (1 semana) (p.18). Además, se debe tener en consideración la demanda diaria aproximada de agua por planta (volumen aproximado de solución consumido) el cual depende del tipo de cultivo, en la **Tabla 6** se observa este criterio para una planta en su máximo estado de desarrollo, y la cantidad total de plantas a cultivar.

Tabla 6. Demanda diaria de solución nutritiva por especie.

Espece	Volumen aproximado de solución consumida (L planta/día)
Lechuga	0,3
Tomate	2,5
Pepino	3,0

Fuente: (Carrasco & Izquierdo, 2015)

Por lo tanto, la capacidad mínima del tanque se puede calcular aplicando la siguiente expresión:

$$C_{MT} = D_D \times N \times C \times K_S \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

C_{MT} : Capacidad mínima del depósito colector [L].

D_D : Demanda diaria de solución nutritiva por planta $\left[\frac{L}{día}\right]$.

N : Cantidad de periodos de autonomía [día].

C : Cantidad de total de plantas [adimensional].

K_S : Factor de seguridad por pérdidas [adimensional].

- **Aspersores**

Los aspersores se encargan de suministrar los nutrientes en forma de niebla o gotas en las raíces de las plantas para mantener la humedad de estas. Lakhiar et al., (2018) establecen

que la selección de las boquillas de aspersión y nebulizadores se basa en los requerimientos de los productores, no obstante, recomiendan usar boquillas de baja presión para plantaciones pequeñas debido a su bajo costo, facilidad de utilización y cantidad de atomización.

- **Temporizador**

Un temporizador, reloj controlador o timer es un dispositivo eléctrico que permite regular el encendido y apagado de otro dispositivo, programando intervalos de tiempo (horas, minutos y segundos) y días. Su funcionamiento se basa en abrir o cerrar un circuito eléctrico, después de un tiempo establecido y de forma automática (Efecto led, 2020). En el caso de los cultivos hidropónicos, los temporizadores, son usados para la automatización de los cultivos donde se controlan los ciclos de riego, es decir, el encendido y apagado de la bomba controlada por periodos (Gutierrez, 2018).

4.2.2 *Dispositivos de monitoreo de cultivos hidropónicos*

Los dispositivos de monitoreo son esenciales para garantizar un cultivo hidropónico exitoso, ya que permiten a los productores medir y controlar varios factores críticos, como la temperatura, la humedad, el pH y la concentración de nutrientes en el agua de riego. En este sentido, diversos estudios han investigado y desarrollado diferentes dispositivos de monitoreo específicos para cultivos hidropónicos.

4.2.2.1 Sensor de Temperatura y humedad.

Estos sensores son cruciales para el monitoreo del clima en los invernaderos hidropónicos, ya que permiten a los productores ajustar las condiciones ambientales para asegurar un crecimiento óptimo de las plantas (Chen et al., 2018).

4.2.2.2 Controlador de pH y EC.

El monitoreo y control del pH y la conductividad eléctrica (EC) de una solución nutritiva (agua de riego) es fundamental para el correcto desarrollo de las plantas del cultivo, ya que mantener los valores adecuados de estos parámetros permite que las plantas se alimenten mucho mejor, se desarrollen más rápido y absorban los nutrientes necesarios, debido a que al encontrarse con las raíces expuestas son más susceptibles a cambios bruscos de acidez o EC; siendo así que al utilizar un controlador de pH y EC permitirá monitorear estos parámetros con los valores reales de la solución nutritiva (Growlet, n.d.; Huerto Urbano Grow, n.d.).

4.2.2.3 El Internet de las cosas (IoT).

El internet de las cosas o IoT, por sus siglas en inglés, es todo sistema o red de dispositivos o elementos que posean sensores, software y otros componentes que permitan una conexión a internet, con el objetivo de intercambiar o recopilar datos en tiempo real y realizar una acción sin intervenir directamente el objeto con la acción humana (Oracle, 2021).

Además, el IoT permite conectar una serie de objetos cotidianos a internet con el fin de facilitar las acciones diarias de las personas, es posible conectar desde elementos domésticos simples como luminarias, aire acondicionado, interruptores, etc., hasta dispositivos médicos, industriales e incluso los sistemas de ciudades inteligentes (RED HAT, 2023).

El funcionamiento de los sistemas IoT consiste en la transmisión, recepción y análisis continua de datos en un ciclo de retroalimentación. Dependiendo de la tecnología utilizada, los datos pueden ser analizados de manera casi instantánea por humanos, sistemas de inteligencia artificial o aprendizaje automático (IA/ML), ya sea de manera inmediata o en un intervalo de tiempo determinado. En otros términos, el sistema IoT permitirá recopilar datos de manera inmediata para luego ser procesados por otro sistema, que bien puede ser una persona o software. Asimismo, el IoT puede realizar actividades como encendido o apagado de un elemento, aumentar o disminuir determinadas variables para cumplir una especificación, generar alarmas y soluciones para diversas actividades, entre otros, y todo será recopilado en informática de bajo costo, la nube, big data, analítica y tecnologías móviles (Oracle, 2021).

4.2.3 Sistema de bombeo

El sistema de bombeo de un cultivo hidropónico se basa en la selección de la bomba y la red de tuberías para el riego de las plantas, siendo este parámetro dependiente de la técnica hidropónica seleccionada.

- **Caudal recomendado**

El caudal (Q) es el volumen de fluido por unidad de tiempo que pasa a través de una sección transversal (Mott, 2015). A partir de la siguiente expresión, se obtiene el caudal.

$$Q = A \times v = \frac{\pi \times D^2}{4} \times v \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

Q : Caudal $\left[\frac{m^3}{s}\right]$.

v : Velocidad del fluido $\left[\frac{m}{s}\right]$.

A : Área de la sección $[m^2]$.

D : Diámetro de la tubería $[m]$.

En hidroponía, el flujo o caudal de la solución nutritiva debe ser adecuado para permitir que las raíces obtengan oxígeno, agua y nutrientes adecuados sin provocar estrés hídrico ni falta de nutrientes, es por esto que Carrasco et al., (2015) y Lecuona, (2013) recomiendan, a partir de estudios y experimentos, un flujo desde $1,25 \frac{L}{min}$ a $8 \frac{L}{min}$, con esto se asegura una

nutrición apropiada para el crecimiento y desarrollo de las plantas, ya que un caudal mayor conlleva a una absorción deficiente de nutrientes y puede ocasionar daños en las raíces, y un caudal demasiado lento puede limitar la cantidad de oxígeno disponible en la solución (Resh, 2013).

- **Velocidad circulación**

La velocidad de circulación es la rapidez con la que fluye la solución nutritiva a través de un sistema de riego o distribución, para proporcionar los nutrientes y oxígeno necesario para el cultivo. La velocidad que se requiere en la hidroponía varía según la técnica de cultivo y el tipo de planta (Resh, 2013).

Sin embargo, se debe considerar que la velocidad de circulación debe ser óptima para garantizar el suministro adecuado de los nutrientes y oxígeno, ya que una velocidad alta puede producir picos de presión significativos en los conductos y accesorios, desgaste y abrasión de las tuberías y un mayor consumo de energía debido a las pérdidas de presión.

Así mismo, una velocidad demasiado lenta puede ocasionar la acumulación de sedimentaciones en el interior de las tuberías; es por esto que Monge Redondo, (2019) recomienda una velocidad mínima de $0,5 \frac{m}{s}$ y una velocidad máxima de $1,5 \frac{m}{s}$ a $2 \frac{m}{s}$ en ramales de riego.

4.2.3.1 Red de distribución.

La solución nutritiva es distribuida a través de una red compuesta por tuberías, desde la bomba impulsora hacia la parte superior de los canales de cultivo (Cabezas, 2018).

- **Diámetro de tubería.**

Para el cálculo del diámetro de la tubería se considera que el caudal es el resultado de la velocidad de un fluido que pasa por una sección, es por esto que a partir de la **Ecuación 2**, se puede obtener la siguiente expresión y así, determinar el diámetro, entonces:

$$D = \sqrt{\frac{4 \times Q}{\pi \times v}}$$

Ecuación 3

Donde:

D : Diámetro [m].

Q : Caudal [$\frac{m^3}{s}$].

v : Velocidad del fluido [$\frac{m}{s}$].

- **Número de Reynolds.**

El Número de Reynolds es un número adimensional que determina el comportamiento de un fluido, es decir, si es laminar o turbulento, teniendo en cuenta cuatro variables que son: la densidad del fluido, viscosidad, diámetro del tubo y la velocidad promedio del flujo.

Para determinar el número de Reynolds se utiliza la siguiente expresión:

$$N_R = \frac{vD\rho}{\eta} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

v : Velocidad del fluido $\left[\frac{m}{s}\right]$.

D : Diámetro de la tubería $[m]$.

ρ : Densidad del fluido $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$.

η : Viscosidad dinámica $(Pa \cdot s) = \left[\frac{kg}{m \cdot s}\right]$.

Los valores de densidad (ρ) y viscosidad dinámica (η) del fluido dependen de la temperatura del fluido, en el **Anexo 1** se muestran las propiedades correspondientes del agua en unidades de acuerdo al Sistema Internacional.

4.2.3.2 Pérdidas primarias.

Las pérdidas primarias son las pérdidas de energía en el sistema que se originan por el contacto del fluido con la superficie de la tubería en secciones rectilíneas y largas. Estas pérdidas se determinan aplicando la ecuación de Darcy, cómo se expone en la siguiente expresión, (Mott, 2015):

$$h_{Lp} = f \times \frac{l}{D} \times \frac{v^2}{2g} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

h_{Lp} : Pérdida primaria de energía $[m]$.

f : Factor de fricción $[adimensional]$.

l : Longitud de la corriente de flujo $[m]$.

D : Diámetro de la tubería $[m]$.

v : Velocidad promedio $\left[\frac{m}{s}\right]$.

g : Gravedad = $9.81 \left[\frac{m}{s^2}\right]$.

Para el factor de fricción (f) se debe tener en cuenta el tipo de flujo, siendo laminar o turbulento, en el **Anexo 2** se muestran las ecuaciones necesarias para realizar el cálculo del factor de fricción.

- **Selección de la tubería.**

A partir de los cálculos del diámetro y pérdidas primarias se selecciona un diámetro comercial de la tubería, se selecciona el inmediato superior.

- **Velocidad real del fluido.**

Una vez determinado el diámetro comercial es necesario obtener la velocidad real del fluido a partir de la siguiente expresión:

$$v_r = \frac{Q}{A} = \frac{Q \times 4}{\pi \times d_i^2} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

v_r : Velocidad real del fluido $\left[\frac{m}{s}\right]$.

d_i : Diámetro interno de la tubería $[m]$.

4.2.3.3 Pérdidas secundarias.

Las pérdidas secundarias o pérdidas menores se producen en estrechamientos o expansiones, codos, válvulas y otros accesorios presentes en el sistema de tuberías; estas pérdidas se calculan empleando la siguiente expresión, (Mott, 2015):

$$h_{LS} = K \times \frac{v^2}{2g} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

h_{LS} : Pérdidas secundarias $[m]$.

K : Coeficiente de resistencia $[adimensional]$.

v : Velocidad promedio $\left[\frac{m}{s}\right]$.

g : Gravedad = $9.81 \left[\frac{m}{s^2}\right]$.

Se debe tener en cuenta que el coeficiente de resistencia (K) depende del tipo de accesorio (**Anexo 3**) y el valor final de h_{LS} es la sumatoria de las pérdidas de todos los accesorios, entonces se puede expresar por la siguiente expresión:

$$h_{LS} = \sum K \times \frac{v^2}{2g} \quad \text{Ecuación 8}$$

4.2.3.4 Pérdidas totales.

Es la suma de las pérdidas totales primarias y totales secundarias, da como resultado las pérdidas totales en el sistema y se calcula aplicando la siguiente expresión:

$$h_L = h_{Lp} + h_{LS} \quad \text{Ecuación 9}$$

4.2.3.5 Bomba centrífuga.

Una bomba es un elemento capaz de transformar la energía mecánica en energía hidráulica mediante impulsores o turbinas para aumentar la velocidad y presión de un líquido, su principal uso es impulsar fluidos a través de sistemas de tuberías (Mott, 2015).

El funcionamiento de una bomba centrífuga se basa en que el fluido ingresa por la boca de aspiración al eje del rotor o impulsor, como se observa en la **Figura 8**, con velocidad y presión del fluido, y sale por la boca de descarga con una velocidad y presión mayor a la de la entrada (Mataix, 2006).

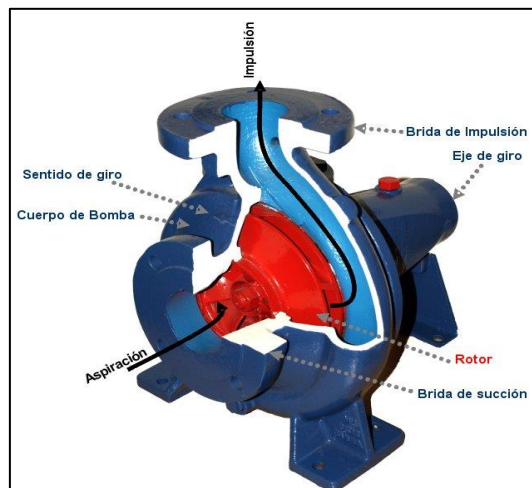


Figura 8. Bomba centrífuga
Fuente: (Fluideco, 2019)

4.2.3.5.1 Carga hidrostática del sistema.

En un sistema de flujo, las pérdidas y ganancias de energía, ocasionadas por dispositivos que retiren o agreguen energía al fluido, se contabilizan en términos de energía por unidad de peso del fluido que circula por el sistema. La ecuación general de la energía, dada por la expresión (10), permite calcular dichos parámetros de energía, donde es esencial que se escriba en dirección del fluido, es decir, desde el punto de referencia en el lado izquierdo hacia el lado derecho de la ecuación (Mott, 2015).

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + h_A - h_R - h_L = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

P_1 : Presión en la entrada del sistema [Pa].

P_2 : Presión en la salida del sistema [Pa].

γ : Peso específico del fluido $\left[\frac{KN}{m^3}\right]$.

v_1 : Velocidad en la entrada del sistema $\left[\frac{m}{s}\right]$.

v_2 : Velocidad en la salida del sistema $\left[\frac{m}{s}\right]$.

z_1 : Altura inicial $[m]$.

z_2 : Altura final $[m]$.

h_A : Energía que se agrega al fluido con un dispositivo mecánico; es frecuente que se le denomine carga total sobre la bomba o carga hidrostática del sistema $[m]$.

h_R : Energía que se remueve del fluido por medio de un dispositivo mecánico como un motor de fluido $[m]$.

h_L : Pérdidas de energía del sistema por fricción y accesorios $[m]$.

Para determinar la energía total que agrega la bomba al fluido o carga hidrostática del sistema se utiliza la siguiente expresión:

$$h_A = \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + \frac{(v_2^2 - v_1^2)}{2g} + (z_2 - z_1) + h_L \quad \text{Ecuación 11}$$

4.2.3.5.2 Selección de la bomba

La selección de la bomba puede determinarse mediante el cálculo de la potencia que demande el sistema, teniendo en cuenta la carga hidrostática del sistema (h_A) y el caudal necesario (Q), considerando así una bomba de prestaciones comerciales existente en el mercado y que cumpla con los requerimientos del sistema de riego.

- **Potencia de la bomba**

La potencia se define como la rapidez para realizar un trabajo, sin embargo, en mecánica de fluidos se manifiesta que “la potencia es la rapidez con que se transfiere la energía”. La potencia de una bomba se calcula mediante la energía transferida al fluido o carga hidrostática del sistema, el peso específico del fluido, y el caudal total, la potencia de la bomba se determina por la siguiente expresión (Mott, 2015).

$$P_B = h_A \times \gamma \times Q_{total} \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde:

P_B : Potencia de la bomba $[kW]$.

h_A : Carga hidrostática del sistema $[m]$.

γ : Peso específico del fluido $\left[\frac{kN}{m^3}\right]$.

Q_{total} : Caudal total del sistema $[m^3]$.

- Estudiante

5.2.3 Materiales

5.2.3.1 Materiales de construcción.

En la **Tabla 7** se detallan los materiales para la construcción del prototipo

Tabla 7. Materiales de construcción.

Cantidad	Descripción
3	Tubo sanitario PVC de 4 pulg (9m).
4	Codos de 90° de 4 pulg.
3	Uniones tipo “T” de 4 pulg.
1	Bifurcación tipo “Y” de 4 pulg.
5	Tapones tipo hembra de 4 pulg.
1	Tubo PVC de ½ pulg de (3m).
3	Uniones tipo “T” de ½ pulg.
4	Codos de 90° de ½ pulg.
5	Unión roscada de ½ pulg.
1	Caja de 16cm x 9.5cm x 7cm.

5.2.3.2 Materiales agrónomos.

En la **Tabla 8** se muestran los materiales agrónomos para el cultivo hidropónico

Tabla 8. Materiales agrónomos.

Cantidad	Descripción
150	Plántulas de lechuga.
144	Canastillas para hidroponía #5.5.
1	Solución concentrada A.
1	Solución concentrada B.
	Fibra de coco

5.3 Procedimiento

Para el desarrollo del trabajo de investigación se realiza una revisión de literatura técnica correspondiente a las generalidades de la hidroponía, debido a que el enfoque del proyecto es el cultivo y producción de hortalizas hidropónicas; se identifica las técnicas hidropónicas, materiales necesarios para su implementación, así como el dimensionamiento del sistema de bombeo y los factores que intervienen en el cultivo, todo esto aplicado a los cultivos urbanos con el fin de producir alimentos orgánicos de calidad que no se basen en el método tradicional, reducir el consumo hídrico y comprobar la posibilidad de cultivar en lugares poco convencionales y áreas reducidas.

5.3.1 Análisis de las técnicas hidropónicas

Para la ejecución del primer objetivo que es: “Analizar las diferentes técnicas hidropónicas aplicables en los cultivos urbanos”, se llevaron a cabo actividades de investigación y revisión bibliográfica de literatura técnica de las generalidades de la hidroponía, ventajas de cada una de las técnicas hidropónicas y los inconvenientes que presentan, en la **Figura 10** se muestra el procedimiento ejecutado.

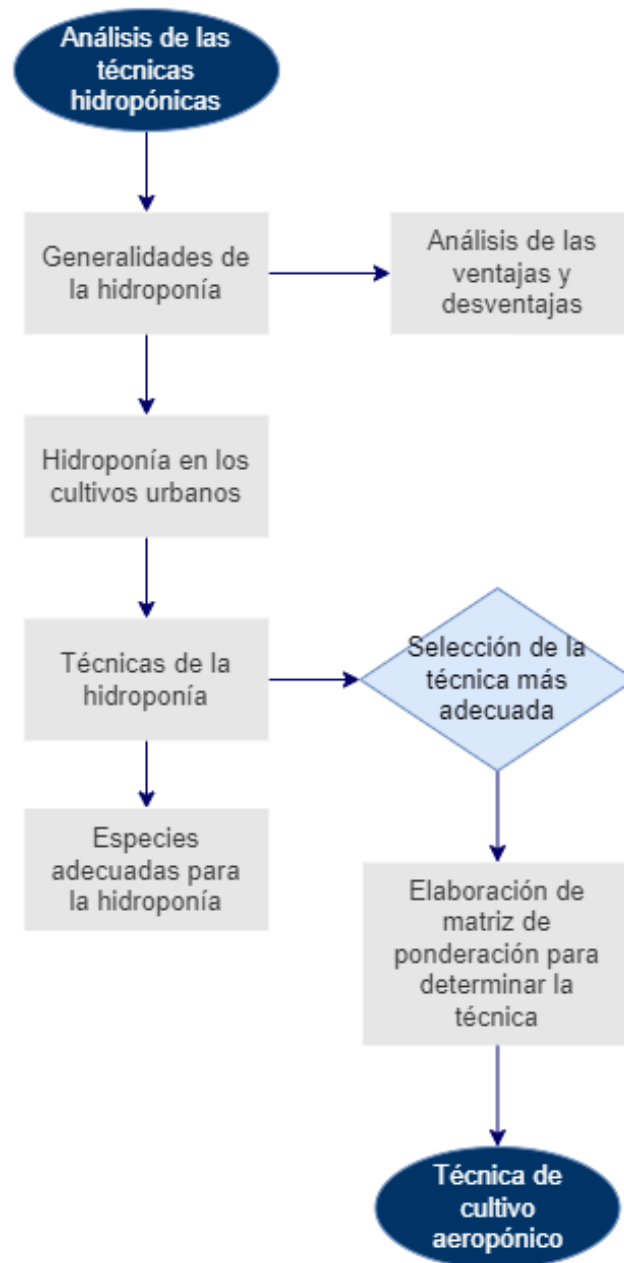


Figura 10. Metodología aplicada para el desarrollo del primer objetivo

5.3.2 Diseño y construcción del prototipo

Para el desarrollo del segundo objetivo: “Diseñar y construir un prototipo hidropónico para cultivos urbanos”, se utiliza las recomendaciones expuestas en la literatura técnica referente a la hidroponía, se identifica los materiales que pueden ser utilizados para la construcción de los cultivos, la determinación de la especie a plantarse y los fundamentos de nutrición de las plantas, ya que de esto depende la selección de la bomba, ciclos de riego y los equipos a utilizarse en el prototipo, en la **Figura 11**, se exponen las actividades previas al diseño y construcción del prototipo.

