

---

# Diseño e implementación de un sistema hidropónico automático de técnica NFT para el cultivo de cilantro en un contexto urbano

---

Luis Genaro Álvarez Sulecio



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Diseño e implementación de un sistema hidropónico  
automático de técnica NFT para el cultivo de cilantro en un  
contexto urbano**

Trabajo de graduación presentado por Luis Genaro Álvarez Sulecio para  
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

2025



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería




**Diseño e implementación de un sistema hidropónico  
automático de técnica NFT para el cultivo de cilantro en un  
contexto urbano**

Trabajo de graduación presentado por Luis Genaro Álvarez Sulecio para  
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica


Guatemala,

2025


Vo.Bo.:

(f)   
M. Sc. Carlos Esquit

Tribunal Examinador:

(f)   
M.Sc. Carlos Esquit

(f)   
M. Sc. Miguel Enrique Zea Arenales

(f)   
Ing. Kurt Emmanuel Kellner

Fecha de aprobación: Guatemala, 13 de febrero de 2025.

Deseo extender un agradecimiento especial a todos mis amigos y mi familia, quienes me han apoyado y alentado durante todas y cada una de las etapas de este trabajo de graduación. A su vez, me gustaría dedicar este trabajo a mis papás, quienes me han apoyado desde el primer día de la universidad, y nunca perdieron la fé en mí ni en mis habilidades. Estoy seguro que si no fuese por el arduo trabajo de mis papás, nunca habría llegado a este punto en mi formación profesional. Espero que este trabajo de graduación sea un logro más en nuestra familia, aportando al patrimonio que hemos estado desarrollando durante los últimos 50 años.

<b>Prefacio</b>	III
<b>Lista de figuras</b>	IX
<b>Lista de cuadros</b>	X
<b>Resumen</b>	XI
<b>Abstract</b>	XII
<b>1. Introducción</b>	1
<b>2. Antecedentes</b>	2
2.1. La hidroponía en Guatemala	2
2.2. Tendencias actuales en la producción sostenible de hortalizas	3
2.3. Monitoreo y control de cultivos hidropónicos utilizando tecnología IoT	5
2.4. La digitalización de la agricultura	6
<b>3. Justificación</b>	8
<b>4. Objetivos</b>	9
4.1. Objetivo general	9
4.2. Objetivos específicos	9
<b>5. Alcance</b>	10
<b>6. Marco teórico</b>	11
6.1. Cultivos hidropónicos	11
6.2. Solución nutritiva re-circulante (NFT)	12
6.3. Solución de nutrientes	13
6.4. Características de la solución nutritiva del cilantro	14
6.5. Monitoreo de parámetros para el crecimiento de plantas	15
6.5.1. Oxígeno disuelto en agua	15
6.5.2. Electro conductividad (EC) en solución nutritiva	17

6.5.3. Potencia de hidrógeno (pH)	18
6.5.4. Temperatura de agua	20
6.5.5. Temperatura y humedad ambiental	21
<b>