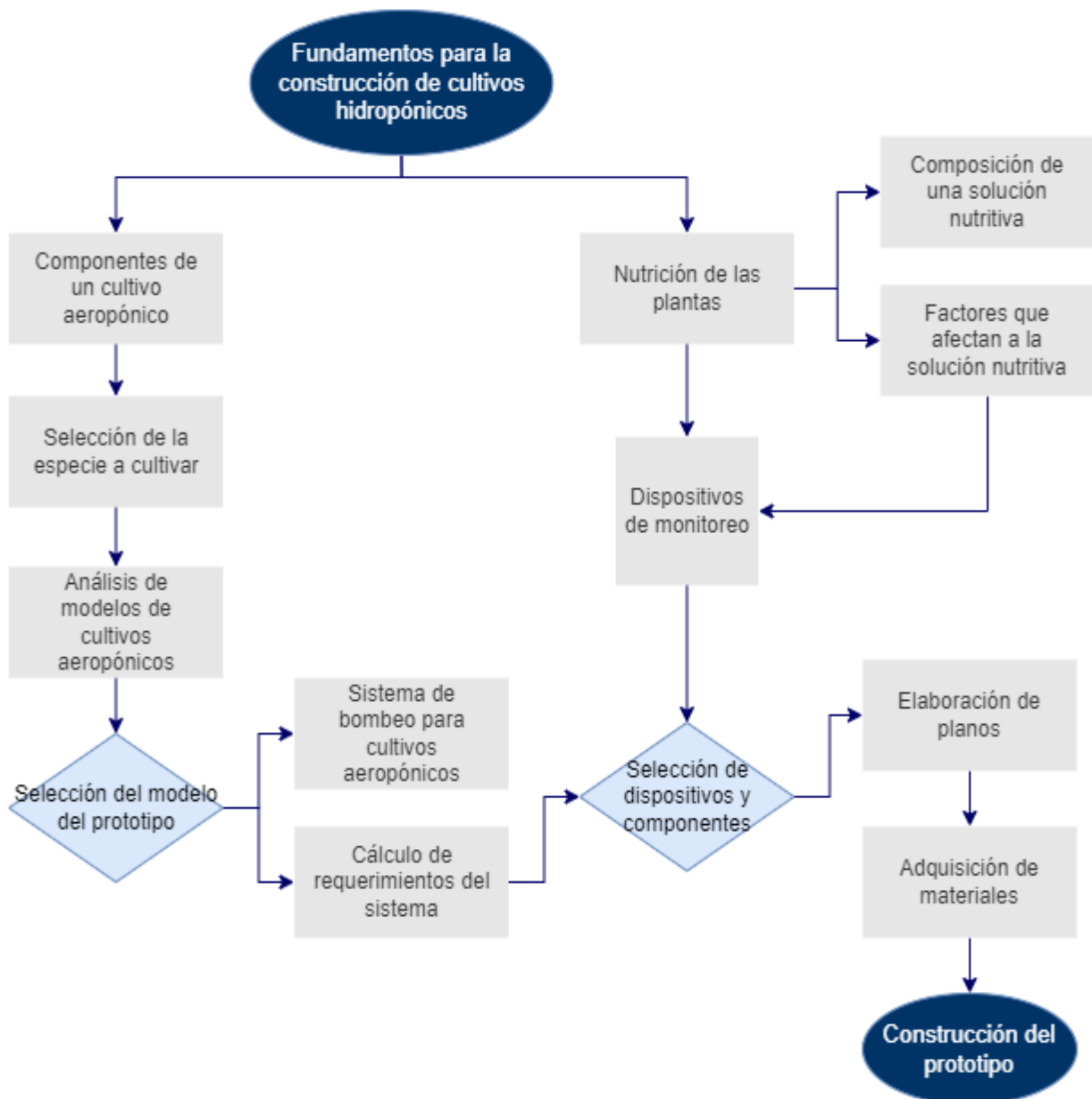


Figura 11. Metodología aplicada para el desarrollo del segundo objetivo

5.3.3 Validación del prototipo construido

Para cumplir el tercer objetivo de la investigación que es: “Validar el prototipo hidropónico con un caso práctico”, se dispone la metodología señalada en la **Figura 12**, donde se detalla las actividades ejecutadas para la demostración de viabilidad y aplicación del prototipo construido.

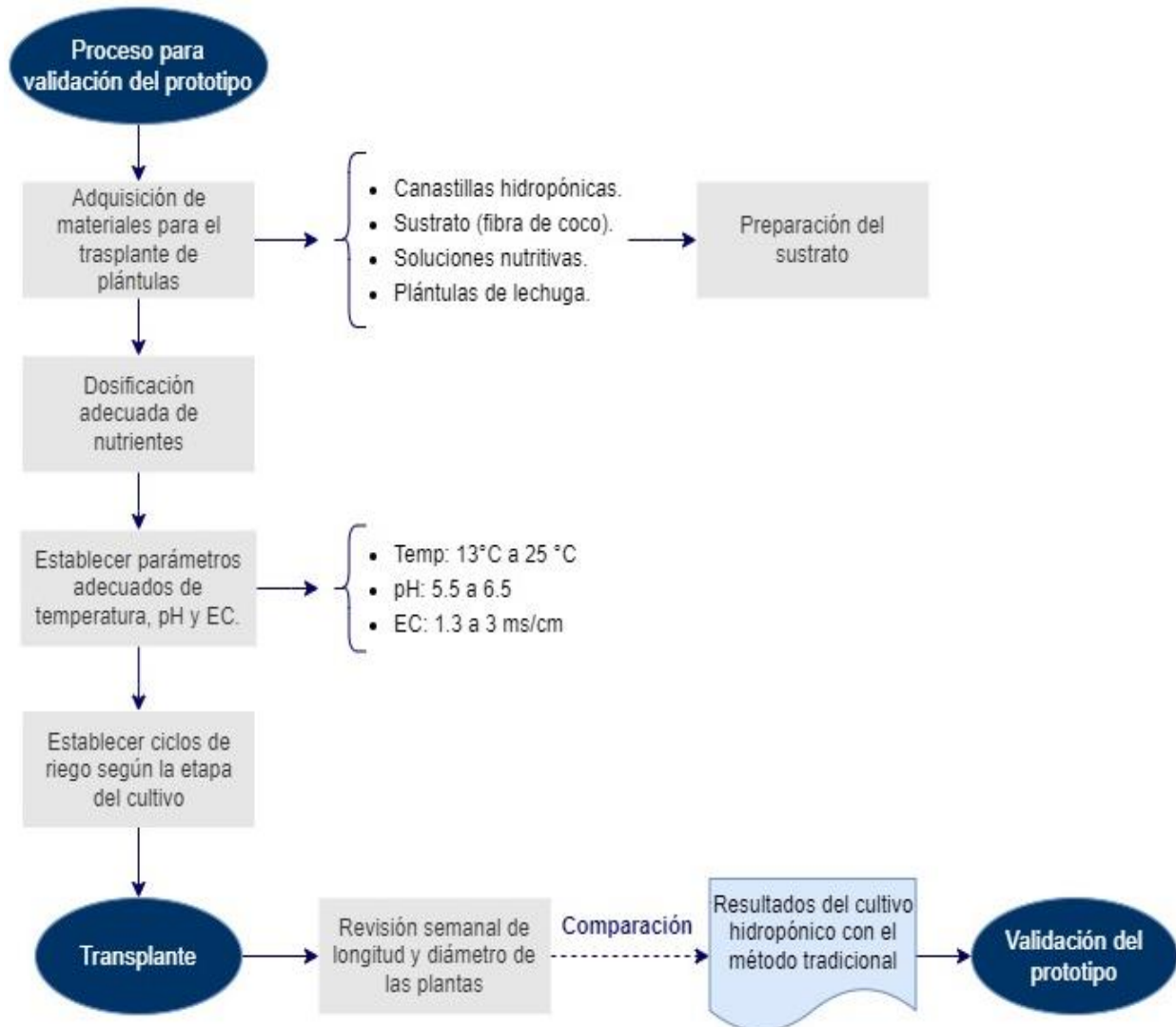


Figura 12. Metodología aplicada para el desarrollo del tercer objetivo

5.4 Procesamiento y análisis de datos

5.4.1 Determinación de la técnica hidropónica a implementarse

A partir de la **Tabla 1** en donde se muestra una comparación de las diferentes técnicas de hidroponía, estableciendo las ventajas y desventajas de cada una, se elabora una matriz de ponderación, valores que se exponen en la **Tabla 9**, en donde se detallan los criterios más significativos para determinar la opción más adecuada entre los diferentes tipos de cultivos hidropónicos implementados en la actualidad.

Tabla 9. Matriz de ponderación para definir la técnica hidropónica a implementarse.

Criterio	Peso del criterio	Estacionaria		Flujo y reflujo		NFT		Aeropónica	
		Valor	%	Valor	%	Valor	%	Valor	%
Adaptabilidad en espacios reducidos	15%	3	0,45	4	0,60	3	0,5	5	0,75
Vida útil	9%	4	0,36	3	0,27	3	0,3	4	0,36
Alta producción	12%	1	0,12	4	0,48	4	0,5	3	0,36
Facilidad de construcción	6%	2	0,12	5	0,30	1	0,1	3	0,18
Eficiencia en el uso de recursos	13%	1	0,13	2	0,26	3	0,4	5	0,65
Bajo costo	8%	4	0,32	1	0,08	1	0,1	2	0,16
Facilidad de uso	9%	3	0,27	4	0,36	2	0,2	3	0,27
Tipos de cultivos (especies)	13%	3	0,39	1	0,13	5	0,7	5	0,65
Abastecimiento de recursos	7%	2	0,14	3	0,21	2	0,1	4	0,28
Diseño estético y de calidad	8%	4	0,32	2	0,16	4	0,3	4	0,32
TOTAL	100%		2,62		2,85		3,02		3,98

Donde, el peso del criterio se refiere a la importancia que cada uno representa respecto al resto de criterios, y la valoración (valor) se rige según la **Tabla 10**:

Tabla 10. Valoración aplicada a la matriz de ponderación.

Muy bajo	Bajo	Medio	Bueno	Muy bueno
1	2	3	4	5

Los diez criterios establecidos (**Tabla 9**) para la determinación de la técnica hidropónica adecuada se basan en los requerimientos del prototipo de esta investigación, donde la adaptabilidad a espacios reducidos, la cual se refiere a ajustarse y funcionar de manera efectiva en entornos con limitaciones de espacio físico siendo estos las terrazas, balcones o interiores del área urbana; la eficiencia en el uso de recursos, tipos o variedad de cultivos que se puedan efectuar en el prototipo y una alta producción son los criterios más importantes al momento de establecer la técnica de hidroponía a ejecutarse.

5.4.2 Diseño, dimensionamiento y construcción del prototipo

5.4.2.1 Selección de especie a cultivar.

Las especies más populares para cultivar en hidroponía son las hortalizas de hoja como espinaca, lechuga, verduras, plantas ornamentales, hierbas aromáticas y algunas frutas; sin embargo, la lechuga es la especie que se cultiva con mayor facilidad debido a las altas producciones, su ciclo de cultivo son de 45 a 60 días, aproximadamente, desde la germinación hasta la cosecha (ciclo corto) y cuenta con una alta rentabilidad económica ya que, en varios países se ha demostrado que es el mejor cultivo tanto del punto de vista técnico como económico (Marulanda, 2003); es por esto que se determina cultivar lechuga (*Lactuca sativa*) para este prototipo hidropónico.

Los parámetros técnicos recomendados para la producción de lechuga según Brenes Peralta et al. (2014); Somerville et al. (2022) son: una temperatura de 15 °C a 22 °C, una humedad relativa de 80 % a 95 % y preferentemente un clima frío a templado, y en la localidad de estudio, la ciudad de Loja, la temperatura promedio diaria es de 18 °C y la humedad relativa promedio es de 82,5 % por lo que se puede observar que estas condiciones son adecuadas para el desarrollo del cultivo (Valarezo, 2022).

En la **Tabla 11** se muestran las condiciones del ambiente y solución nutritiva para la producción de lechuga.

Tabla 11. Parámetros necesarios para la producción de lechuga.

Categoría	Parámetro	Valor
<i>Ambiente</i>	Temperatura	15 °C a 22 °C
	Humedad relativa	80 % a 95 %
<i>Solución nutritiva</i>	Nivel de pH	5,5 a 6,5
	Concentración (EC)	1,3 mS/cm
	Temperatura	14 °C a 30 °C

Fuente: (Brenes Peralta & Jimenez Morales, 2014; Somerville et al., 2022)

5.4.2.2 Modelos de cultivos aeropónicos.

En la actualidad existen varios modelos para prototipos de cultivos aeropónicos, cada uno cuenta con características propias basadas en la adaptabilidad, uso de recursos, necesidades del cultivo y espacio disponible.

Para la selección del modelo más apropiado, que satisfaga los requerimientos de esta investigación, se consideraron tres muestras, en la **Tabla 12** se observa las ventajas y desventajas, de cada uno de los modelos, consideradas para la elección del prototipo.

Tabla 12. Ventajas y desventajas de los modelos de cultivos aeropónicos.

VENTAJAS	DESVENTAJAS	DISEÑO
<ul style="list-style-type: none"> • Diseño compacto. • Recirculación de solución nutritiva. • Tanque colector actúa también como soporte. • Menor uso de materiales. 	<ul style="list-style-type: none"> • Cantidad de plantas limitadas. • Inestabilidad de la torre cuando las plantas están en su etapa final. • Difícil mantenimiento. 	
<ul style="list-style-type: none"> • Dos torres separadas, mayor número de plantas que el modelo 1. • Tanque colector independiente lo que permite un mejor control de la solución nutritiva. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor uso de materiales. • Necesita más espacio por un número de plantas no considerable. • Precisión en el diseño para asegurar la estabilidad del modelo. 	
<ul style="list-style-type: none"> • Cuatro torres que permiten una mayor plantación que los modelos 1 y 2. • Tanque colector actúa como base y soporte del modelo. • Fácil mantenimiento de la solución nutritiva. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor uso de materiales. • Precisión en el sistema de riego para asegurar un buen caudal en las cuatro torres. 	

Nota: Los modelos 1 y 2 fueron tomados de (Gutierrez, 2018; Salgado, 2017) respectivamente.

Una vez detalladas las ventajas y desventajas de los tres modelos de diseños de cultivo aeropónico, se observa que el **modelo 3** es el más adecuado basado en el diseño, mayor número de plantas y fácil mantenimiento de la solución nutritiva, ya que permite el llenado y revisión diaria del nivel de agua del tanque colector. Sin embargo, para facilitar el análisis de las características de interés que intervienen en el prototipo a construir se elabora una matriz de ponderación que se exponen en la **Tabla 13**, donde se establece una valoración según las prioridades del diseño y para cada uno de los modelos propuestos.

Tabla 13. Matriz de ponderación para definir el modelo del prototipo.

Criterio	Peso del criterio	Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3	
		Valor	%	Valor	%	Valor	%
Adaptabilidad a espacios reducidos	20%	5	0,95	2	0,4	4	0,8
Diseño hermético	20%	1	0,19	3	0,57	5	0,95
Facilidad de mantenimiento	16%	1	0,12	4	0,48	5	0,6
Tipo de cultivo	11%	3	0,45	2	0,3	4	0,6
Cantidad de producción	14%	1	0,15	1	0,15	5	0,75
Disponibilidad de materiales	10%	5	0,5	4	0,4	5	0,5
Costo de implementación	9%	4	0,36	2	0,18	3	0,27
TOTAL	100%		2,72		2,48		4,47

Cada uno de los siete criterios establecidos en esta matriz cuentan con un peso o porcentaje según la importancia para el diseño a construirse, valorados según la **Tabla 10**, donde principalmente se busca que se adapte a espacios reducidos, un diseño hermético en el cual no existan fugas o pérdida de agua y la facilidad de mantenimiento para controlar los parámetros necesarios del cultivo.

5.4.2.3 Selección de material de construcción del prototipo.

Para el diseño y construcción de los canales o torres para hidroponía, gran parte de los autores recomiendan como material el policloruro de vinilo (PVC), por su facilidad de manufacturar, existencia de conexiones estandarizadas, accesibilidad en el mercado y bajo costo (Gutierrez, 2018).

5.4.2.4 Diseño de los canales de cultivo

Los canales de cultivo proporcionan soporte a las plantas conjuntamente con las canastillas hidropónicas, permitiendo que sus raíces estén en contacto con la solución nutritiva. Con la técnica de aeroponía, dicha solución cae por gravedad (tipo ducha) en frecuencias establecidas según la etapa y tipo de cultivo. Cabe señalar que con la distribución adecuada de las plantas se garantiza que todas reciban la cantidad de agua necesaria y con la utilización de un sustrato se mantendrá la humedad requerida por las mismas.

Para determinar el diseño de los canales de cultivo se realizó una revisión de literatura técnica acerca de las metodologías más usadas en la hidroponía y según varios autores y manuales certificados para la elaboración de cultivos hidropónicos como La HHP (Huerta Hidropónica Popular) y el manual de la FAO (Marulanda, 2003; Somerville et al., 2022), para la aeroponía se utilizan torres de cultivo en columna y se señala que la distancia entre plantas depende de la especie a cultivar, en el caso de la lechuga la distancia adecuada es de 18 a 30 cm, con recomendación de 20 cm, esto también se puede interpretar como la distancia entre orificios donde se colocan las canastillas hidropónicas.

En el diseño y construcción se utilizaron cuatro tubos sanitarios de PVC de 4 pulgadas (110 mm) de diámetro y 1,5 m de largo, los cuales serán las torres del cultivo, teniendo en consideración las recomendaciones anteriores, con una distribución cada 20 cm verticalmente y cada 12,5 cm horizontalmente, como se indica en la **Figura 13**; asimismo, se considera 20 cm al inicio y final de la tubería como recomendación de Cabezas (2018).

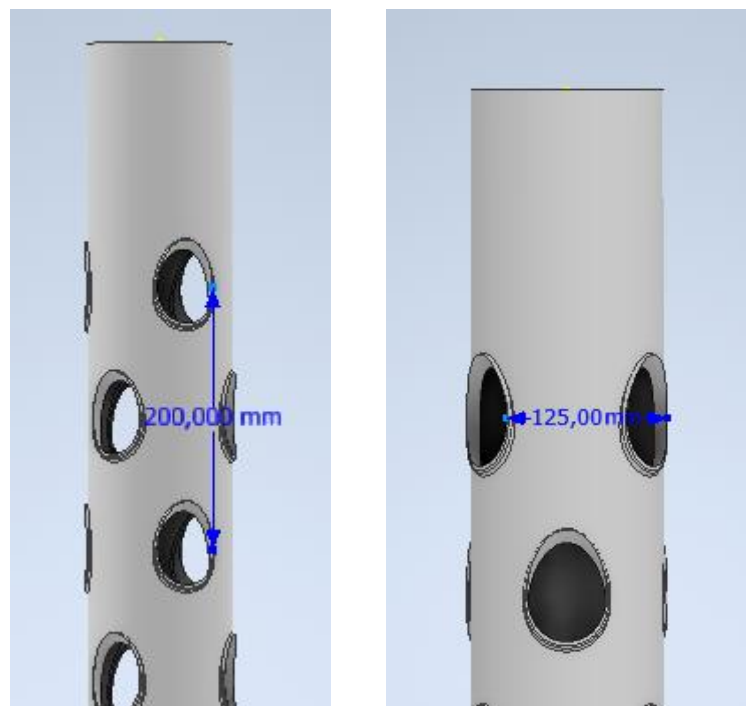


Figura 13. Distancia entre orificios en las torres del cultivo

Se obtiene cuatro torres iguales, cada una de ellas cuenta con 36 orificios en su perímetro para colocar las canastillas y a su vez las plantas, lo que da un total de 144 plantas en todo el sistema aeropónico.

5.4.2.5 Tanque colector

En el diseño del presente prototipo, el depósito colector se encuentra en la parte inferior actuando como base del cultivo y depósito de la solución nutritiva, para asegurar que el

prototipo cumpla con los requerimientos de las plantas se realiza el cálculo del volumen mínimo del depósito, aplicando la **Ecuación 1**, obteniendo el siguiente resultado:

$$C_{MT} = D_D \times N \times C \times K_S$$

$$C_{MT} = 0,3 \frac{L}{día} \times 1día \times 144 \times 0,6$$

$$C_{MT} = 25,92 L$$

El depósito de solución nutritiva dispondrá como mínimo de 26 litros aproximadamente. Para garantizar esto, se calculó el volumen total de la base que en este caso es el tanque colector, dando un valor de 27,31 litros, en el **Anexo 4** se exponen los resultados para este momento de cálculo.

5.4.2.6 Diseño del sistema de bombeo.

Para el diseño del sistema de bombeo se considera que se necesita distribuir la solución nutritiva a las cuatro torres al mismo tiempo, por lo que se optó por una distribución de un ramal principal y dos secundarios que a su vez distribuyen a dos torres cada uno, como se observa en la **Figura 14**. Además, se optó por una manguera de polietileno (PE) desde la boca de descarga de la bomba hasta una unión para continuar con tubería de policloruro de vinilo (PVC) que forma el ramal principal y secundarios.

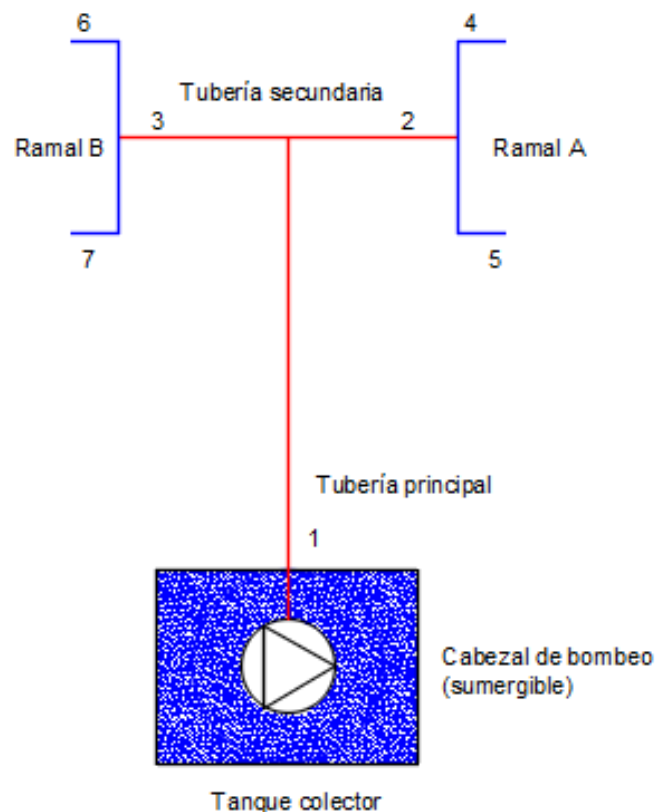


Figura 14. Red de distribución del cultivo aeropónico

Para los ramales A y B, y distribución de la solución nutritiva para cada torre no se implementaron aspersores, la solución nutritiva se distribuye por gravedad, asegurando que llega a todas las plantas de cada torre.

5.4.2.6.1 Cálculos de la red de distribución

Para la selección de la bomba, se tuvo en cuenta las ecuaciones enunciadas en la sección de sistema de bombeo, el procedimiento de cálculo se expone a continuación.

- **Diseño de tubería de conexión a la bomba**

Diámetro de la tubería

Para el cálculo del diámetro de la tubería se emplea la **Ecuación 3**, teniendo en cuenta un caudal recomendado de $8 \frac{L}{min}$ y una velocidad de circulación de la solución nutritiva correspondiente a $1,5 \frac{m}{s}$, obteniendo como resultado:

$$Q = 8 \frac{L}{min} \times \frac{1m^3}{1000L} \times \frac{1min}{60s} = 1,33 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \times Q}{\pi \times v}}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \times \left(1,33 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s}\right)}{\pi \times 1,5 \frac{m}{s}}}$$

$$D = 0,0106m = 10,6mm$$

Para elegir el diámetro adecuado, se realiza una evaluación hidráulica de las pérdidas de carga tanto con el diámetro calculado como con el diámetro que se pretende escoger.

A continuación, para determinar si el fluido es laminar o turbulento se utiliza la **Ecuación 4**, con el diámetro obtenido se calcula el número de Reynolds; además con los valores de densidad y viscosidad dinámica del fluido (**Anexo 1**), en este caso la solución nutritiva es tratada como agua a 20 °C, se obtiene el resultado que se expone a continuación.

$$N_R = \frac{v \times D \times \rho}{\eta}$$

$$N_R = \frac{1,5 \frac{m}{s} \times 0,0106m \times 998 \frac{kg}{m^3}}{1,02 \times 10^{-3} Pa \cdot s}$$

$$N_R = 1,561 \times 10^4$$

Al ser el $N_R = 15613$ un valor superior a 4 000 se lo considera un flujo turbulento y el factor de fricción (f) se calcula según el criterio de P. K Swamee y A. K. Jain (**Anexo 2**), que se expone a continuación:

$$f = \frac{0,25}{\left[\log_{10} \left(\frac{1}{3,7 \times \left(\frac{D}{\varepsilon} \right)} + \frac{5,74}{N_R^{0,9}} \right) \right]^2}$$

Para el valor de la rugosidad se debe considerar el tipo de material a trabajar, en este caso es polietileno (PE), según Sotelo (1998) este material tiene un valor de 0,002 mm (ver **Anexo 5**), obteniéndose el siguiente resultado:

$$f = \frac{0,25}{\left[\log_{10} \left(\frac{1}{3,7 \times \left(\frac{0,0106m}{2 \times 10^{-6}m} \right)} + \frac{5,74}{(1,561 \times 10^4)^{0,9}} \right) \right]^2}$$

$$f = 0,028$$

Una vez obtenidos estos valores, se aplica la **Ecuación 5** para obtener las pérdidas primarias por fricción, que se describen a continuación:

$$h_{Lp} = f \times \frac{l}{D} \times \frac{v^2}{2g}$$

Donde:

$$l = 0,3 \text{ m}$$

$$h_{Lp} = 0,028 \times \frac{0,03m}{0,0106m} \times \frac{\left(1,5 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \times \left(9,81 \frac{m}{s^2}\right)}$$

$$h_{Lp} = 0,09m$$

Con el objetivo de reducir las pérdidas por fricción en la tubería, es necesario seleccionar una tubería que posea un diámetro interno superior al calculado, en este caso, se escoge un diámetro comercial de ½ pulgada de material polietileno (ver **Anexo 6**), las características de la tubería son:

- Diámetro nominal: $\frac{1}{2}$ in
- Diámetro interno: **12,7 mm**
- Diámetro externo: **20 mm**
- Espesor de pared: **3,65 mm**

Luego de obtener el diámetro de la tubería de conexión entre la bomba y la tubería principal, es necesario volver a calcular la velocidad (velocidad real del fluido) con los datos de la tubería seleccionada, para lo cual se aplica la **Ecuación 6**, obteniéndose los siguientes resultados:

$$v_r = \frac{Q \times 4}{\pi \times d_i^2} = \frac{\left(1,33 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s}\right) \times 4}{\pi \times (0,0127m)^2} = 1,053 \frac{m}{s}$$

Al obtener el diámetro y la velocidad real de la tubería, es fundamental volver a calcular las pérdidas de la tubería, obteniendo un valor de $1,053 \frac{m}{s}$ para la velocidad real del fluido, 13 080 para el Número de Reynolds, 0,029 en el factor de fricción y 0,039 m en pérdidas primarias.

- **Diseño de la tubería principal, secundaria y ramales de riego**

Diámetro de la tubería

Para el cálculo del diámetro de la tubería se utiliza los valores recomendados de caudal y velocidad de circulación del fluido, siendo $5 \frac{L}{min}$ y $1,5 \frac{m}{s}$ respectivamente; además se emplea la **Ecuación 3**, obteniendo los siguientes resultados:

$$Q_{recmd} = 5 \frac{L}{min} \times \frac{1m^3}{1000L} \times \frac{1min}{60s} = 8,33 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s}$$

$$Q_{p_raml} = 2 \text{ ramales} \times 8,33 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s} = 1,66 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \times Q_{p_raml}}{\pi \times v}}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \times \left(1,66 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s}\right)}{\pi \times 1,5 \frac{m}{s}}}$$

$$D = 0,01189m = 11,89mm$$

A continuación, se calcula el Número de Reynolds para determinar el tipo de fluido, aplicando la **Ecuación 4**; además, es necesario tener los valores de densidad y viscosidad dinámica del fluido (**Anexo 1**), en este caso la solución nutritiva es tratada como agua a 20 °C, obteniéndose los siguientes resultados.

$$N_R = \frac{v \times D \times \rho}{\eta}$$

$$N_R = \frac{1,5 \frac{m}{s} \times 0,01189m \times 998 \frac{kg}{m^3}}{1,02 \times 10^{-3} Pa \cdot s}$$

$$N_R = 1,7465 \times 10^4$$

Al ser el resultado un valor superior a 4 000 se lo considera un flujo turbulento y el factor de fricción (f) se calcula según el criterio de P. K Swamee y A. K. Jain (**Anexo 2**), obteniéndose los resultados que se exponen a continuación:

$$f = \frac{0.25}{\left[\log_{10} \left(\frac{1}{3,7 \times \left(\frac{D}{\varepsilon} \right)} + \frac{5,74}{N_R^{0,9}} \right) \right]^2}$$

Para el valor de la rugosidad se debe considerar el tipo de material a trabajar, en este caso es policloruro de vinilo (PVC), según Sotelo (1998) este tiene un valor de 0,02 mm (ver **Anexo 5**), obteniéndose:

$$f = \frac{0,25}{\left[\log_{10} \left(\frac{1}{3,7 \times \left(\frac{0,01189m}{2 \times 10^{-5}m} \right)} + \frac{5,74}{(1,7465 \times 10^4)^{0,9}} \right) \right]^2}$$

$$f = 0,0302$$

Una vez obtenidos estos valores, se aplica la **Ecuación 5** para obtener las pérdidas primarias por fricción que se exponen a continuación:

$$h_{Lp} = f \times \frac{l}{D} \times \frac{v^2}{2g}$$

La longitud está dada por la suma de la tubería principal (1,25 m), secundaria (0,6 m) y los cuatro ramales de riego (0,2 m cada uno). Donde $l = 2,65 m$, obteniéndose:

$$h_{Lp} = 0,0302 \times \frac{2,65m}{0,01189m} \times \frac{\left(1,5 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \times \left(9,81 \frac{m}{s^2}\right)}$$

$$h_{Lp} = 0,772m$$

Con el objetivo de reducir las pérdidas por fricción en la tubería es necesario seleccionar una tubería que posea un diámetro interno superior al calculado, en este caso, se escoge un diámetro comercial de ½ pulgadas de material de policloruro de vinilo tipo roscada (ver **Anexo 7**), las características de la tubería son:

- Diámetro nominal: $\frac{1}{2}$ in
- Diámetro interno: **13,88 mm**
- Diámetro externo: **21,34 mm**
- Espesor de pared: **3,73 mm**

Luego de obtener el diámetro de la tubería principal y los ramales de riego, es necesario volver a calcular la velocidad (velocidad real del fluido) con los datos de la tubería seleccionada, para lo cual se aplica la **Ecuación 6**, obteniéndose el siguiente resultado:

$$v_r = \frac{Q \times 4}{\pi \times d_i^2} = \frac{\left(1,66 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s}\right) \times 4}{\pi \times (0,01388m)^2} = 1,101 \frac{m}{s}$$

Al tener el diámetro y la velocidad real de la tubería, es fundamental volver a calcular las pérdidas de la tubería, obteniendo un valor de $1,101 \frac{m}{s}$ para la velocidad real del fluido, 14 958 para Número de Reynolds, 0,031 en el factor de fricción y 0,37 m en pérdidas primarias.

- **Total de pérdidas primarias**

El total de pérdidas primarias en la tubería del sistema serían:

$$h_{Lp} = 0,039m + 0,365m = 0,405m$$

- **Cálculo de pérdidas secundarias**

El cálculo de las pérdidas secundarias se realizó en toda la red de distribución del cultivo debido a la presencia de los distintos accesorios, en el **Anexo 3** se muestran los valores del coeficiente de resistencia (k) dependiendo del tipo; sin embargo, en la **Tabla 14** se presentan los valores de k para los accesorios utilizados en la red de distribución.

Tabla 14. Coeficientes de resistencia de los accesorios utilizados en la red de distribución.

Accesorio	Coeficiente de resistencia (k)
Unión roscable	0,004
Te estándar flujo por la línea principal	20f
Codo de 90° y radio largo	20f

Fuente: (Mott, 2015)

Para las pérdidas secundarias del primer tramo, tubería de conexión entre la bomba y la tubería principal, debido a la presencia de una unión tipo PP (ver **Figura 15**) donde el valor del coeficiente de resistencia es 0,004; se aplica la **Ecuación 7**, obteniendo:



Figura 15. Unión roscable de 1/2 in

$$k_1 = 0,004$$

$$h_{Ls1} = k_1 \times \frac{(v_{r1})^2}{2g}$$

$$h_{Ls1} = 0,004 \times \frac{\left(1,053 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \times 9,81 \frac{m}{s^2}} = 2,26 \times 10^{-4}m$$

Conjuntamente, para el cálculo de las pérdidas secundarias en la tubería principal y ramales de riego, siendo este tramo el más crítico (**Figura 14**) debido a los accesorios presentes, se aplica la **Ecuación 7**, obteniendo los siguientes resultados:

- **Tubería principal:** 1 unión tipo te estándar (flujo por la línea principal).

$$k_2 = 20f$$

$$h_{LS_{tp}} = k_2 \times \frac{(v_{r2})^2}{2g}$$

$$h_{LS_{tp1}} = (20 \times 0,0306) \times \frac{\left(1,101 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \times 9,81 \frac{m}{s^2}} = 0,038 m$$

- **Tubería secundaria:** 2 uniones tipo te estándar (flujo por la línea principal).

$$k_2 = 20f$$

$$h_{LS_{ts}} = 2k_2 \times \frac{(v_{r2})^2}{2g}$$

$$h_{LS_{tp2}} = 2 \left[(20 \times 0,0306) \times \frac{\left(1,101 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \times 9,81 \frac{m}{s^2}} \right] = 0,076 m$$

- **Ramales A y B:** 4 codos de 90° y radio largo.

$$k_3 = 20f$$

$$h_{LS_{rAB}} = 4 \left[k_3 \times \frac{(v_{r2})^2}{2g} \right]$$

$$h_{LS_{rAB}} = 4 \left[(20 \times 0,0306) \times \frac{\left(1,101 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \times 9,81 \frac{m}{s^2}} \right] = 0,152 m$$

A continuación, se realiza la sumatoria de todas las pérdidas secundarias en la tubería principal y ramales A y B, obteniendo el siguiente valor.

$$h_{LS2} = h_{LS_{tp1}} + h_{LS_{tp2}} + h_{LS_{rAB}}$$

$$h_{LS2} = (0,038 + 0,076 + 0,152)m = 0,266 m$$

- **Total de pérdidas secundarias**

El total de pérdidas secundarias en el sistema es:

$$h_{LS} = h_{LS1} + h_{LS2}$$

$$h_{LS} = 2,26 \times 10^{-4}m + 0,226m = 0,226m$$

- **Pérdidas Totales en el sistema**

El total de pérdidas en el sistema está dado por la sumatoria de las pérdidas primarias y secundarias, aplicando la **Ecuación 9** se obtiene:

$$h_L = h_{Lp} + h_{Ls}$$

$$h_L = 0,405m + 0,226m = 0,631m$$

$$h_L = 0,63m$$

5.4.2.6.2 Cálculo de la potencia necesaria y selección de la bomba.

Para determinar la potencia requerida por el sistema, es necesario conocer la carga total de la bomba o carga hidrostática del sistema (h_A) se aplica la **Ecuación 11**, donde el valor de la presión de entrada y salida es la atmosférica, la velocidad de entrada es constante y en la salida es $1,101 \frac{m}{s}$ y la diferencia de carga de elevación entre el punto 1 y 2 es 1,85 m aproximadamente, obteniendo el siguiente valor:

$$h_A = \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + \frac{(v_2^2 - v_1^2)}{2g} + (z_2 - z_1) + h_L$$

$$h_A = \frac{(v_1^2)}{2g} + (z_2 - z_1) + h_L$$

$$h_A = \frac{\left(1,101 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \times 9,81 \frac{m}{s^2}} + (1,85m) + 0,63m$$

$$h_A = 2,54 m$$

Aplicando la **Ecuación 12** se obtiene el valor de la potencia requerida que se expone a continuación:

$$P_B = h_A \times \gamma \times Q_{total}$$

Donde el caudal total es la suma de los caudales a lo largo de la red de distribución, dando una equivalencia de $18 \frac{L}{min}$ o $3 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s}$ y el peso específico del fluido es $9,79 \frac{kN}{m^3}$ (**Anexo 1**), obteniendo el siguiente valor:

$$P_B = 2,54m \times 9,79 \frac{kN}{m^3} \times \left(3 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s}\right)$$

$$P_B = 7,46 W$$

5.4.2.7 Determinación de la frecuencia de riego




En la literatura técnica algunos autores recomiendan de tres a ocho ciclos de riego para diversas hortalizas, entre ellas la lechuga, esto en base a experimentos realizados concluyendo así que, se puede dar tres ciclos para el periodo de plántula y hasta ocho ciclos para el periodo de cosecha dependiendo del clima y condiciones ambientales en las que se encuentre el cultivo (Liriano & Rodríguez, 2022; B. Oñate, 2022).

Para controlar los ciclos o frecuencias de riego es necesario utilizar un temporizador digital, el cuál posee un número adecuado de tiempos de programación para asegurar el número de ciclos correspondientes para el cultivo.

5.4.2.8 Selección de los dispositivos de monitoreo.

Para la selección de los dispositivos de monitoreo se consideraron los factores que afectan a la solución nutritiva los cuales son el pH, la conductividad eléctrica EC (sales disueltas) y temperatura. En la **Tabla 15**, se observa una matriz de comparación entre las opciones consideradas para el monitoreo en el cultivo.

Tabla 15. Comparación de los dispositivos de monitoreo para el cultivo hidropónico.

MODELO	PH008	PH-W2823US-A	AI104G
			
Rango de monitoreo pH	De 0,00 hasta 14,00 pH	De 0,00 hasta 14,00 pH	De 0,00 hasta 14,00 pH
Rango de monitoreo de EC	De 0 hasta 9999 μ S/cm	De 0 hasta 19000 μ S/cm	De 0 hasta 14000 μ S/cm
Rango de medición de temperatura	De 0 °C hasta 60 °C	De 0 °C hasta 50 °C	De 0 °C hasta 50 °C
Recopilación de datos en tiempo real	✗	✓	✗
Usos	Laboratorio, purificación de agua, hidroponía, peceras	Laboratorio, purificación de agua, hidroponía, peceras	Hidroponía
Costo	\$107,52	\$115,98	\$151,39

Por lo expuesto en la **Tabla 15**, se puede observar las características de tres modelos diferentes de dispositivos de monitoreo, donde todos tienen el mismo rango de medición de pH y temperatura; para la medición de la conductividad eléctrica la opción 2 tiene un rango superior; en los usos todos son para hidroponía y en el costo, la opción 3 es la más costosa.

Sin embargo, la recopilación de datos en tiempo real fue la característica principal para la selección del equipo de monitoreo, ya que con esto se aseguró un control total de la calidad de agua o solución nutritiva proporcionada al cultivo, asegurando un pH, conductividad eléctrica y temperatura óptima para el desarrollo y crecimiento de las plantas.

5.4.2.8.1 *Parámetros a controlar en el cultivo.*

En la **Figura 16** se muestra un diagrama de flujo de los parámetros a controlar con el rango adecuado de los mismos.

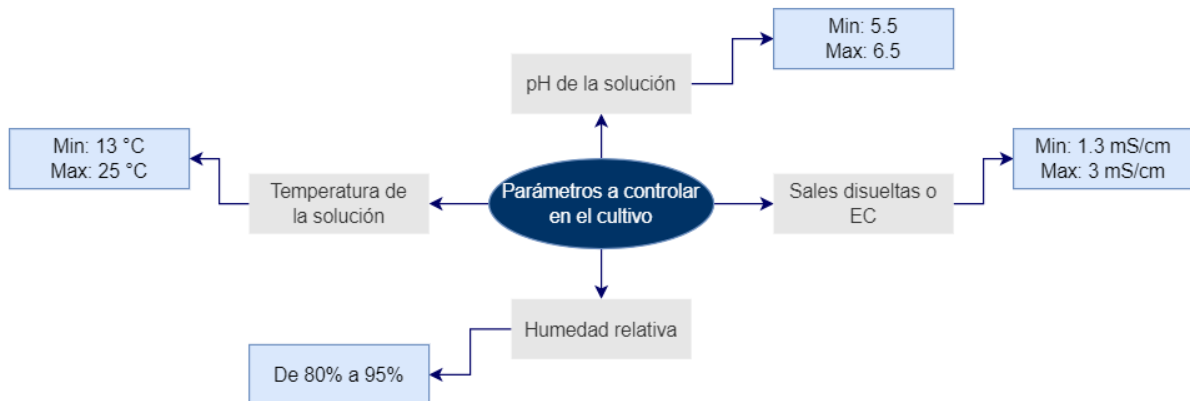


Figura 16. Parámetros a controlar en el cultivo hidropónico.

5.4.2.9 Construcción del prototipo.

Una vez adquiridos los materiales establecidos en la **Tabla 7** y **Tabla 8**, se inicia la construcción del prototipo, según los planos elaborados (ver **Anexo 9**). Como primer paso se corta las tuberías en las medidas especificadas en la **Tabla 16**, donde se detalla los componentes para la base, torres y red de distribución del cultivo aeropónico.

Tabla 16. Longitudes de las partes de la estructura del cultivo aeropónico.

SECCIÓN	LONGITUD (m)	DIÁMETRO (in)	CANTIDAD
Base	0,10	4	4
	0,125	4	2
	0,30	4	4
	0,20	4	1
Torres	1,50	4	4
Red de distribución	1,25	1/2	1
	0,30	1/2	2
	0,20	1/2	4

5.4.2.9.1 *Base del cultivo.*

Luego de disponer de las longitudes expuestas en la **Tabla 16** y los accesorios, tres te estándar y cuatro codos de 90 °C de radio largo, se procede a unir y sellar estos elementos para

evitar fugas; además, se optó por una bifurcación tipo ‘Y’ para ubicar los electrodos de pH y EC del dispositivo de monitoreo y el cable de conexión de la bomba centrífuga, la cuál es desmontable para facilitar el mantenimiento del cultivo, en la **Figura 17** se muestra el montaje de la base del prototipo propuesto.



Figura 17. Montaje de la base del cultivo.

Para un diseño más funcional se añadieron dos secciones de la tubería de 4 pulgadas de diámetro, con 5 cm de largo para ubicar una rejilla tipo hembra en la bifurcación tipo ‘Y’; además, con esto mejora la estabilidad de la conexión de la red de distribución del cultivo.

5.4.2.9.2 Torres o canales de cultivo.

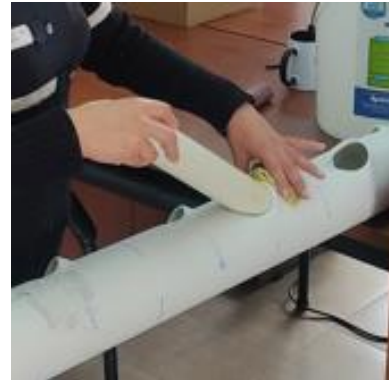
Para la realización de los orificios de los canales de cultivo es necesario elaborar una matriz de trazo o plantilla para asegurar la igualdad de distancias entre plantas en las cuatro torres. En la **Figura 18** se muestra parte del proceso de marcación en la tubería de 4 pulgadas, por cada torre se distribuyen 36 orificios para ubicar las plantas, dando un total de 144 plantas para el prototipo.



Figura 18. Marcación de distancias en el canal de cultivo (torre).

A continuación, se cortó longitudinalmente en cada una de las mediciones realizadas, ver **Figura 19a**, para luego calentar la superficie de la tubería con una pistola de calor en cada ranura e introducir un tubo de 2 pulgadas (50 mm) de diámetro a 45° aproximadamente, como

se muestra en la **Figura 19b**, para facilitar la realización del orificio donde se colocarán las canastillas para la siembra del cultivo.



a) b)
Figura 19. Corte longitudinal y realización de los orificios en la tubería.

Posteriormente, en los accesorios tipo hembra, que se colocan en la parte superior de las torres, se realiza un orificio de 2,5 cm de diámetro, aproximadamente, para colocar los codos de 90° que forman parte de la red de distribución. Una vez, finalizados los orificios de las cuatro torres y respectivas adaptaciones se procede a colocarlas en la base del cultivo, como se indica en la **Figura 20**.



Figura 20. Unión de torres y base del cultivo.

Para soporte de las plantas, se utiliza canastillas hidropónicas comerciales número S5,5 (**Figura 21**), de 5 cm de largo, 5,5 cm de diámetro superior y 3,6 cm de diámetro inferior.



Figura 21. Canastilla hidropónica S5,5.
Fuente: (Hidroponiaec, 2023)

5.4.2.9.3 *Red de distribución.*

Para la red de distribución se emplearon varias longitudes de tubería de ½ pulgada (13,88 mm), en el caso de la conexión desde la bomba a la tubería principal es de 0,30 m de manguera o tubería de polipropileno, para la tubería principal es necesario 1,25 m de largo y para la tubería secundaria dos tramos de 0,30 m y para los ramales de riego cuatro tramos de 0,20 m, en ambos casos tubería de PVC; además, se emplean accesorios como T estándar y codos de 90°. En la **Figura 22** se muestra la red de distribución acoplada.



Figura 22. Red de distribución del cultivo.

5.4.3 *Validación del prototipo construido*

5.4.3.1 *Preparación del prototipo.*

Antes de iniciar el trasplante de una especie o cultivo, es necesario adecuar las condiciones para su correcto desarrollo, es decir, la composición de la solución nutritiva y el sustrato. Para este proyecto, la especie seleccionada para cultivar es la lechuga (*Lactuca sativa*) y el sustrato utilizado es la fibra de coco en un 95 % y esponja en un 5 % con fin experimental para conocer el desarrollo de las plantas en estas condiciones.

En el caso de la solución nutritiva, se utilizaron soluciones concentradas comerciales A y B, aplicando 5 ml de la solución A por cada litro de agua y 2 ml de la solución B por cada litro de agua, como recomienda Marulanda, (2003).

Para el sustrato, fibra de coco y esponja, en ambos casos se colocaron alrededor de la canastilla, como se observa en la **Figura 23**, con el fin de dar soporte a la planta y retención de humedad para el desarrollo de las raíces, evitando aglomeraciones para no retardar el crecimiento y desarrollo del cultivo.



Figura 23. Colocación del sustrato en las canastillas hidropónicas.

Luego, es indispensable corroborar que el caudal de riego sea el adecuado en el interior de las cuatro torres, al igual que es necesario humedecer el sustrato antes de realizar el trasplante, para lo cual se realizaron pruebas del funcionamiento del riego (ver **Figura 24**).



Figura 24. Caudal de riego en el interior de los canales de cultivo.

5.4.3.2 Cultivo hidropónico de lechuga.

Para iniciar el cultivo hidropónico de lechuga es necesario conocer que, según varias recomendaciones expuestas en la literatura técnica revisada de cultivos hidropónicos, el trasplante de un cultivo se debe realizar en horas de la mañana (de 6 a 7 a.m.) o en horas de la tarde (6 a 7 p.m.) para evitar estrés hídrico, cambios bruscos de temperatura y condiciones de adaptabilidad en las plantas.

Se realizó el trasplante de la lechuga en fase de plántula para acortar su ciclo de cultivo, luego de esto se suministró un riego continuo durante 3 horas para adaptar las plantas a las nuevas condiciones, en la **Figura 25** se muestra el prototipo con las plántulas de lechuga.



Figura 25. Trasplante de las plántulas de lechuga en el prototipo.

5.4.3.2.1 *Análisis de la evolución de la lechuga en cultivo aeropónico y comparación con el método tradicional.*

El ciclo de cultivo de la lechuga es de 50 a 60 días aproximadamente desde la germinación; sin embargo, en esta investigación el trasplante se realizó en la etapa de plántula, con el fin de acortar el lapso del cultivo.

Para analizar la evolución de la especie cultivada en el prototipo construido se consideraron los siguientes parámetros: tamaño de la raíz, diámetro de la planta, número y tamaño de hojas. Estas características son fundamentales para determinar el crecimiento y desarrollo de las plantas; además, con la evaluación de estos valores también fue posible realizar una comparación entre el método tradicional del cultivo de lechuga y la implementación de la hidroponía para cultivos urbanos. Además, otras variables que se consideraron para comparar los cultivos hidropónicos con los cultivos tradicionales fueron: rendimiento de la cosecha, consumo de agua, espacio requerido, control de plagas, costos y tiempo de crecimiento, en esta variable se analizaron el diámetro, peso y calidad del cultivo.

5.4.3.2.2 *Control de parámetros.*

El control de los parámetros, principalmente de la solución nutritiva como el pH, conductividad eléctrica EC (sales disueltas) y la temperatura son indispensables para el éxito del cultivo hidropónico. El dispositivo seleccionado permitió un control 24/7 de estas condiciones gracias a su conectividad con la aplicación móvil y la exportación de los datos en tiempo real; además, se establecieron alarmas para valores fuera de los rangos establecidos de los parámetros mencionados, de esta manera se aseguró las condiciones óptimas de la solución nutritiva en un 95 %. Por otro lado, el 5 % restante se lo atribuye al tiempo de respuesta para intervenir, en caso de valores superiores o inferiores a los establecidos, puesto que no es inmediata por realizarse de manera manual, en la **Figura 26** se observa la forma de añadir solución nutritiva al cultivo a través de la bifurcación tipo ‘Y’ y a su vez al tanque colector para estabilizar los valores de los parámetros de la solución; por ejemplo, para un pH superior a 6,5 es necesario colocar agua con nutrientes y para un valor inferior a 5,5 se debe añadir únicamente agua, en ambos casos las acciones se ejecutan de forma manual.



Figura 26. Aplicación manual de la solución nutritiva al tanque colector del cultivo.

5.4.3.2.3 *Consumo energético del cultivo*

El cultivo aeropónico representa un consumo energético al contar con un sistema semiautomatizado para el riego, como lo es un dispositivo de monitoreo y una bomba, estos elementos contribuyen al consumo de energía diario variando según el ciclo de cultivo de la especie plantada; sin embargo, el uso de un temporizador digital ofrece un uso eficiente de la energía consumida por el cultivo aeropónico. Para calcular el consumo de energía del prototipo se utiliza la **Ecuación 13**.

$$\text{Consumo energético} = CE = P \times T \quad (13)$$

Donde: P = Potencia (W) y T = Tiempo de uso del sistema de bombeo en horas (h)

6. Resultados

6.1 Análisis de las técnicas hidropónicas

En la **Tabla 17** se presenta la valoración total obtenida para cada técnica hidropónica basados en los criterios expuestos y según la matriz de ponderación expuesta en la Tabla 9, donde se observa que la técnica con mayor puntuación es la Aeroponía.

Tabla 17. Valoración de cada técnica hidropónica a partir de la matriz de ponderación.

Técnica	Estacionaria	Flujo y reflujo	NFT	Aeropónica
Valoración total	2,62	2,85	3,02	3,98

La técnica fue seleccionada debido a su alta adaptabilidad a espacios reducidos, es decir ajustarse y funcionar de manera efectiva en entornos con limitaciones de espacio físico siendo estos las terrazas, balcones o interiores del área urbana; eficiencia en el uso de recursos, mayor producción en menor área y capacidad para cultivar diferentes especies.

6.2 Diseño y construcción del prototipo


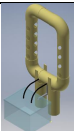

6.2.1 Diseño del prototipo

Para el diseño del prototipo, es necesario iniciar con la selección de un modelo de cultivo aeropónico, para continuar con el dimensionamiento de la red de distribución y selección de dispositivos de monitoreo de la solución nutritiva. A continuación, se expone el análisis detallado de estos apartados.

- **Modelo del cultivo aeropónico**

En la **Tabla 18** se muestran los valores obtenidos para los tres modelos aeropónicos presentados (Tabla 12 y 13), los cuales se evaluaron según sus ventajas y desventajas, y criterios de ponderación basados principalmente en adaptabilidad, diseño hermético, facilidad de mantenimiento y costos de implementación.

Tabla 18. Valoración total para cada modelo según la matriz de ponderación elaborada.

Modelo	Valoración total
1 	2,72
2 	2,48
3 	4,47

El **modelo 3** presenta la valoración más alta, teniendo en cuenta que es un diseño que no necesita un tanque colector adicional ya que, la base cumple esta función; además, la bifurcación tipo “Y” contribuye a un mantenimiento sencillo de la solución nutritiva, permitiendo una revisión directa al nivel de la solución y un fácil llenado de la misma; es hermético y los materiales son accesibles en el mercado nacional. En la **Figura 27**, se observa el modelo de cultivo seleccionado.



Figura 27. Modelo aeropónico seleccionado.

- **Diseño y dimensionamiento de la estructura del prototipo**

Para el dimensionamiento de la estructura del prototipo se consideró, principalmente, la distancia entre plantas, a partir de esto se diseñaron los canales de cultivo los cuales tienen una longitud de 1,50 metros de alto y 4 pulgadas (110 mm) de diámetro. La distribución está dada vertical y horizontalmente, teniendo así una separación entre orificios de 20 cm y 12,5 cm respectivamente. los planos de diseño se exponen en el **Anexo 9**.

- **Diseño y dimensionamiento de la red de distribución**

La red de distribución del prototipo aeropónico inicia desde el tanque colector hasta los ramales de riego para abastecer a las plantas de los nutrientes necesarios, su diseño y dimensionamiento depende de las necesidades del cultivo, con base en la demanda diaria de solución nutritiva y número de plantas se aplicó la **Ecuación 1** obteniendo así el volumen mínimo del tanque colector siendo de **25,92 L**, el volumen de la base del prototipo construido es de **28,17 L** (ver **Anexo 4**) cumpliendo así los requerimientos del cultivo.

Para el dimensionamiento del diámetro de la tubería de conexión entre la bomba y la tubería principal se aplican diversas ecuaciones, desde la **Ecuación 3** hasta la **Ecuación 6**, teniendo en cuenta un caudal recomendado de $8 \frac{L}{min}$ se seleccionó un diámetro comercial de $\frac{1}{2}$ pulgada (12,7 mm) (ver **Anexo 6**). En la **Tabla 19** se exponen las características de la tubería seleccionada y las pérdidas de este tramo.

Tabla 19. Características del primer tramo de la red de distribución.

Material	Diámetro nominal	Diámetro interno	Longitud del tramo	Velocidad del fluido	Rugosidad (ϵ)	Número de Reynolds (N_R)	Factor de fricción (f)	Pérdidas primarias (h_{LP})
	in	mm	m	m/s	mm	-	-	m
Poliétileno	1/2	12,7	0,3	1,053	0,002	13080	0,029	0,039

En el caso de la tubería principal y ramales de riego, las condiciones de diseño son similares, ya que el riego se realiza por gravedad, tipo “ducha”, no se utilizan aspersores; por lo tanto, se consideró un caudal recomendado de $5 \frac{L}{min}$ sin embargo, se debe considerar que son dos ramales de riego para lo cual se debe multiplicar el caudal recomendado. Para obtener el diámetro de la tubería se aplicó desde la **Ecuación 3** hasta la **Ecuación 6**, seleccionando así un diámetro comercial de $\frac{1}{2}$ pulgada (13,88 mm) (ver **Anexo 7**). En la **Tabla 20** se muestran las características de la tubería seleccionada y las pérdidas de este tramo.

Tabla 20. Características de la tubería principal, secundaria y ramales de riego.

Material	Diámetro nominal	Diámetro interno	Longitud del tramo	Velocidad del fluido	Rugosidad (ϵ)	Número de Reynolds (N_R)	Factor de fricción (f)	Pérdidas primarias (h_{LP})
	in	mm	m	m/s	mm	-	-	m
Policloruro de vinilo PVC	1/2	13,88	2,65	1,101	0,02	14958	0,031	0,37

- **Selección de la bomba**

Para la selección de la bomba es necesario conocer la potencia requerida por el sistema, para lo cual es necesario calcular la carga hidrostática del sistema ($h_A = 2.54$ m), cuyo valor se obtuvo aplicando la **Ecuación 11**; asimismo, el caudal total del sistema está dado por la suma de los caudales de la red de distribución dando una equivalencia de $18 \frac{L}{min}$ o $3 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s}$, con estos valores y empleando la **Ecuación 12** se obtiene la potencia requerida que es de **7,46 W**. Sin embargo, es importante considerar el cabezal total del sistema que es **2,5 m**; por consiguiente, se seleccionó una bomba centrífuga que cumpla con estas características, en la **Tabla 21** se presentan las especificaciones de la bomba seleccionada (ver **Figura 28**).

Tabla 21. Características y especificaciones de la bomba seleccionada.

Parámetro	Valor
Marca	Río
Modelo	Plus 1100
Característica	Sumergible
Caudal máximo	382 GPH (24,1 LPM)
Potencia	23 W
Cabezal máximo	3 metros
Voltaje	115V/60Hz
Dimensiones (LxWxH)	4,86 x 3,25 x 2,5 in



Figura 28. Bomba centrífuga seleccionada (RIO PLUS 1100).

Fuente: Amazon (página web)

Debido al diseño del prototipo, especialmente por la ubicación y características del tanque colector, se optó por una bomba sumergible que se adapte a las condiciones del diseño del prototipo, ya que era indispensable que este elemento ingrese por la tubería de 4 pulgadas de diámetro para sumergirla en la solución nutritiva que se encuentra en la base del prototipo.

- **Frecuencia de riego**

La demanda de agua varía según las etapas de crecimiento del cultivo, dependiendo además de factores como la radiación solar, humedad, temperatura, entre otros; por lo que, la frecuencia de riego se puede establecer según el criterio del agricultor o en base a sensores y datos. En esta investigación, la frecuencia de riego se estableció a partir de la etapa de crecimiento del cultivo y la humedad del ambiente, en la **Tabla 22** se detallan los ciclos de riego para el cultivo de lechuga.

Tabla 22. Frecuencia de riego establecida según la etapa del cultivo.

	ETAPA	ENCENDIDO	APAGADO
$22 \text{ }^\circ\text{C} \leq T_{amb}$	Plántula	07:00 a.m.	07:15 a.m.
		03:00 p.m.	03:15 p.m.
		11:00 p.m.	11:15 p.m.
	Estado de vegetación	07:00 a.m.	07:30 a.m.
		03:00 p.m.	03:15 p.m.
		11:00 p.m.	11:30 p.m.
	Madurez (periodo de consumo ideal)	07:00 a.m.	07:30 a.m.
		12:00 p.m.	12:25 p.m.
		05:00 p.m.	05:30 p.m.
$T_{amb} \geq 23 \text{ }^\circ\text{C}$	Plántula	10:00 p.m.	10:25 p.m.
		07:00 a.m.	07:20 a.m.
		03:00 p.m.	03:25 p.m.
	Estado de vegetación	11:00 p.m.	11:20 p.m.
		07:00 a.m.	07:30 a.m.
		12:00 p.m.	12:30 p.m.
	Madurez (periodo de consumo ideal)	05:00 p.m.	05:30 p.m.
		10:00 p.m.	10:30 p.m.
		07:00 a.m.	07:45 a.m.
		10:00 p.m.	10:20 a.m.
		01:00 p.m.	01:45 p.m.
		04:00 p.m.	04:20 p.m.
		07:00 p.m.	07:45 p.m.

Para cumplir con los ciclos de riego especificados se utilizó un temporizador digital de 8 tiempos, marca MAVIJU ® (ver **Figura 29**), el cual permitió programar los tiempos de encendido y apagado de la bomba centrífuga durante los 7 días de la semana.



Figura 29. Temporizador digital MAVIJU de 8 tiempos.

- **Selección de dispositivos de monitoreo**

El dispositivo seleccionado posee recopilación de datos en línea a través de una red wifi, para un control 24/7 de la solución nutritiva ya que, cuenta con una aplicación móvil que permite la visualización de los parámetros, históricos y en tiempo real, de temperatura, conductividad eléctrica o sales disueltas (EC) y valores de pH, desde un teléfono inteligente previamente conectado con el dispositivo; además, posee la opción de programar notificaciones en el dispositivo móvil según las condiciones establecidas para cada uno de los parámetros dependiendo de los valores o rangos de ajuste que se asignen, por ejemplo: valores superiores o inferiores al rango de temperatura establecido, cuando el pH es superior o inferior al rango, entre otros. Es por esto, que se consideró esta característica como la más importante para la selección del dispositivo y así poder monitorear la calidad del agua del cultivo. En la **Figura 30** se muestra la imagen referencial del dispositivo de monitoreo seleccionado e implementado.



Figura 30. Equipo de monitoreo (PH-W2823US-A).
Fuente: Amazon (página web)

En la **Tabla 23** se presentan los parámetros de medición y características del dispositivo de monitoreo seleccionado.

Tabla 23. Rangos de medición y parámetros de PH-W2823US-A.

CARACTERÍSTICA	VALOR	OBSERVACIÓN
Rango de medición de pH	0,00 ~ 14,00 pH	Precisión de pH = ± 0,1
Rango de medición EC	0~19 000 µS/cm	Precisión EC = ±2% F. S
Rango de temperatura	0 °C ~ 50 °C	Precisión T = ± 1 °C
Fuente de alimentación	120 V	-
Aplicación en línea	Tuya Smart	-

6.2.2 Construcción del prototipo

El prototipo construido posee una base que actúa como tanque colector, cuatro torres que son los canales de cultivo con 144 orificios, donde se ubicaron las canastillas hidropónicas para el cultivo de las hortalizas, la red de distribución, una bomba sumergible de 23 W, el dispositivo de monitoreo PH-W2823US-A, un temporizador de 8 tiempos y 144 canastillas hidropónicas, en la **Figura 31** se puede observar la implementación del prototipo propuesto.



Figura 31. Estructura del prototipo aeropónico.

Nota: En la sección 5.4.2.9, se detallan las medidas de cada uno de los elementos del prototipo.

6.3 Validación del prototipo

La hortaliza cultivada en el prototipo fue la lechuga (*Lactuca sativa*) seleccionada por su ciclo corto de cultivo, adaptabilidad y demanda en el mercado local. Se plantaron 144 plántulas de lechuga, teniendo una pérdida de producción del 10,4 % (15 plantas), esto debido a situaciones que dificultaron el desarrollo adecuado de las plantas como: la alta velocidad del viento y falta de riego durante tres días a causa de una falla eléctrica. En la **Figura 32** se observan los resultados que experimento el cultivo en sus diferentes fases de crecimiento,

debido a la velocidad del viento se decide trasladar el cultivo a un espacio físico donde la velocidad del viento no afecte el crecimiento del cultivo.



Figura 32. Problemas experimentados en el cultivo de la lechuga aeropónica.

Sin embargo, por el principio de la aeroponía, absorción directa de los nutrientes y oxigenación a través de las raíces de las plantas, se logró una recuperación del 90 % del cultivo, en la **Figura 33** se muestra el cultivo recuperado, después de 10 días en donde se intensifico el monitoreo de los niveles de pH y sales disueltas de la solución nutritiva.



Figura 33. Recuperación del cultivo luego de 10 días.

6.3.1 Comparación de la técnica aeropónica con el método tradicional

Para comparar el cultivo que se implementó en el prototipo propuestos se considera un cultivo tradicional, en donde se necesita mayor área para producir menor número de plantas, mayor número de horas de trabajo y adaptación y preparación del terreno dependiendo del cultivo. En la **Figura 34a** se observa el cultivo tradicional el cuál fue implementado en un área de 3 m² donde se sembraron 20 plántulas de lechuga, este cultivo se puede desarrollar en un periodo de 90 a 100 días aproximadamente y dependiendo de las condiciones climáticas, plagas y malezas las pérdidas varían entre 40 % y 47 %. Mientras que el cultivo aeropónico desarrollado en esta investigación fue implementado en un área de 0,55 m² en donde se plantaron 144 plántulas, **Figura 34b**, el cultivo se desarrolló en 40 días, mínima intervención humana en el periodo de cultivo y las pérdidas fueron del 13,2%.

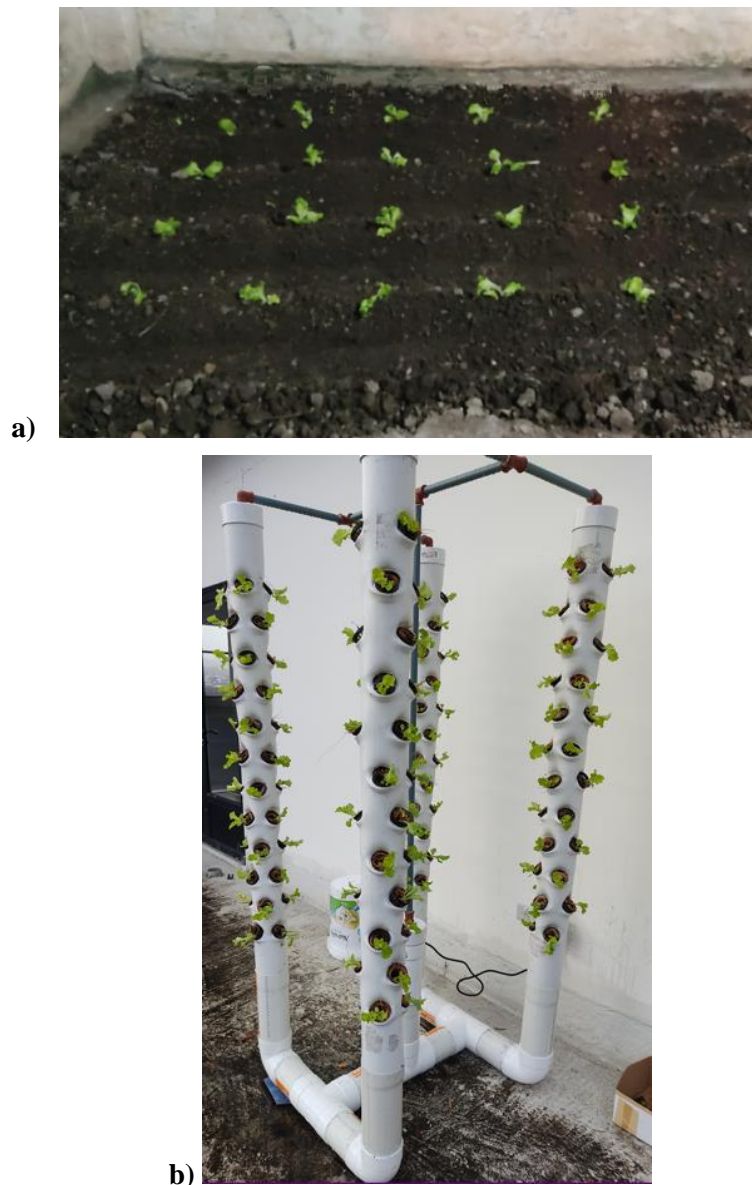


Figura 34. Método tradicional y técnica aeropónica para el cultivo de lechuga.

6.3.1.1 Análisis de evolución del cultivo.

La comparación de la evolución de las plantas en el método tradicional y la técnica aeropónica se basó en tres características principales, teniendo en cuenta tres plantas de lechuga como muestra, las mediciones se realizaron 12 días posteriores a la siembra y con un intervalo de 10 a 12 días. Los resultados alcanzados se detallan a continuación:

- **Tamaño y número de hojas**

La medición del tamaño de las hojas de la planta se realizó desde su origen (tallo) hasta la parte final, como se observa en la **Figura 35**.



Figura 35. Medición del tamaño de las hojas de la lechuga.

Además, en la **Tabla 24** se presentan los datos obtenidos para cada una de las muestras consideradas en esta investigación.

Tabla 24. Tamaño y número de hojas de lechuga cultivadas en el método tradicional y aeropónico.

Fecha de medición: 31/07/2023				
Muestra	MÉTODO TRADICIONAL		AEROPONÍA	
	<i>Tamaño (cm)</i>	<i>Número</i>	<i>Tamaño (cm)</i>	<i>Número</i>
1	2	3	2,5	4
2	3,8	4	5	5
3	4	3	4,5	3

Fecha de medición: 10/08/2023				
Muestra	MÉTODO TRADICIONAL		AEROPONÍA	
	<i>Tamaño (cm)</i>	<i>Número</i>	<i>Tamaño (cm)</i>	<i>Número</i>
1	6	4	6,4	5
2	7,5	5	9	6
3	6,9	5	8,2	5

Fecha de medición: 21/08/2023				
Muestra	MÉTODO TRADICIONAL		AEROPONÍA	
	Tamaño (cm)	Número	Tamaño (cm)	Número
1	8	5	9	6
2	9,9	7	11,3	9
3	8,4	7	10	8

Fecha de medición: 28/08/2023				
Muestra	MÉTODO TRADICIONAL		AEROPONÍA	
	Tamaño (cm)	Número	Tamaño (cm)	Número
1	11,5	7	14,5	8
2	12	10	15	13
3	12	11	15,2	14

La **Figura 36** muestra la representación de los datos obtenidos en la última fase de medición, para las tres muestras en el tamaño de las hojas de ambos métodos. Se puede observar que la técnica aeropónica permite el desarrollo de hojas de tamaño superior con respecto al método tradicional. Además, el número de hojas también es mayor en el caso de la aeroponía, como se expone la **Figura 37**.

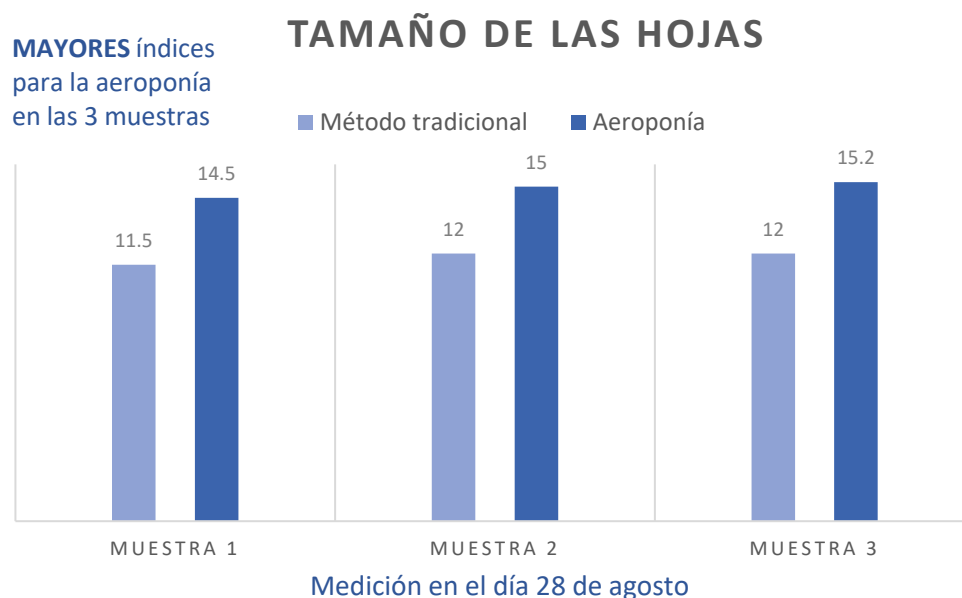


Figura 36. Comparación del método tradicional y la aeroponía con respecto al tamaño de hojas.

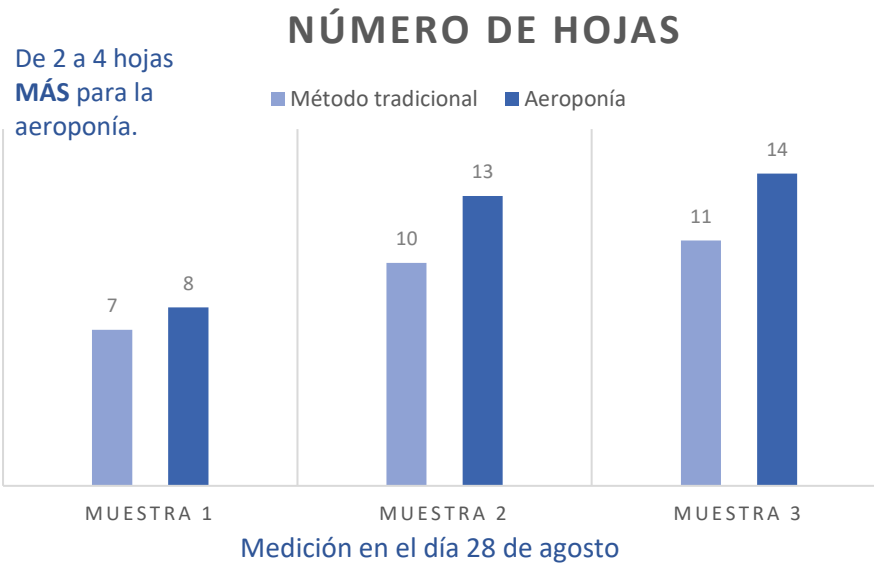


Figura 37. Comparación del método tradicional y la aeroponía con respecto al número de hojas.

- **Diámetro de las plantas**

En la **Tabla 25** se detallan los valores obtenidos de la medición del diámetro aproximada para cada una de las tres muestras correspondientes, considerando la fecha en que se realizó la recopilación de información.

Tabla 25. Diámetro de las lechugas cultivadas por método tradicional y aeropónico.

Fecha de medición: 31/07/2023		
Muestra	DIÁMETRO (cm)	
	<i>Método Tradicional</i>	<i>Aeroponía</i>
1	5,4	6
2	6	7,2
3	6,5	8
Fecha de medición: 10/08/2023		
Muestra	DIÁMETRO (cm)	
	<i>Método Tradicional</i>	<i>Aeroponía</i>
1	7,7	12,4
2	8,6	13
3	8	13,5
Fecha de medición: 21/08/2023		
Muestra	DIÁMETRO (cm)	
	<i>Método Tradicional</i>	<i>Aeroponía</i>
1	9	14
2	11,5	15,2
3	10,8	14,4

Fecha de medición: 28/08/2023		
Muestra	DIÁMETRO (cm)	
	Método Tradicional	Aeroponía
1	16	24
2	18	27,3
3	17,5	26,5

En la **Figura 38** se exponen los resultados de diámetros medidos en las tres muestras de lechuga, 28 de agosto de 2023, donde la técnica de aeroponía obtiene valores más altos a diferencia del método tradicional.

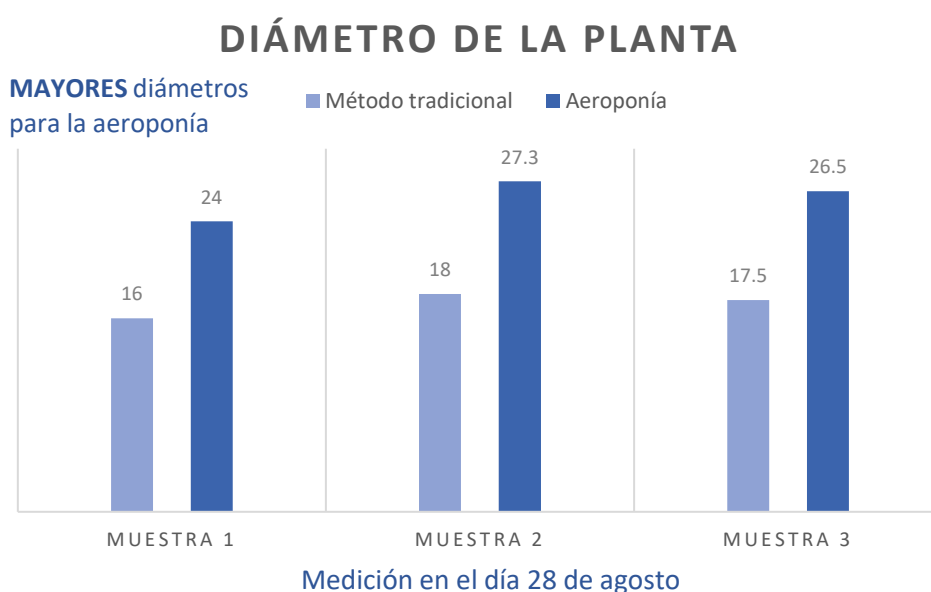


Figura 38. Comparación del método tradicional y la aeroponía con respecto al diámetro.

- **Tamaño de raíces**

El tamaño de las raíces está relacionado con la absorción de los nutrientes y la oxigenación, en el caso de la aeroponía las raíces están suspendidas y son una parte indispensable para el crecimiento y desarrollo de las plantas, motivo por el cual se toma en cuenta para la evaluación del progreso del cultivo; sin embargo, en el método tradicional las raíces no se encuentran visibles, por consiguiente, se optó por realizar una medición final con fecha 28 de agosto de 2023.

En la **Figura 39 (a y b)** se puede observar el tamaño de las raíces en las plantas cultivadas por el método tradicional y la técnica aeropónica, respectivamente.



a) Método tradicional b) Técnica aeropónica

Figura 39. Tamaño de las raíces de las plantas.

6.3.1.2 Análisis de producción.

El análisis de la producción de lechuga utilizando el método tradicional y la aeroponía proporciona información para determinar que técnica es más eficiente, en esta investigación se consideraron los siguientes aspectos para realizar el análisis de producción:

- **Rendimiento del cultivo**

Para determinar el rendimiento del cultivo de los dos métodos, se evaluaron factores tales como: pérdidas de producción, enfermedades y plagas del cultivo.

Para el método tradicional se obtuvo un 40 % a 47 % de pérdidas de producción, como se expone en la **Figura 40**, debido a condiciones climáticas inadecuadas y la presencia de malezas que dificultaron el desarrollo de las plantas; por otra parte, las enfermedades y plagas son más frecuentes al cultivar en el suelo, debido a que patógenos y enfermedades fungicidas se desarrollan con mayor facilidad en ambientes húmedos, como lo es la tierra, por este motivo, el uso de pesticidas y fertilizantes es mayor, lo que contribuye a la contaminación ambiental y del producto, ocasionando que sea nocivo y poco seguro para el consumo.



Figura 40. Pérdida de producción en el método tradicional.

En el caso de la técnica de aeroponía las pérdidas de producción fueron del 13,2 %, como se muestra en la **Figura 41**, esto como consecuencia de factores externos como: velocidad del viento y falta de riego durante tres días a consecuencia de una falla eléctrica; sin embargo, más del 86 % del cultivo se recuperó debido a la absorción directa de los nutrientes a través de las raíces libres y suspendidas que es el principio de la aeroponía; asimismo, no existieron enfermedades en el cultivo por el control adecuado de la solución nutritiva.



Figura 41. Pérdidas de producción con la técnica de aeroponía.

6.3.2 Control de parámetros de la solución nutritiva

El dispositivo de monitoreo permitió controlar tres parámetros indispensables para el desarrollo y crecimiento adecuado de las plantas, gracias a la aplicación móvil “Tuya Smart” se efectuó un mayor control de las condiciones establecidas para el cultivo de lechuga. Además, la exportación de datos facilitó el análisis de los parámetros.

- **Temperatura**

Para el cultivo de lechuga el rango de temperatura ideal es de 15 °C a 25 °C, en la **Figura 42** se presenta la variación de los datos de temperatura de la solución nutritiva monitoreados a lo largo del ciclo del cultivo (40 días), teniendo un promedio de 20,43 °C; además, se puede observar que el valor de la temperatura se encuentra dentro del rango, a excepción del 19 de agosto donde se presentó una temperatura ambiente de 23 °C, ocasionando un aumento de temperatura en la solución nutritiva de 25,4 °C.

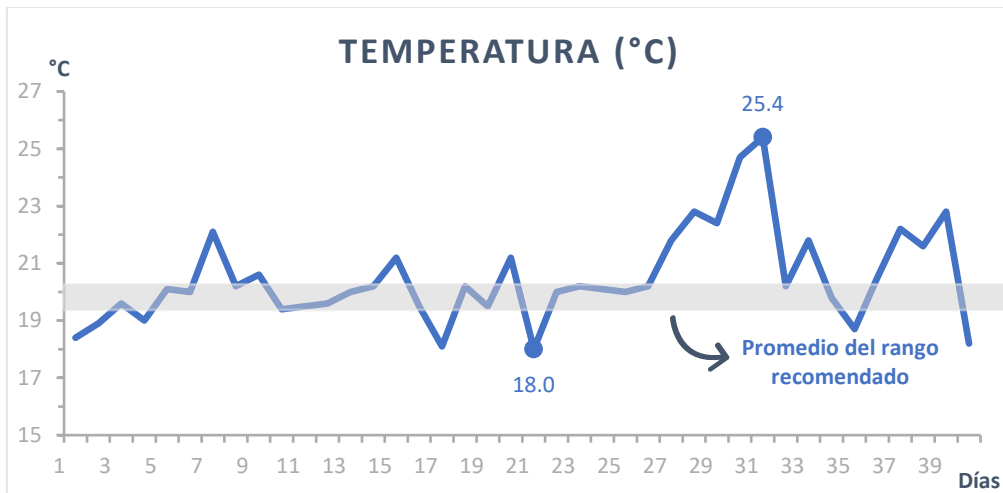


Figura 42. Valores de temperatura de la solución nutritiva.

- **Valores de pH**

El monitoreo del pH de la solución nutritiva es la parte más importante para garantizar un buen desarrollo de las plantas, ya que este factor permite determinar la disponibilidad de nutrientes en el agua. En el caso del cultivo de lechuga el rango del pH puede variar entre 5,5 a 6,5, ligeramente ácido, para una absorción óptima de los nutrientes, en la **Figura 43** se muestra la variación de los datos nivel de pH de la solución monitoreados a lo largo del ciclo del cultivo, obteniendo un promedio de 5,76, con un valor máximo registrado de 6,20 para el día 23 de julio y un mínimo registrado de 5,43 para el día 3 de agosto.



Figura 43. Niveles de pH de la solución nutritiva.

- **Conductividad eléctrica (EC) o sales disueltas**

Los valores de la conductividad eléctrica en la solución nutritiva determinan la concentración de sales y minerales disueltos en el agua, por ende, la cantidad de nutrientes presentes en la solución. En el caso del cultivo de la lechuga, se recomienda valores entre 1,8 a 3 mS/cm (1800 a 3000 μ S/Cm). En la **Figura 44** se exponen los resultados del monitoreo de

la conductividad eléctrica en la solución nutritiva que abastece al cultivo implementado, observando que la variación es intensa debido al consumo e incremento de nutrientes en la solución, siendo este un parámetro difícil de mantener, dentro del rango recomendado, mediante métodos de manuales. Se presentaron valores mínimos de 1250 y 1284 $\mu\text{S}/\text{cm}$, un máximo de 2920 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y un promedio de 1984 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a lo largo del ciclo del cultivo.

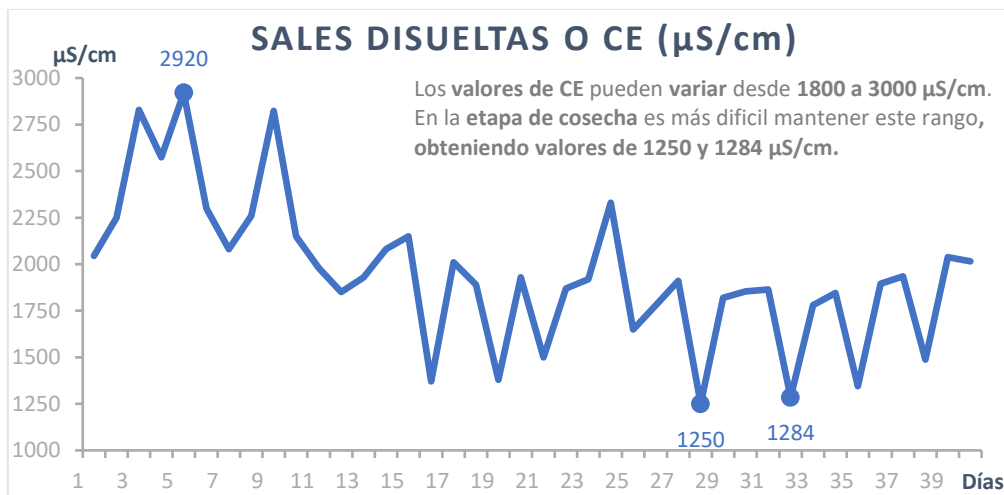


Figura 44. Valores de conductividad eléctrica EC.

6.3.3 Eficiencia del uso del recurso hídrico

En la **Tabla 26** se presenta el consumo de agua para 20 plantas en un periodo de 40 días (desde el 20 de julio al 28 de agosto) en el método tradicional y técnica aeropónica.

Tabla 26. Consumo hídrico en los métodos tradicional y técnica aeropónica.

Semana	Días	Promedio del consumo hídrico (lt)	
		MÉTODO TRADICIONAL	AEROPONÍA
1	20 al 30 de julio	7	0,17
2	31 de julio al 09 de agosto	12,5	1,11
3	10 al 20 de agosto	28,5	2,08
4	21 al 28 de agosto	31	2,08

Asimismo, la **Figura 45** expone una representación de estos datos para facilitar la comprensión del uso del recurso hídrico por cada método, donde se puede observar que la aeroponía disminuye el uso de agua en un 93 % aproximadamente, frente al método tradicional; adicionalmente, al contar un sistema de recirculación las pérdidas del recurso son mínimas, por ende, la eficiencia del uso de este recurso es superior. Además, el gráfico indica que, a medida que las plantas crecen se incrementa el uso de solución nutritiva o agua, debido al incremento de ciclos de riego y demanda de nutrientes del cultivo.

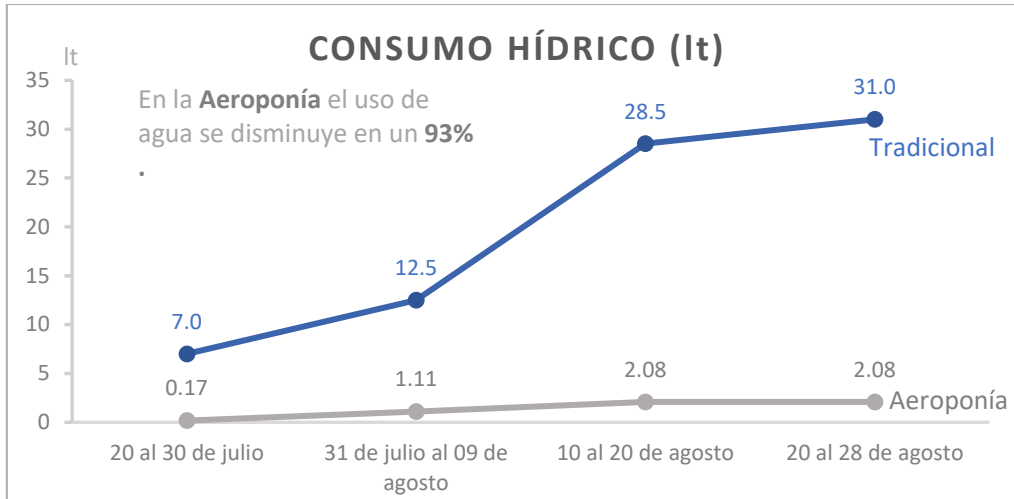


Figura 45. Comparación del consumo hídrico en el método tradicional y aeroponía.

6.3.4 Consumo energético del cultivo

Aplicando la **Ecuación 13** se obtiene el consumo de energía del cultivo, en el caso de la bomba se considera que las horas del uso del dispositivo (**Anexo 8**) están dadas por los ciclos de riego previamente establecidos (sección 6.2.1.4 – **Tabla 22**), obteniéndose los resultados que se exponen a continuación:

$$CE_{bomba} = P_{bomba} \times T_{bomba}$$

$$T_{bomba} = \sum \text{frecuencias de riego} = 76,33 \text{ h}$$

$$CE_{bomba} = 23W \times 76,33h = 1755,6Wh$$

Para el dispositivo de monitoreo se mantuvo conectado 24 horas al día durante 40 días, obteniendo el siguiente valor:

$$CE_{monitor} = P_{monitor} \times T_{monitor}$$

$$CE_{monitor} = 12W \times 960 \text{ h} = 11520Wh$$

Para obtener el consumo energético total del cultivo, se suman los dos de consumo establecidos, teniendo así el consumo de energía en 40 días que se expone a continuación:

$$CE_{Total} = (1755,6 + 11520)Wh = 13275,6Wh$$

$$CE_{Total} = 13,28kWh$$

Además, se calculó el valor económico que representa el consumo de 13,28 kWh al mes, obteniendo el valor que se expone a continuación:

$$Costo_{energ} = Tarifa \times Consumo_{energético}$$

$$Costo_{energ} = 0,092 \frac{USD}{kWh} \times 13,28kWh$$

$$Costo_{energ} = 1,22 USD$$

7. Discusión

La investigación de este proyecto se ha centrado en construir y validar un prototipo de cultivo hidropónico que se pueda implementar en áreas urbanas como terrazas, departamentos o espacios reducidos, optimizando recursos y facilitando la obtención de alimentos orgánicos y libres de contaminantes nocivos, cómo lo son los pesticidas y fertilizantes. El uso de hidroponía ha tenido impactos significativos en la agricultura urbana, ya que la producción de alimentos propios ayuda a mitigar el déficit alimentario existente debido a la sobrepoblación y escasas de áreas y recursos para cultivar de forma tradicional; según un estudio realizado en Quito por Montero U. (2016), el 94,9 % de los encuestados están interesados por cultivar sus propias hortalizas y el 97 % desearía tener un modelo enfocado en el cultivo urbano.

Es así que, existen varias técnicas hidropónicas aplicables a la agricultura urbana; sin embargo, de acuerdo a los resultados del análisis de las características de cada una de las técnicas evaluadas en esta investigación, se obtuvo que la más adecuada para estos espacios es la Técnica de la Aeroponía, con un 80 % de eficiencia frente a otras técnicas hidropónicas, criterio similar a lo manifestado por Lakhari et al. (2018) en su publicación, donde señala que los sistemas aeropónicos son de alto rendimiento, eficientes en el uso de recursos, ideales para interiores, otorgan alimentos más higiénicos al no utilizar suelo y a la hora de cosechar es la más cómoda. Por otra parte, Meza A. (2018) aclara que a partir de una comparación de tres técnicas hidropónicas (aeroponía, sistema NFT y cultivo en grava) la aeroponía presentó plantas con mejor desarrollo vegetativo que las otras técnicas, gracias a la excelente oxigenación que se le proporciona a las raíces. Asimismo, un estudio realizado por la National Aeronautics and Space Administration (NASA) (2006) reveló que los sistemas aeropónicos se pueden aplicar para cultivar plantas en el espacio gracias a su adaptabilidad y gestión eficiente de recursos. Esto afirma que la aeroponía presenta diversas ventajas frente a otras técnicas hidropónicas.

En cuanto al diseño del prototipo, la elaboración de una matriz de ponderación y el análisis de las ventajas y desventajas, de los tres modelos propuestos, facilita la selección del modelo más adecuado para el cultivo de lechuga; obteniendo así, para el modelo 3 (**Figura 27**) un 89 % de correlación con las características requeridas; sin embargo, según el autor Gutierrez, (2018) el segundo modelo presenta una mayor optimización de los materiales de construcción, facilidad de manipulación de la solución nutritiva y manufactura sencilla, pero en el caso del diseño 3; los materiales se usan de manera eficiente, por lo tanto no existen residuos, posee una mayor estabilidad y no es necesario la instalación de un tanque colector ya que la base de soporte cumple esta función, optimizando mejor el espacio; además, permite

mayor número de plantas en un espacio similar al utilizado por el modelo 2. Es por estas razones que se determinó que el modelo 3, es el más conveniente para esta investigación.

Con respecto al diseño de la red de distribución de agua y nutrientes, al tener una estructura de cuatro torres que deben ser abastecidas al mismo tiempo con caudal similar, se optó por una distribución de un ramal principal y dos secundarios que, a su vez, distribuyen la solución nutritiva a dos torres cada una (**Figura 14**). Para la distribución, es necesario el uso de una bomba; Hydro Environment (2016) en su blog menciona que el uso de una bomba otorga una administración mejorada de los recursos, disminuye el uso de la mano de obra y favorece el rendimiento de la producción, gracias a una distribución más adecuada del agua y nutrientes al cultivo. Es por esto que la potencia de la bomba que abastecerá al sistema se determinó mediante una metodología analítica, teniendo en cuenta los requerimientos del sistema como: un caudal total $18 \frac{L}{min}$ y un cabezal total de 2,5 m, con esto se seleccionó una bomba centrífuga sumergible de potencia 23 W, debido a que comercialmente es la más aproximada a los parámetros requeridos por el sistema.

Se utiliza para el monitoreo del cultivo un monitor de variables de la solución nutritiva: pH, sales disueltas o EC y temperatura, que son factores indispensables para el crecimiento y desarrollo adecuado de las plantas; ya que, como señala Valles F. (2020) en su estudio, estos parámetros representan las cantidades y número de nutrientes disponibles en la solución nutritiva. De la misma manera, autores como Rendón (2013) y Smithers Oasis (2015) expresan que el controlar y mantener los rangos adecuados de estos parámetros, según requiera cada cultivo, permite una buena absorción, favorece las propiedades nutricionales de las especies e influye directamente en la producción, desarrollo y calidad de los frutos. Igualmente, González (2021) manifiesta que al no realizar el control del pH y conductividad eléctrica se puede llegar a puntos de toxicidad elevados o insuficiencia de nutrientes esenciales para el cultivo. Por estas razones, se seleccionó un dispositivo de monitoreo que proporciona una recopilación de datos en línea a través de la red wifi, para un control 24/7 del estado de la solución; además el equipo seleccionado, cuenta con una aplicación móvil, que permite la visualización de cada uno de los parámetros históricos y en tiempo real desde un teléfono inteligente previamente conectado con el dispositivo; otra de las ventajas es la opción de establecer alarmas para cada uno de los parámetros cuando existan valores fuera del rango establecido, donde, para el caso del pH el rango es de 5,5 hasta 6,5, sales disueltas o EC de 1,3 hasta 3 mS/cm y temperatura de 13 °C hasta 25 °C.

Finalmente, la validación del prototipo se basó en cultivar 144 lechugas (*Lactuca sativa*), con la finalidad de comparar el método tradicional con la técnica aeropónica, conocer cómo varían los parámetros a lo largo del ciclo del cultivo, determinar la eficiencia del uso del recurso hídrico en cada método de cultivo y calcular el consumo energético del cultivo aeropónico. Se obtuvo que el método tradicional posee una productividad del 50 % al 55 %, mientras que la aeroponía obtuvo el 88.7 %; sin embargo, este valor puede ascender con un control totalmente automatizado del cultivo. Criterio similar a lo señalado por Marulanda (2003) en su investigación, en el cual expone que la producción del cultivo de lechuga tradicionalmente es de 52 ton por año, mientras que aplicando la hidroponía se logran 313 ton por año, reflejando 6 veces más de productividad. Otro índice importante es el dado por Resh (2013), en donde realiza una comparación de la producción entre el cultivo en tierra e hidroponía, obteniendo para el uso de la tierra un total de 6 a 10 ton por cada hectárea (ha) y en hidroponía, 23 ton por cada ha, siendo casi el triple de rentable. Además, un estudio de la NASA (2006) reveló que, utilizando la aeroponía, el tiempo de cultivo disminuye en un 45 % ocasionando mayor número de cosechas al año.

En lo que concierne a la variación y control de los parámetros de la solución nutritiva, varios documentos técnicos de hidroponía enfocan especial interés en el monitoreo del pH, EC y temperatura de la solución, puesto que están relacionadas con la concentración de nutrientes, es así que Resh (2013) y Smithers Oasis (2015) recomiendan un control diario de estos parámetros para tener éxito en el cultivo. En esta investigación, con la implementación del monitor de parámetros específicos para hidroponía, se observó, durante los 40 días del ciclo del cultivo, que la temperatura y el nivel de pH se mantuvieron dentro de los rangos recomendados, con un promedio de 25,4 °C y 5,76 respectivamente; no obstante, en el caso de EC o sales disueltas, la variación es intensa debido al consumo e incremento de nutrientes en la solución, adquiriendo un promedio de 1 984 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Dentro de la validación del prototipo, uno de los factores más importantes es la eficiencia del uso del recurso hídrico; ya que un reporte de la FAO (2022) explica que alrededor del 86 % del agua dulce, disponible en el mundo, es utilizada por la agricultura, extrayendo 2 950 km³ por año, un índice bastante alto considerando que solo el 2,5 % del agua de la tierra es agua dulce, es por esta razón que diversos organismos protectores del medio ambiente y activistas ambientales buscan efectuar proyectos que ayuden a ahorrar el consumo de agua. En el caso de la aeroponía, en esta investigación se tuvo una disminución del uso del agua en un 93 %, esto concuerda con una investigación realizada por la NASA (2006) donde expone que

la aeroponía tiene un ahorro de agua del 99 % y nutrientes en un 50 %, de igual manera Rendón, (2013) afirma que esta técnica ahorra el consumo hídrico en un 98 %, convirtiendo así la aeroponía, en una técnica novedosa y eficiente para mitigar el uso excesivo del agua en la agricultura tradicional.

En el caso del consumo energético, se obtuvo que por los 40 días de actividad del prototipo construido se consume 13,28 kWh, teniendo un costo de 1,22 USD al mes, para la ciudad de Loja, ya que la tarifa depende de la empresa distribuidora de energía eléctrica; con este valor se puede corroborar que el gasto energético sería mínimo para la producción de 144 lechugas. Con esto se determina que la construcción e implementación de un prototipo aeropónico es factible para el cultivo de hortalizas en espacios urbanos.

8. Conclusiones

- La técnica hidropónica aplicada en esta investigación fue la aeroponía, seleccionada mediante la elaboración de una matriz de ponderación y la comparación de las ventajas y desventajas, las cuales permitieron conocer y evaluar ciertas características de cada una de ellas. Con esto se obtuvo una valoración de 2,62 para la técnica estacionaria, 2,85 para el caso de flujo y reflujo, 3,02 para el método NFT y 3,98 para la aeroponía alcanzando así un 80 % más de eficiencia con respecto a las otras técnicas hidropónicas, obteniendo mayor puntuación en los criterios referentes a la adaptabilidad en espacios reducidos, eficiencia en el uso de recursos, tipos de cultivos que se pueden plantar mediante esta técnica y fácil abastecimiento de recursos.
- El diseño del prototipo considera la correlación con las características de hermetismo, facilidad de mantenimiento, una mayor cantidad de producción en un área reducida y adaptabilidad a espacios reducidos como terrazas, balcones, departamentos, áreas urbanas en general. El prototipo propuesto se conforma por cuatro torres de igual altura (1,50 m), con 144 orificios en total, 36 por cada torre con una separación de 20 cm, la red de distribución de agua tiene un caudal total de $18 \frac{\text{L}}{\text{min}}$ y un cabezal total de 2,5 m.
- La validación del prototipo, mediante la comparación entre el método tradicional y la técnica aeropónica, presenta resultados que afirman que la aeroponía es más eficiente que la agricultura convencional, obteniendo el 88,7 % de productividad frente al 50 % del método tradicional para el caso analizado; en relación con las pérdidas de producción para la aeroponía se presentaron dificultades externas que ocasionaron un 13 % de pérdidas mientras que para la agricultura convencional ascendieron a 47 % debido a la presencia de plagas y condiciones ambientales. Asimismo, debido a la reducción del ciclo de cultivo en la aeroponía, 40 días, se podrían lograr aproximadamente 10 cosechas al año mientras que tradicionalmente el ciclo dura de 90 a 100 días, provocando menos producción anual. Con respecto al uso del recurso hídrico, con la aeroponía se disminuye el consumo de agua en un 93 %, gracias a la recirculación de la solución nutritiva no existen pérdidas de agua, siendo uno de los factores más importantes para implementar esta técnica.

9. Recomendaciones

- Para futuras investigaciones, se recomienda automatizar totalmente el cultivo, con el fin de conocer si la producción aumentara hasta un 100 %.
- Analizar las variables físicas del lugar en el que se colocará el prototipo como: velocidad del viento, temperatura ambiente, humedad y precipitaciones, radiación solar, entre otras; ya que son factores importantes para el desarrollo adecuado del cultivo y pueden provocar pérdidas en el cultivo. Asimismo, para estudios posteriores se recomienda implementar un prototipo en ambientes con baja radiación solar, con la finalidad de conocer la evolución del cultivo en áreas con escasa radiación solar.
- Analizar el rendimiento del prototipo hidropónico con el uso de luz artificial tipo UV-A o UV-B en sustitución de la luz natural, exclusivo para ambientes de cultivo interior o con ausencia de luz natural. Con el fin de monitorear la evolución y la productividad del cultivo; además, de determinar si esta luz puede ayudar al desarrollo y crecimiento de las plantas en estos ambientes.
- Si se desea aumentar el número de torres, es necesario volver a calcular los diámetros de las tuberías de distribución y la bomba, ya que la instalada en este proyecto fue seleccionada según los requerimientos del sistema propuesto.
- Se recomienda la instalación de un sistema de alarma para fallas por falta de energía en el cultivo, ya que depende de esto para el bombeo de la solución nutritiva, de esta manera se evitan pérdidas y estrés hídrico en las plantas.

10. Bibliografía

- Albuja, V., Andrade, J., Lucano, C., & Rodríguez, M. (2021). Comparativa de las ventajas de los sistemas hidropónicos como alternativas agrícolas en zonas urbanas. *Minerva*, 2(4), 45–54. <https://doi.org/10.47460/minerva.v2i4.26>
- Bazan, A., Carranza, G., Dellepiane, S., Obregón, J., & Pupuche, J. (2021). *Diseño de sistemas hidropónicos modulares para los hogares de la ciudad de Piura* [Universidad de Piura]. https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/5415/PYT_Informe_Final_Proyecto_SistemasHidroponicos.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Beltrano, J., & Gimenez, D. (2015). *Cultivo en hidroponía*. <https://doi.org/10.35537/10915/46752>
- Brenes Peralta, L., & Jimenez Morales, M. F. (2014). Manual de producción hidropónica para hortalizas de hoja en sistema NFT (Nutrient Film Technique). In *Tecnologico de costa Rica*.
- Carrasco, G., & Izquierdo, J. I. (2015). Manual técnico: La empresa hidropónica de mediana escala: La técnica de solución nutritiva recirculante (“NFT”). In *Organizacion de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación (FAO)* (Issue May). <https://www.researchgate.net/publication/277012808>
- Castellanos, J. Z. (2009). *Manual de Produccion de Tomate en Invernadero* (p. 457).
- Castrillón, D., & Duque, F. (2019). *Estudio de viabilidad financiera de los cultivos hidropónicos en el Oriente Antioqueño*. <https://n9.cl/bl2g0>
- Cevallos M., M. (2020). *Aplicación de soluciones nutritivas en variedades de lechuga en cultivo hidropónico bajo el sistema NFT*. Universidad Técnica de Cotopaxi.
- Cuasapaz, P. (2021). *Cultivos hidropónicos (hidroponía)*. AgropPROD. <https://www.agroprod.com/agricultura/hidroponia/>
- De la Rosa T., P., & Herrera V., I. A. (2015). *La producción hidropónica ¿una alternativa alimentaria en espacios urbanos?* [Universidad Autónoma del Estado de México]. <http://hdl.handle.net/20.500.11799/49265>
- Efecto led. (2020). *Temporizador o timer eléctrico*. <https://www.efectoled.com/blog/es/timer-electrico-usos/%0Ahttp://www.efectoled.com/blog/timer-electrico-usos/>
- FAO. (2022). *The state of the world's lan and water resources for food and agriculture 2021*. <https://doi.org/doi.org/10.4060/cb9910en>
- Gómez R., J. (2014). *Agricultura urbana en América Latina y Colombia: Perspectiva y elementos agronómicos diferenciadores* (Issue 1). Universidad Nacional Abierta y a Distancia.

- González, O. (2021). *Estudio de factibilidad de una granja urbana de cultivos hidropónicos localizado en la ciudad de Quetzaltenango, Quetzaltenango*. Universidad del Valle de Guatemala.
- Green Lab. (2020). *Quiénes Somos*. <http://www.greenlab.com.ec/quienes-somos>
- Growlet. (n.d.). *Controladores automáticos de pH y EC para el agua de riego*. Growlet Web Site. <https://n9.cl/sryteg>
- Gutierrez, J. (2018). Diseño y manufactura de un sistema aeropónico [Universidad de Los Andes]. In *Universidad de los Andes*. <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/39567/u821711.pdf?sequence=1>
- Hotten, R. (2019). Agricultura vertical: el boom del millonario negocio de las frutas y verduras futuristas que crecen en las ciudades. *BBC News Mundo*. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-49530857>
- Huerto Urbano Grow. (n.d.). *Controlador automático de EC y pH*. Huerto Urbano Grow Web Site. <https://n9.cl/9uyrw>
- Hydro Environment. (2016). *Ventajas de las bombas de agua para La producción Agrícola*. Hidroponia.Mx. <http://hidroponia.mx/ventajas-de-las-bombas-de-agua-para-la-produccion-agricola/>
- Inca Sánchez, S. A. (2013). *Automatización y control del sistema NFT para cultivos hidropónicos*. Universidad Ricardo Palma.
- Kamata, F. (2019). Cómo Japón está revolucionando la agricultura sin tierra ni trabajadores. *BBC News*. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-49784511>
- Lakhiar, I. A., Gao, J., Syed, T. N., Chandio, F. A., & Buttar, N. A. (2018). Modern plant cultivation technologies in agriculture under controlled environment: A review on aeroponics. *Journal of Plant Interactions*, 13(1), 338–352. <https://doi.org/10.1080/17429145.2018.1472308>
- Lecuona, A. (2013, April). Calculating the correct flow rate for open hydroponic systems. *Commercial Hydroponic Farming*. <https://www.commercial-hydroponic-farming.com/flow-rate-irrigation-cycles-dripper-irrigation/>
- Liriano, J., & Rodríguez, S. (2022). *Automatización de un sistema de riego hidropónico en una granja vertical mediante comunicación IOT*. Universidad Politécnica Salesiana.
- López, J. (2018). La producción hidropónica de cultivos. *Idesia (Arica)*, 36, 139–141.
- Marulanda, C. (2003). La Huerta Hidropónica Popular. In *FAO* (Vol. 3, p. 131). <http://www.fao.org/3/a-ah501s.pdf>

- Mataix, C. (2006). *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas* (Segunda, Vol. 2).
- Meza A., M. (2018). Comportamiento de tres técnicas de cultivo hidropónico con lechuga (*Lactuca sativa* L.) en un sistema acuapónico - Echarati- La Convención - Cusco. In *Universidad nacional de san antonio abad del cusco*. <http://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/20.500.12918/3765>
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2019). *Se promueve cultivo hidropónico de frutilla*. 2017. <https://www.agricultura.gob.ec/se-promueve-cultivo-hidroponico-de-frutilla/>
- Ministerio de Ambiente y Agua. (2020). *Proyecto Adaptación a los impactos del cambio climático en recursos hídricos en los Andes (AICCA)*.
- Monge Redondo, M. Á. (2019). *Prontuario de diseño hidráulico para riego por goteo*. Iagua. <https://n9.cl/n9iuc>
- Montero U., M. D. (2016). *Diseño de un sistema de elementos enfocado al cultivo urbano para departamentos. Caso de estudio: Centro norte de Quito* (Vol. 147, Issue March). Universidad de Las Américas.
- Mott, R. (2015). *Mecánica de fluidos* (Séptima).
- Municipio de Loja. (2021). *Políticas públicas de apoyo a la agricultura urbana y periurbana*. 0034-2021 (Issue 034).
- NASA. (2006). Progressive Plant Growing Has Business Blooming. In *NASA Spinoff* (Vol. 2006, pp. 64–67). https://www.nasa.gov/pdf/164449main_spinoff_06.pdf
- Novagric. (2016). *Novedades Agrícolas APR Greenhouses & Technology*. <https://www.novagric.com/es/riego/sistemas-de-riego/riego-hidroponico>
- Oñate, B. (2022). *Implementación de un sistema piloto de cultivo de pasto hidropónico vertical*. Escuela Politécnica Nacional.
- Oñate, L. (2022). *Diseño de sistema de riego aeropónico utilizando energía solar fotovoltaica en comunidad Mapuche* (Issue 8.5.2022) [Universidad de Chile]. <https://n9.cl/r7gqy>
- Oracle. (2021). *¿Qué es el Internet de las cosas (IoT)?* Oracle, Internet-of-Things. <https://www.oracle.com/ar/internet-of-things/what-is-iot/>
- PLASTIGAMA. (2022a). *Catálogo PVC roscable* (p. 2).
- PLASTIGAMA. (2022b). *Catálogo Tubería sanitaria*.
- RED HAT. (2023). *¿Qué es el Internet de las cosas (IoT)?* Red Hat Web Site. <https://www.redhat.com/es/topics/internet-of-things/what-is-iot>
- Rendón, Y. (2013). *Sistemas aeropónicos en agricultura protegida*. Centro de investigación química aplicada.
- Resh, H. M. (2013). *Hydroponic Food Production. A Definitive Guidebook for the Advanced*

- Home Gardener. In *CRC Press*. <https://www.taylorfrancis.com/books/9781439878699>
- Revista Líderes. (2020). *Seis variedades de lechuga acompañan las ensaladas*.
<https://www.revistalideres.ec/lideres/seis-variedades-lechuga-acompanan-ensaladas.html>
- Ricardo, J. (2019). *Evaluación del cultivo de lechuga hidropónica (Lactuca sativa L) en raíz flotante bajo diferentes soluciones*. Universidad Estatal Península de Santa Elena.
- Salgado, S. (2017). Aeroponía. Elaboración de diseños para prototipos de agricultura urbana. *Universidad Iberoamericana Puebla*, 3–8. <http://hdl.handle.net/20.500.11777/3787>
- Smithers Oasis. (2015). Manual de hidroponía. In *Oasis Easy Plant*.
<http://www.oasisfloral.mx/pdf/manual-hidroponia.pdf>
- Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A., & Lovatelli, A. (2022). Producción de alimentos en acuaponía a pequeña escala – Cultivo integral de peces y plantas. In *FAO Documento Técnico de Pesca y Acuicultura No. 589*. FAO.
<https://doi.org/10.4060/i4021es>
- Valarezo, M. J. (2022). Boletín Meteorológico. In *Universidad Nacional De Loja* (Vol. 1).
[http://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/17025/1/TESIS WILSON FERNANDO.pdf](http://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/17025/1/TESIS_WILSON_FERNANDO.pdf)
- Valenzuela N., L. M., Ortiz S., I. A., González C., G., García de la Peña, C., Potisek T., C., Briceño C, E. A., Espino C., D. A., Barraza M., S., & Núñez C., J. A. (2019). Productos orgánicos y fitohormonas: efecto en la concentración de aminoácidos en tubérculos de *Caladium bicolor* en dos etapas fenológicas. *Tópicos Selectos de Sustentabilidad: Un Reto Permanente*, IV(October), 136–155.
- Valles F., J. V. (2020). *Sistema de mezcla de soluciones nutritivas y ácido para un cultivo hidropónico basado en la técnica de película de nutrientes (NFT)*. Universidad Técnica del Norte.

11. Anexos

Anexo 1. Propiedades del agua en unidades del Sistema Internacional

Temperatura (°C)	Peso específico γ (kN/m ³)	Densidad ρ (kg/m ³)	Viscosidad dinámica η (Pa·s)	Viscosidad cinemática ν (m ² /s)
0	9.81	1000	1.75×10^{-3}	1.75×10^{-6}
5	9.81	1000	1.52×10^{-3}	1.52×10^{-6}
10	9.81	1000	1.30×10^{-3}	1.30×10^{-6}
15	9.81	1000	1.15×10^{-3}	1.15×10^{-6}
20	9.79	998	1.02×10^{-3}	1.02×10^{-6}
25	9.78	997	8.91×10^{-4}	8.94×10^{-7}
30	9.77	996	8.00×10^{-4}	8.03×10^{-7}
35	9.75	994	7.18×10^{-4}	7.22×10^{-7}
40	9.73	992	6.51×10^{-4}	6.56×10^{-7}
45	9.71	990	5.94×10^{-4}	6.00×10^{-7}
50	9.69	988	5.41×10^{-4}	5.48×10^{-7}
55	9.67	986	4.98×10^{-4}	5.05×10^{-7}
60	9.65	984	4.60×10^{-4}	4.67×10^{-7}
65	9.62	981	4.31×10^{-4}	4.39×10^{-7}
70	9.59	978	4.02×10^{-4}	4.11×10^{-7}
75	9.56	975	3.73×10^{-4}	3.83×10^{-7}
80	9.53	971	3.50×10^{-4}	3.60×10^{-7}
85	9.50	968	3.30×10^{-4}	3.41×10^{-7}
90	9.47	965	3.11×10^{-4}	3.22×10^{-7}
95	9.44	962	2.92×10^{-4}	3.04×10^{-7}
100	9.40	958	2.82×10^{-4}	2.94×10^{-7}

Fuente: (Mott, 2015)

Anexo 2. Ecuaciones para calcular el factor de fricción (f) según el régimen del fluido

- **Régimen Laminar:**

Si el Número de Reynolds es un valor menor a: ($N_R < 2\,000$)

Según Poiseulle, el factor de fricción esta dado por:

$$f = \frac{64}{N_R}$$

- **Régimen Turbulento:**

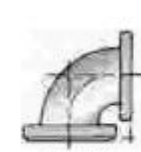
Si el Número de Reynolds es un valor superior a: ($N_R > 4\,000$)

Según P. K. Swamee y A. K. Jain, el factor de fricción esta dado por:

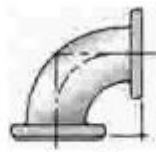
$$f = \frac{0,25}{\left[\log_{10} \left(\frac{1}{3,7 \times \left(\frac{D}{\varepsilon}\right)} + \frac{5,74}{N_R^{0,9}} \right) \right]^2}$$

Información tomada de (Mott, 2015).

Anexo 3. Valores del coeficiente de resistencia (k) según el tipo de accesorio



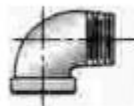
$K = 30f_T$
(a) Codo de 90°



$K = 20f_T$
(b) Codo de 90° y radio largo



$K = 16f_T$
(c) Codo de 45°



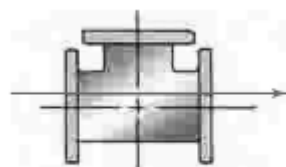
$K = 50f_T$
(d) Codo de 90° para calle



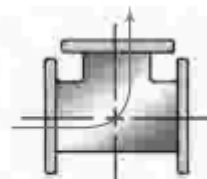
$K = 26f_T$
(e) Codo de 45° para calle



$K = 50f_T$
(f) Codo de retorno



$K = 20f_T$
(a) Flujo por la línea principal



$K = 60f_T$
(b) Flujo por ramificación

Fuente: (Mott, 2015)

Anexo 4. Cálculos del tanque colector – base del cultivo aeropónico

La base del cultivo aeropónico está conformada por tubos y accesorios de 4 pulgadas de diámetro (110 mm), en la **Tabla 27** se muestran los valores de diámetro, diámetro interno y espesor para este tubo.

Tabla 27. Valores de diámetros y espesor de tubos y accesorios.

CÓDIGO	Diámetro	Espesor nominal	Diámetro interno nominal	Longitud campana EC	Longitud útil EC
Unión por cementado solvente	mm	mm	mm	mm	mm
926224	50	1,8	46,4	35	3,0
926225	75	2,0	71,0	60	
926217	110	2,2	105,6	80	
926218	160	3,2	153,6	120	
926219	200	3,9	192,2	150	6,0

Fuente: (PLASTIGAMA, 2022)

De la misma manera en la **Tabla 28** se muestran las características de los elementos utilizados en la construcción de la base del prototipo.

Tabla 28. Características de los elementos de la base del cultivo.

Ítem	Accesorio	Cantidad	Longitud (cm)
1	Codo de 90°	4	-
2	Unión tipo “Tee”	3	-
3	Tubo	4	30
4	Tubo	4	10
5	Tubo	2	12.5
6	Tubo	1	25

Para mejor comprensión observe la **Figura 46**.



Figura 46. Elementos que conforman la base del cultivo hidropónico.

Para una mayor claridad y precisión en los cálculos del volumen total de la base, se dividió la misma en cuatro tramos longitudinales que comprenden:

- **Tramo 1:** Volumen de los cuatro codos de 90°.
- **Tramo 2:** Volumen de la unión tipo “tee” con tubos de 12,5 cm de largo dando una longitud total de 60 cm.
- **Tramo 3:** Volumen de los cuatro tubos de 30 cm de largo.
- **Tramo 4:** Volumen de las dos uniones tipo “tee” con los tubos de 10 cm de largo, dando una longitud total de 55 cm.
- **Tramo 5:** Volumen de la unión central de la base (**Figura 46** - punto 6).

Cabe señalar que para obtener el volumen de los codos de 90° se utilizó el software Autodesk Inventor® para mayor precisión; asimismo, en los cálculos del tramo 5 se considera una longitud de 28 cm debido a que la bifurcación tipo “Y” es desmontable y no forma parte del cálculo del volumen de la base. Entonces, el volumen total de la base se determinó de la siguiente manera:

$$r = \frac{d_i}{2} = \frac{105,6mm}{2} = 52,8mm = 0,0528m$$

$$V_{tramo1} = (V_{codo90} \times 4) = [(80 \times 10^{-6}m^3) \times 4]$$

$$V_{tramo1} = 0,00032m^3$$

$$V_{tramo2} = (\pi \times r^2 \times h_1)$$

$$V_{tramo2} = [\pi \times (0,0528m)^2 \times 0,60m] = 0,00525m^3$$

$$V_{tramo3} = (\pi \times r^2 \times h_2)$$

$$V_{tramo3} = [\pi \times (0,0528m)^2 \times 0,3m] \times 4 = 0,01051m^3$$

$$V_{tramo4} = (\pi \times r^2 \times h_3)$$

$$V_{tramo4} = [\pi \times (0,0528m)^2 \times 0,55m] \times 2 = 0,00963m^3$$

$$V_{tramo5} = (\pi \times r^2 \times h_4)$$

$$V_{tramo5} = [\pi \times (0,0528m)^2 \times 0,28m] = 0,00245m^3$$

$$V_{TOTAL} = V_{tramo1} + V_{tramo2} + V_{tramo3} + V_{tramo4} + V_{tramo5}$$

$$V_{TOTAL} = (0,00032 + 0,00525 + 0,01051 + 0,00963 + 0,00245)m^3$$

$$V_{TOTAL} = 0,02817m^3 = 28,17L$$

Anexo 5. Rugosidad (ϵ) según el tipo de material

Material de construcción	Rugosidad (k: mm)
<u>Tuberías de plástico</u> Poliétileno (P.E.)..... Cloruro de polivinilo (PVC)	0,002 0,02
<u>Tuberías metálicas</u> Tuberías estiradas, sin soldaduras de latón, cobre, plomo..... Aluminio.....	0,0015 - 0,01 0,015 - 0,06
<u>Acero estirado sin soldaduras:</u> Nuevas..... Después de muchos años en servicio.....	0,02 - 0,10 1,2 - 1,5
<u>Acero galvanizado:</u> Nuevas, buena galvanización..... Galvanización ordinaria.....	0,07 - 0,10 0,10 - 0,15
<u>Fundición:</u> Nuevas..... Nuevas con revestimiento bituminoso..... Asfaltadas..... Después de varios años en servicio.....	0,25 - 1,00 0,10 - 0,15 0,12 - 0,30 1,00 - 4,00
<u>Hormigón y fibrocemento:</u> - <u>Hormigón:</u> Superficie muy lisa..... Condiciones medias..... Superficie rugosa..... Hormigón armado..... - <u>Fibrocemento (F.C.):</u> Nuevas..... Después de varios años en uso.....	0,3 - 0,8 2,5 3 - 9 2,5 0,05 - 0,10 0,60

Fuente: (Sotelo, 1998)

Anexo 6. Tuberías comerciales de polietileno (PE)

DATOS TÉCNICOS														
DIMENSIONES	DIÁMETRO INTERNO	N/A	N/A	N/A	1/2	3/4	3/4	1"	1" 1/4	1" 1/2	2"	3"	4"	
		11,7mm	11,5mm	11,08mm	12,7mm	19mm	19mm	25,4mm	31,75mm	38,1mm	50,8mm	76,2mm	101,6mm	
	DIÁMETRO EXTERNO	15,5mm	16mm	16mm	20mm	22mm	25mm	32mm	40mm	50mm	63mm	90mm	110mm	
ESPESOR DE PARED	1,9mm	2,25mm	2,46mm	3,65mm	1,5mm	3mm	3,3mm	4,12mm	5,95mm	6,1mm	6,9mm	8,4mm		
PRESIÓN DE TRABAJO	150 PSI	200 PSI	250 PSI	250 PSI	200 PSI	250 PSI	200 PSI	200 PSI	200 PSI	200 PSI	200 PSI	200 PSI	200 PSI	
PRESIÓN DE ROTURA	300 PSI	400 PSI	500 PSI	500 PSI	400 PSI	500 PSI	400 PSI	400 PSI	400 PSI	400 PSI	400 PSI	400 PSI	400 PSI	
TOLERANCIA DIMENSIONAL	3%													
RANGO DE TEMPERATURA	Desde -10°C hasta 60°C													
CONSTRUCCIÓN	Monocapa													
MATERIAL (Interior)	Polietileno de baja densidad													
MATERIAL (Exterior)	N/A													
REFUERZO	N/A													
COLOR	Negro con raya azul													
PRESENTACIÓN	Rollos de 50, 80, 90 y 100 metros													

Fuente: (PLAxCO, 2022)

Anexo 7. Tuberías comerciales de policloruro de vinilo (PVC)



Tabla 29. Valores de diámetros y espesor de tubos y accesorios de tubería roscada.

Diámetro plg	CÓDIGO	Diámetro exterior	Espesor mm	Diámetro interior	Presión de trabajo		
		mm		mm	psi	MPa	kg/cm ²
1/2	926092	21,34	3,73	13,88	420	2,90	29,5
3/4	926094	26,67	3,91	18,85	340	2,34	23,9
1	926091	33,40	4,55	24,30	320	2,21	22,5
1 1/4	926090	42,16	4,85	32,46	260	1,79	18,3
1 1/2	926089	48,26	5,08	38,10	240	1,65	16,9
2	926093	60,32	5,54	49,24	200	1,38	14,1

Fuente: (PLASTIGAMA, 2022)

Anexo 8. Cálculo de las horas de funcionamiento de la bomba centrífuga

Para el cálculo de las horas de funcionamiento totales en un tiempo de 40 días, que fue la actividad del cultivo, se tomó en cuenta las frecuencias de riego establecidas en la **Tabla 22**, para temperatura crítica, es decir, los tiempos dados para $T_{amb} \geq 23 \text{ }^\circ\text{C}$.

- **Plántula:**

$$T_{plántula} = T_{encendido} \times días_{etapa}$$

$$T_{plántula} = [(20 + 45 + 20)min] \times 12 = 780 \text{ min}$$

- **Estado vegetativo:**

$$T_{vegetativo} = T_{encendido} \times días_{etapa}$$

$$T_{vegetativo} = [(30 + 30 + 30 + 30)min] \times 20 = 2400 \text{ min}$$

- **Madurez:**

$$T_{madurez} = T_{encendido} \times días_{etapa}$$

$$T_{madurez} = [(45 + 20 + 45 + 20 + 45)min] \times 8 = 1400 \text{ min}$$

TIEMPO TOTAL:

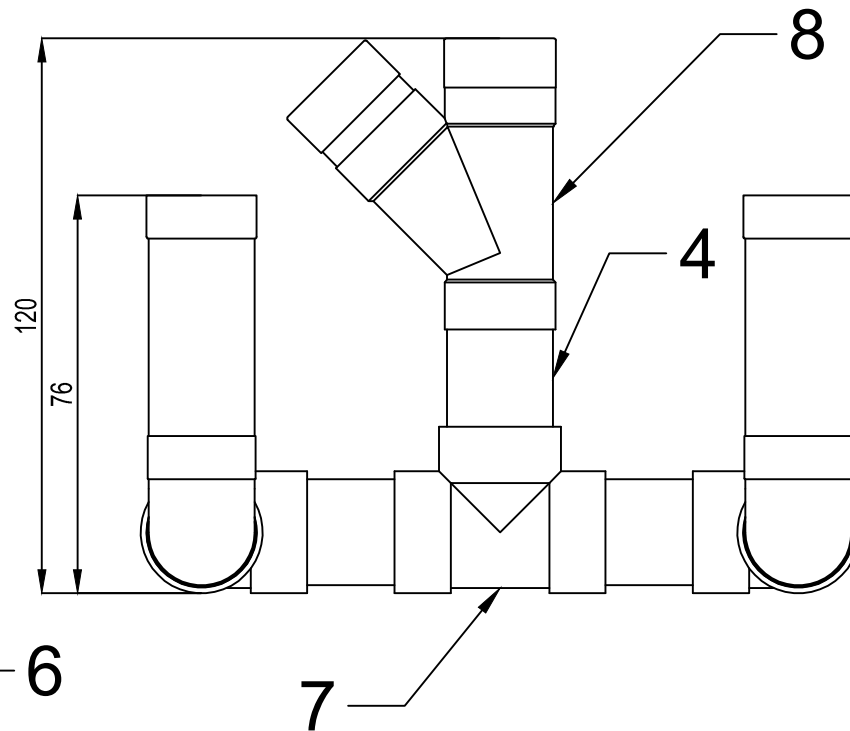
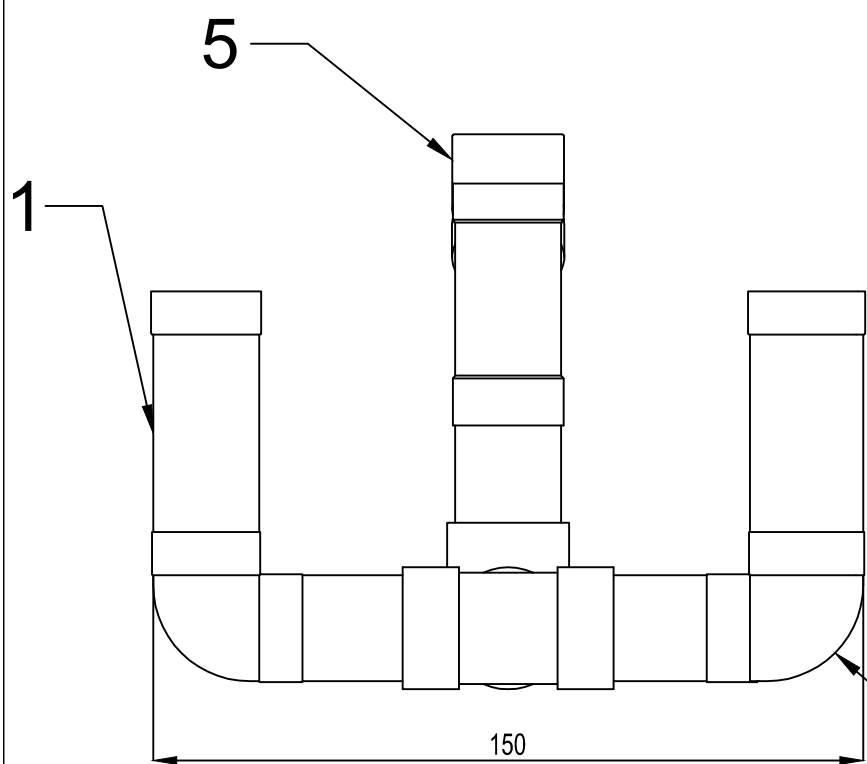
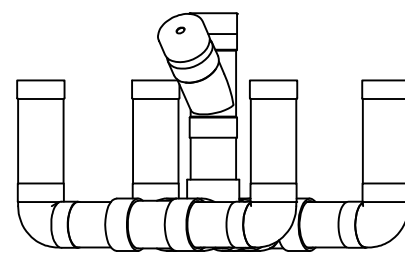
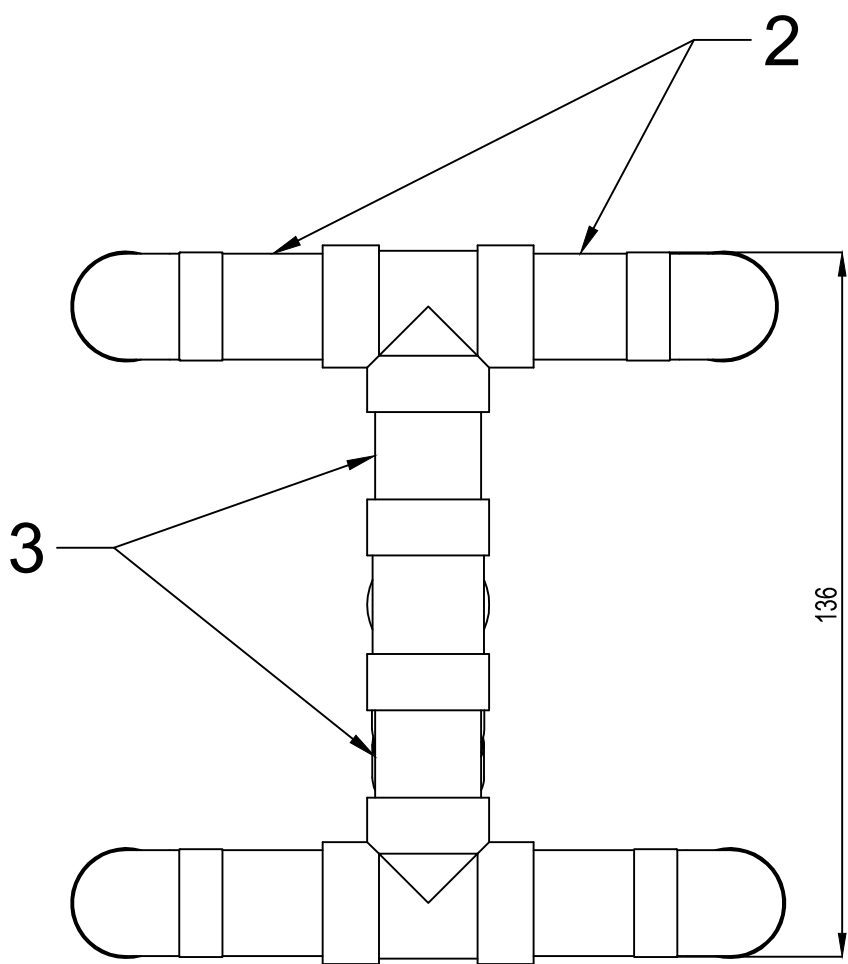
$$T_{bomba} = \sum \text{frecuencias de riego}$$

$$T_{bomba} = (780 + 2400 + 1400)min = 4580min$$

$$T_{bomba} = 4580min \times \frac{1h}{60min} = 76,33h$$

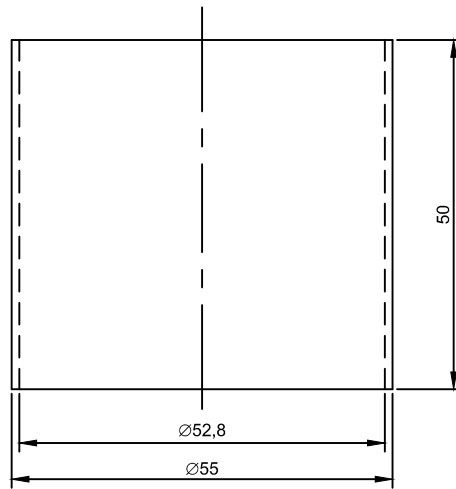
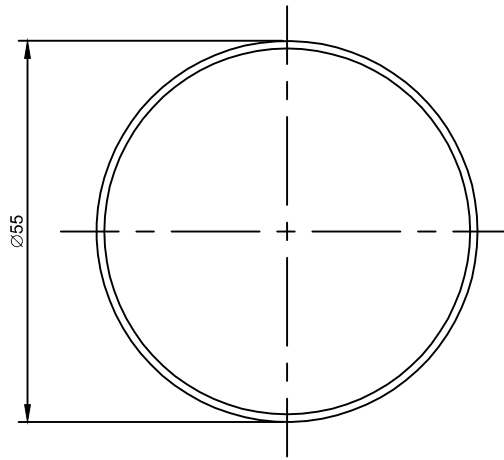
$$\mathbf{T_{bomba} = 76,33h}$$

Anexo 9. Planos del prototipo construido.

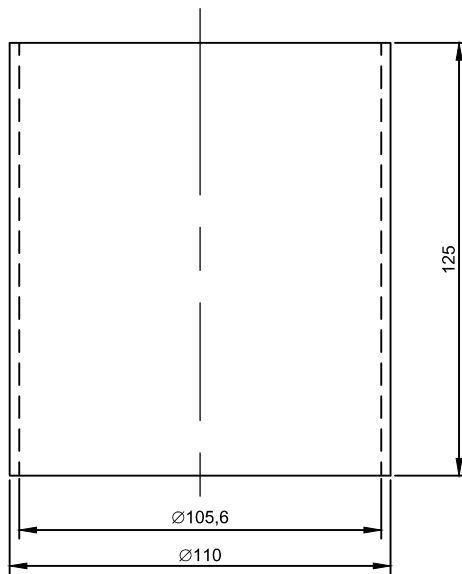
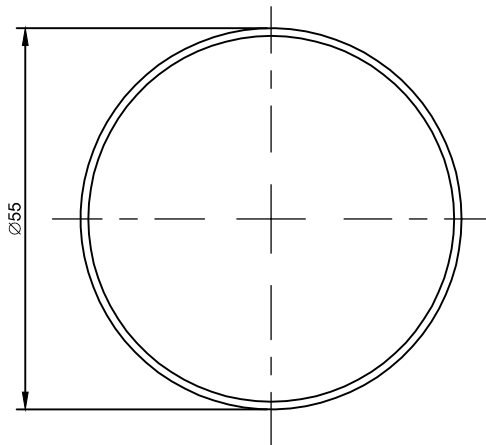


1	Bifurcación tipo "Y"	INEN 1373	PVC	8			Ø4"
3	Tee	INEN 1373	PVC	7			Ø4"
4	Codo 90°	INEN 1373	PVC	6			Ø4"
1	Sección E	CPE-INEN	PVC	5	01.01.05		Ø4"
1	Sección D	CPE-INEN	PVC	4	01.01.04		Ø4"
2	Sección C	CPE-INEN	PVC	3	01.01.03		Ø4"
4	Sección B	CPE-INEN	PVC	2	01.01.02		Ø4"
4	Sección A	CPE-INEN	PVC	1	01.01.01		Ø4"
No. de pieza	Denominación	N. de norma o dibujo	Material	No. de orden	Numero del modelo	Peso	Observaciones

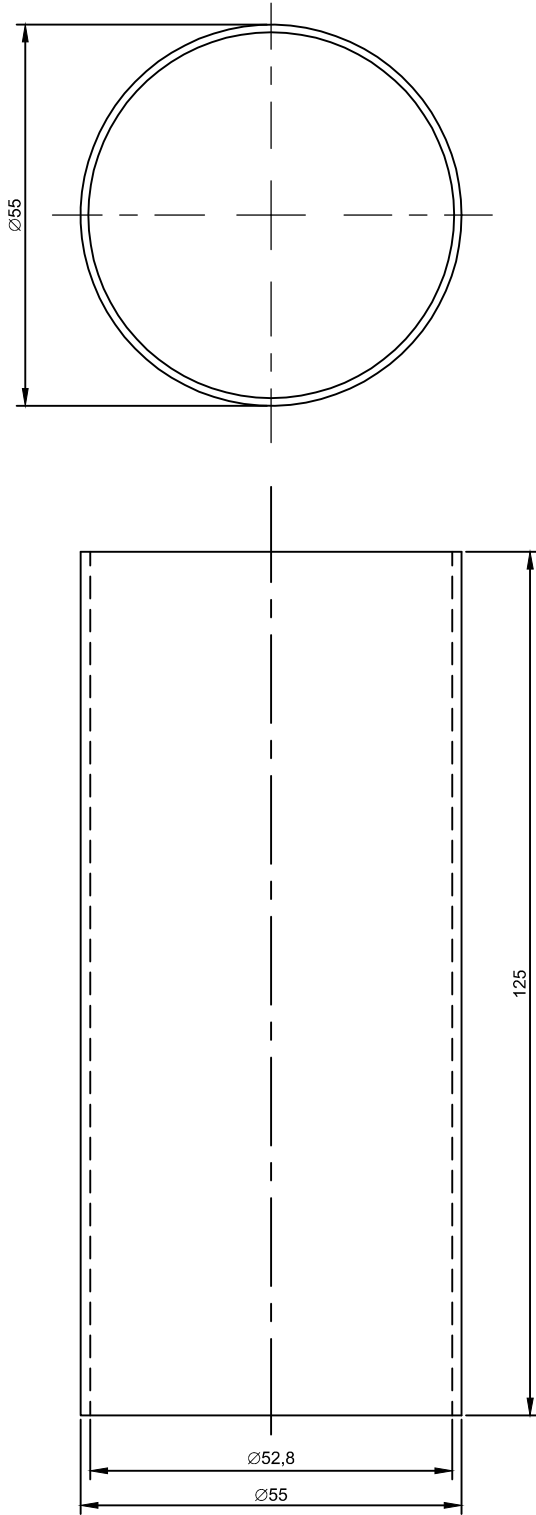
				Tolerancia	Peso	Materiales	
				Fecha	Nombre	Denominación BASE DEL PROTOTIPO / TANQUE COLECTOR	Escala 1:5
				Dib.	Wendy Chuquimarca		
				Rev.			
				Aprob.			
						Numero de dibujo 01.01.00	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				



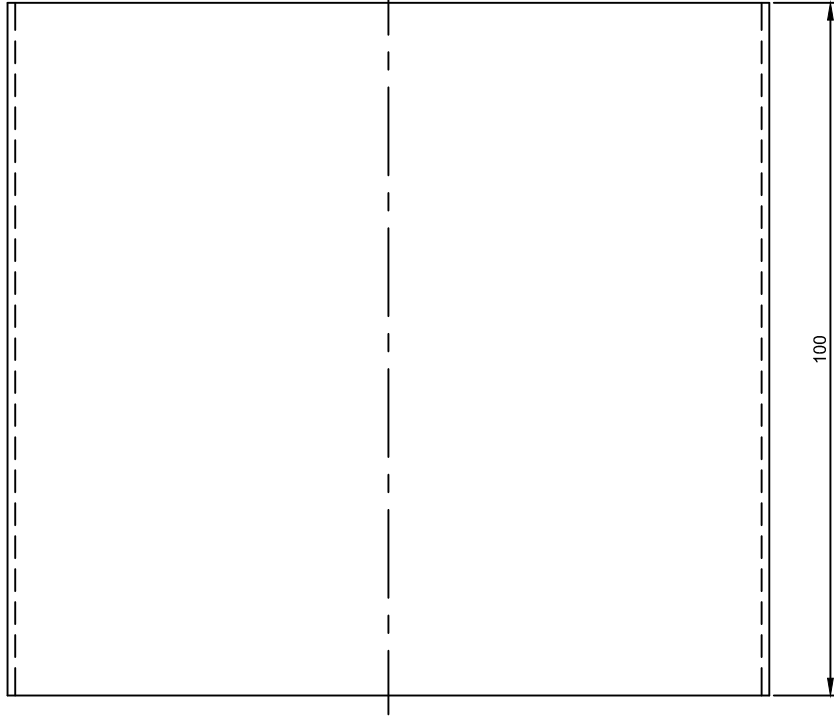
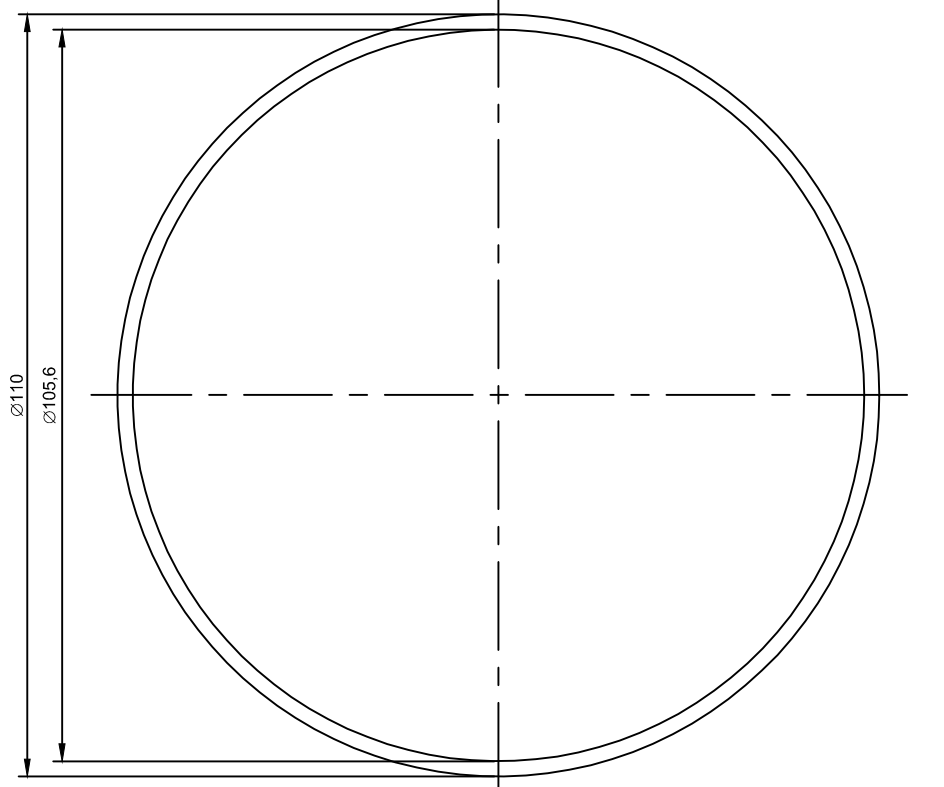
				Tolerancia	Peso	Materiales Policloruro de vinilo PVC	
						Denominación Sección B	Escala 1:2
				Fecha	Nombre		
				Dib.	Wendy Chuquimarca		
				Rev.			
				Aprob.		Número de dibujo 01.01.02	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre		4 unidades		



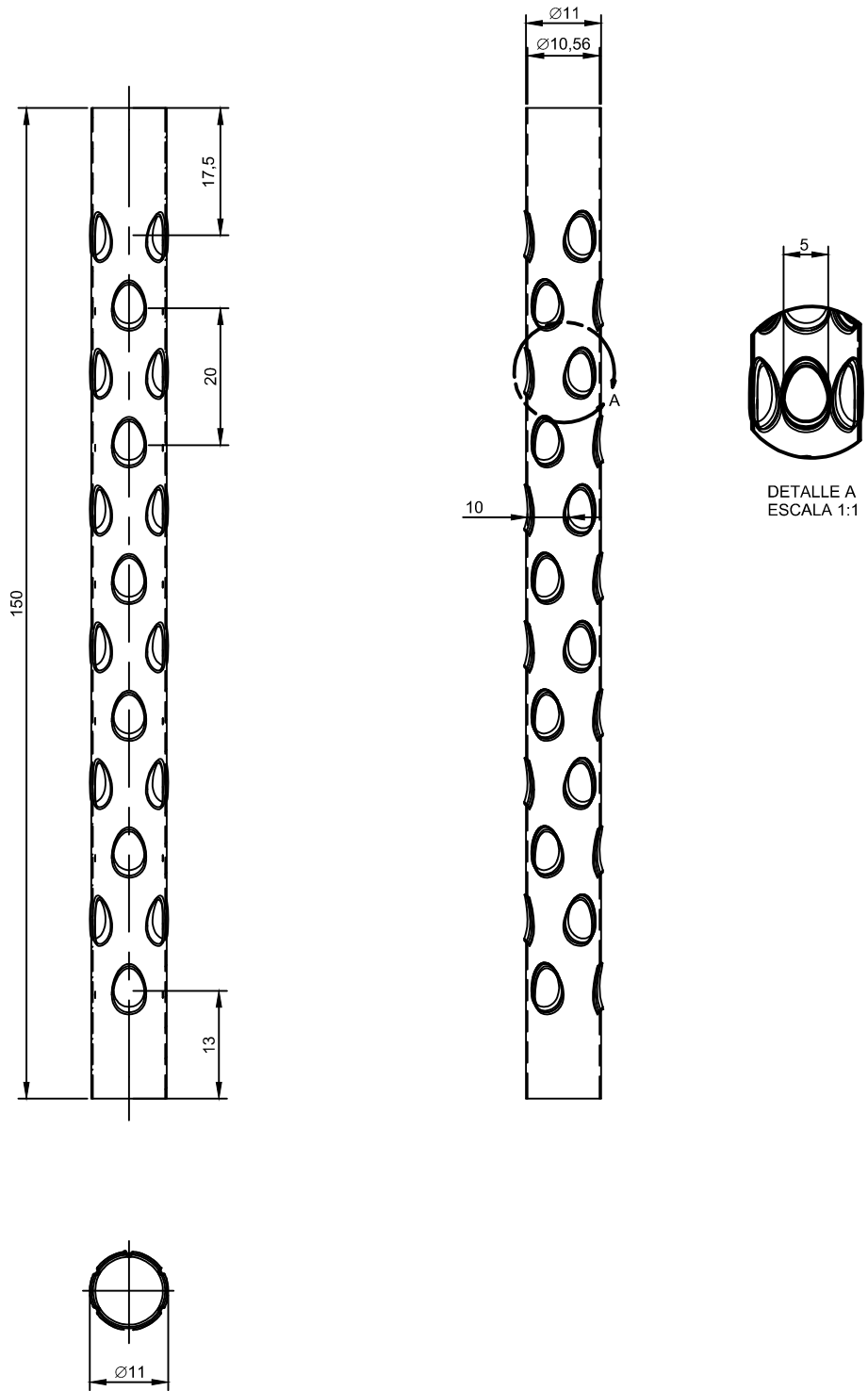
				Tolerancia	Peso	Materiales Policloruro de vinilo PVC	
						Denominación Sección C	Escala 1:2
				Fecha	Nombre		
				Dib.	Wendy Chuquimarca		
				Rev.			
				Aprob.		Número de dibujo 01.01.03	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre		2 unidades		



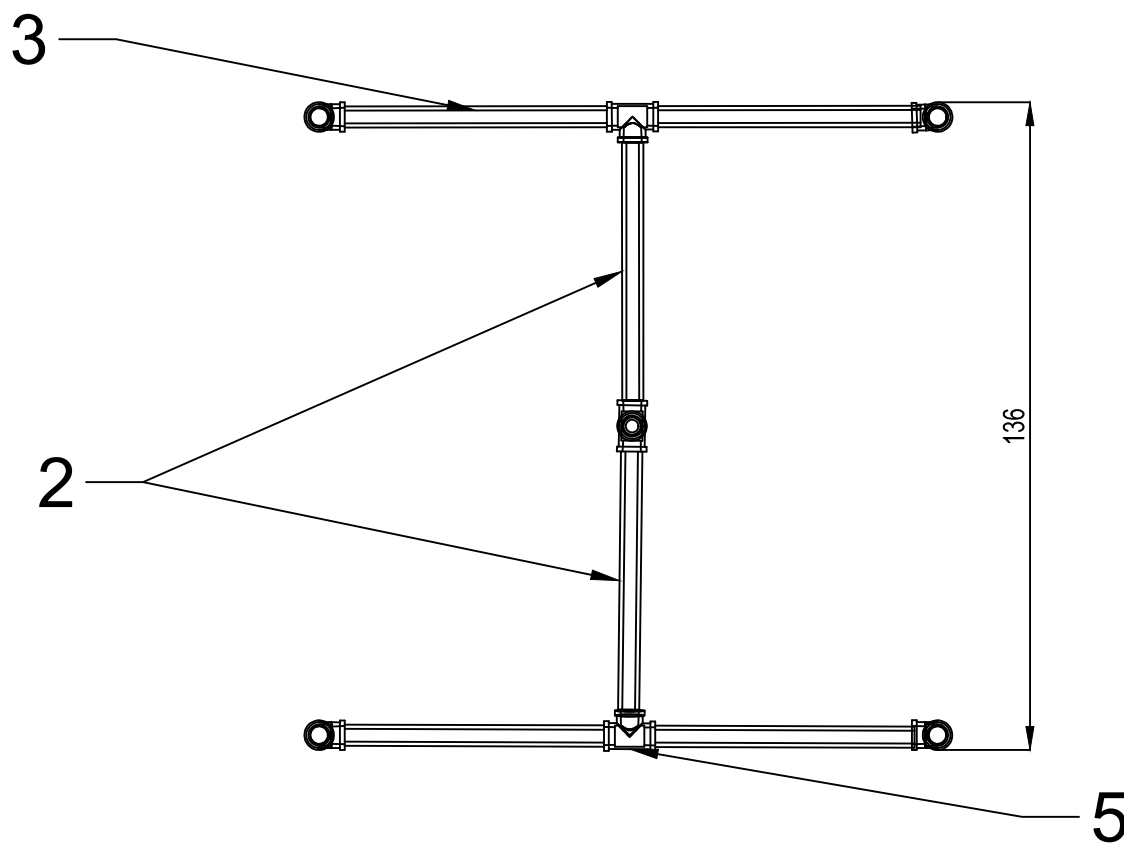
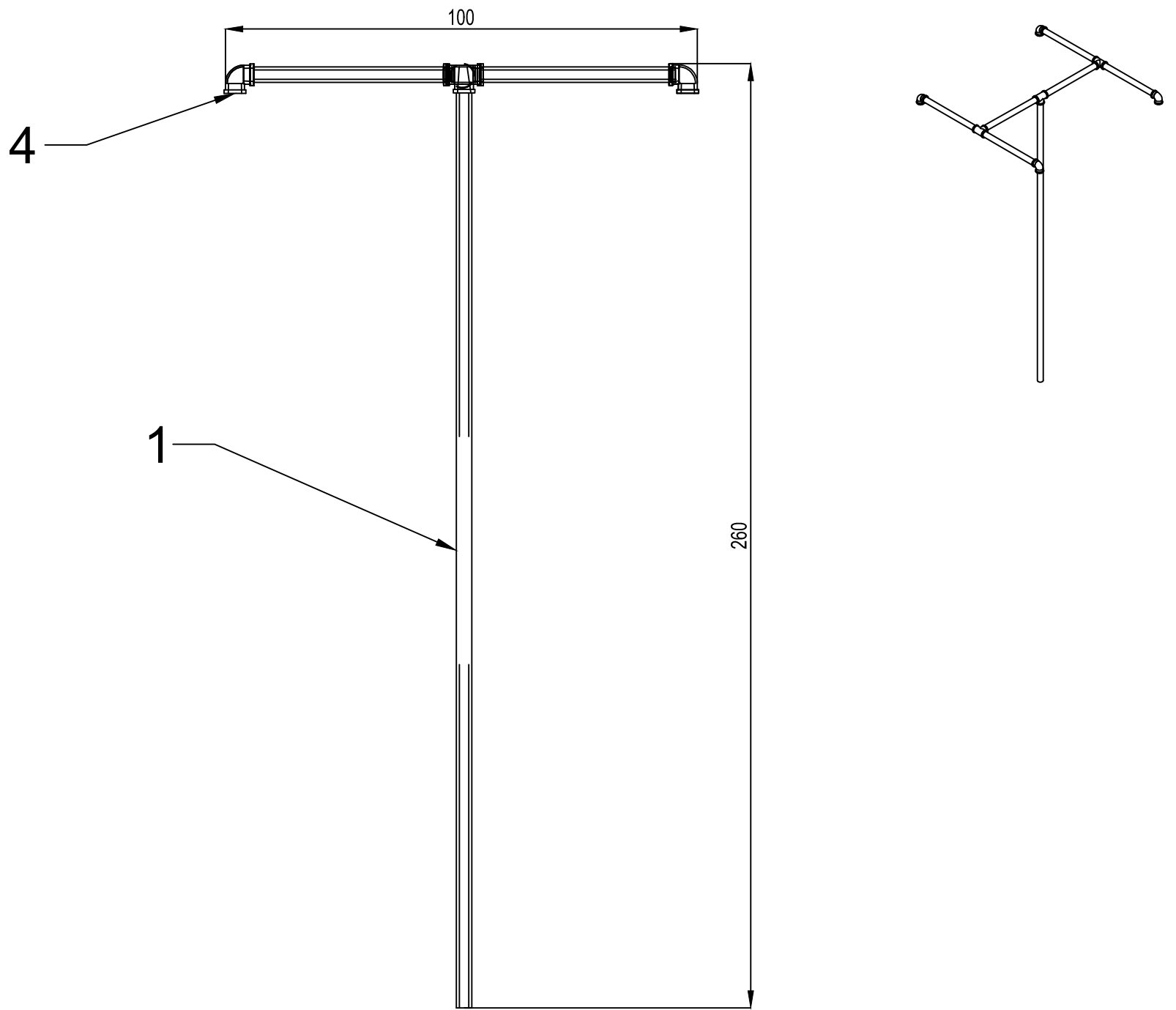
				Tolerancia	Peso	Materiales Policloruro de vinilo PVC	
						Denominación Sección D	Escala 1:2
				Fecha	Nombre		
				Dib.	Wendy Chuquimarca		
				Rev.			
				Aprob.		Número de dibujo 01.01.04	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				



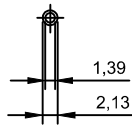
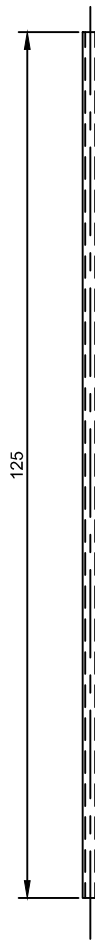
				Tolerancia	Peso	Materiales Policloruro de vinilo PVC	
						Denominación Sección E	Escala 1:1
				Fecha	Nombre		
				Dib.	Wendy Chuquimarca		
				Rev.		Número de dibujo 01.01.05	
				Aprob.			
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				



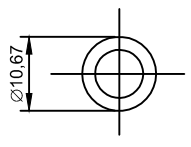
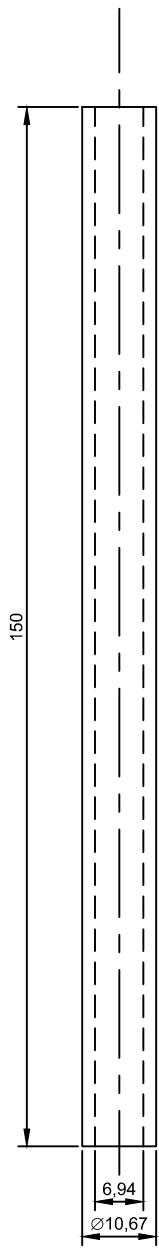
				Tolerancia	Peso	Materiales Policloruro de vinilo PVC	
						Denominación Torres	Escala 1:10
				Fecha	Nombre		
				Dib.	Wendy Chuquimarca		
				Rev.			
				Aprob.		Número de dibujo 01.02.01	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre		4 unidades		



3	Tee	INEN 2956	PP	5			Ø1/2"
4	Codo HH 90°	INEN 2956	PP	4			Ø1/2"
4	Ramal de riego	CPE-INEN	PVC	3	01.03.03		Ø1/2"
2	Tubería secundaria	CPE-INEN	PVC	2	01.03.02		Ø1/2"
1	Tubería principal	CPE-INEN	PVC	1	01.03.01		Ø1/2"
No. de pieza	Denominación	N. de norma o dibujo	Material	No. de orden	Numero del modelo	Peso	Observaciones
		Tolerancia	Peso	Materiales			
				Denominación			
		Fecha	Nombre	RED DE DISTRIBUCIÓN			
		Dib.	Wendy Chuquimarca	Escala			
		Rev.		1:5			
		Aprob.		Numero de dibujo			
				01.03.00			
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				



				Tolerancia	Peso	Materiales Policloruro de vinilo PVC		
					Fecha	Nombre	Denominación	Escala
				Dib.		Wendy Chuquimarca	Tubería principal	1:10
				Rev.				
				Aprob.				
							Número de dibujo	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				01.03.01	



				Tolerancia	Peso	Materiales Policloruro de vinilo PVC	
						Denominación Tubería secundaria	Escala 1:2
				Fecha	Nombre		
				Dib.	Wendy Chuquimarca		
				Rev.			
				Aprob.		Número de dibujo 01.03.02	
					2 unidades		
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				

Anexo 10. Valores de monitoreo de la solución nutritiva

Fecha	Temperatura	pH	EC
20/7/2023	18,4	5,84	2045
21/7/2023	18,9	5,75	2250
22/7/2023	19,6	5,98	2828
23/7/2023	19,0	6,20	2575
24/7/2023	20,1	5,81	2920
25/7/2023	20,0	6,08	2300
26/7/2023	22,1	5,53	2080
27/7/2023	20,2	5,87	2260
28/7/2023	20,6	6,06	2824
29/7/2023	19,4	5,95	2150
30/7/2023	19,5	6,02	1980
31/7/2023	19,6	5,98	1850
1/8/2023	20,0	6,00	1930
2/8/2023	20,2	5,50	2080
3/8/2023	21,2	5,43	2150
4/8/2023	19,5	5,73	1370
5/8/2023	18,1	5,52	2010
6/8/2023	20,2	5,61	1890
7/8/2023	19,5	5,59	1380
8/8/2023	21,2	5,93	1930
9/8/2023	18,0	5,56	1500
10/8/2023	20,0	5,53	1870
11/8/2023	20,2	5,96	1920
12/8/2023	20,1	5,87	2330
13/8/2023	20,0	5,51	1650
14/8/2023	20,2	5,83	1780
15/8/2023	21,8	5,57	1910
16/8/2023	22,8	5,63	1250
17/8/2023	22,4	5,71	1820
18/8/2023	24,7	5,69	1853
19/8/2023	25,4	5,76	1865
20/8/2023	20,2	5,64	1284
21/8/2023	21,8	5,65	1780
22/8/2023	19,8	5,75	1845
23/8/2023	18,7	5,51	1345
24/8/2023	20,5	5,64	1895
25/8/2023	22,2	5,82	1934
26/8/2023	21,6	5,59	1487
27/8/2023	22,8	5,81	2038
28/8/2023	18,2	5,76	2015

Anexo 11. Construcción del prototipo



Adecuación de la base



Montaje del prototipo



Ensamblado de la base del prototipo



Señalar la ubicación de cada orificio



Corte de las ranuras para realizar los orificios



Calentar el área de la tubería para realizar los orificios



Introducir un tubo de ½ cédula 40 para los orificios



Cuatro torres con los orificios respectivos



Ensamblado de las tuberías y accesorios de la red de distribución



Red de distribución completa del prototipo



Prueba de riego del prototipo



Preparación de las canastillas hidropónicas con el sustrato



Preparación de la solución nutritiva



Llenado del tanque colector/base con la solución nutritiva



Montaje completo del prototipo



Programación del temporizador digital según los ciclos de riego establecidos



Plantación de las 144 plántulas de lechuga



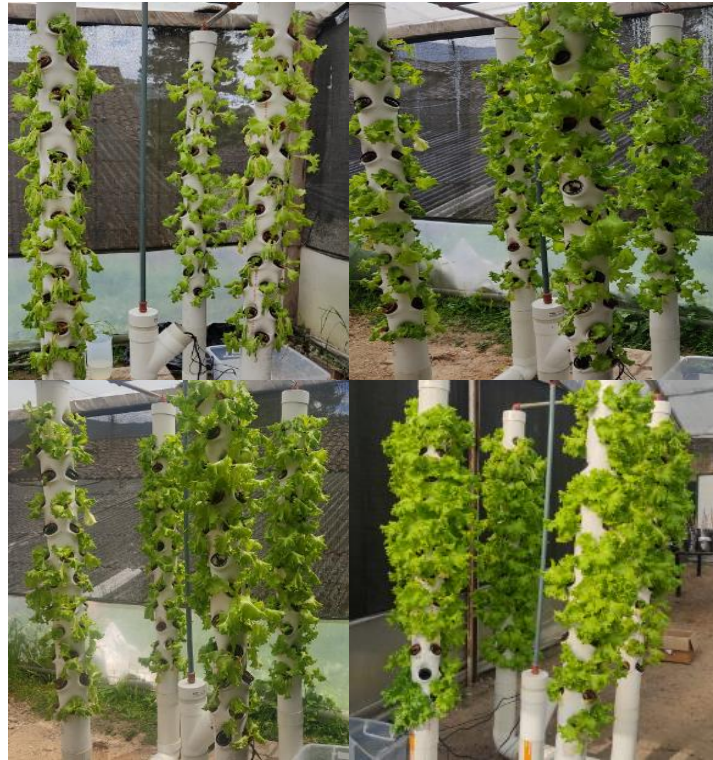
Instalación del monitor de parámetros de la solución nutritiva



Ruptura de hojas por altas velocidades del viento



Primeras raíces en diferentes sustratos (fibra de coco y esponja)



Registro de la recuperación del cultivo



Registro cronológico del crecimiento del cultivo

Anexo 12. Costo total de la implementación del prototipo

Ítem	Descripción	Cantidad	Precio Unit.	Precio Total
1	Bomba sumergible Rio PLUS 1100	1	\$77,00	\$77,00
2	Monitor de pH, EC y temperatura	1	\$140,00	\$140,00
3	Tubo sanitario PVC de 4 pulg.	3	\$10,50	\$31,50
4	Codos de 90° de 4 pulg.	4	\$4,00	\$16,00
5	Uniones tipo “T” de 4 pulg.	3	\$4,00	\$12,00
6	Bifurcación tipo “Y” de 4 pulg.	1	\$4,00	\$4,00
7	Tapones tipo hembra de 4 pulg.	5	\$1,50	\$7,50
8	Tubo PVC de ½ pulg.	1	\$7,50	\$7,50
9	Uniones tipo “T” de ½ pulg.	3	\$0,50	\$1,50
10	Codos de 90° de ½ pulg.	4	\$0,50	\$2,00
11	Unión roscada de ½ pulg.	5	\$0,50	\$2,50
12	Caja de 16cm x 9.5cm x 7cm.	1	\$4,00	\$4,00
13	Plántulas de lechuga.	200	\$0,03	\$6,00
14	Canastillas para hidroponía #5.5.	145	\$0,20	\$29,00
15	Solución concentrada A.	2	\$6,00	\$12,00
16	Solución concentrada B.	2	\$6,00	\$12,00
17	Fibra de coco	1	\$5,00	\$5,00
TOTAL				\$369,50

Anexo 13. Certificado de traducción del resumen.



Dirección: Calle La Condamine 26-37 y Avenida Pío Jaramillo Alvarado. Edificio Rosalía.
www.europeek.com.ec
europeekloja@gmail.com
LOJA-ECUADOR

I can do it #YoSoyEuroPeek

Loja 29 de Noviembre del 2023

CERTIFICADO DE TRADUCCION

EUROpeek INSTITUTO DE IDIOMAS

CERTIFICA:

Haber realizado la traducción de español a inglés del resumen de la Tesis titulada: "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO HIDROPÓNICO PARA CULTIVO DE HORTALIZAS APLICABLE EN CULTIVOS URBANOS " de autoría De Wendy Juliana Chuquimarca Jumbo, portadora de la cédula de identidad nro. 1724941693

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad. Facultando al interesado hacer uso del presente en lo que creyere conveniente.



Mg.Sc. Noralma Ordóñez Ortega
REPRESENTANTE LEGAL
EUROpeek INSTITUTO DE
IDIOMAS

R.U.C.: 1102404553001

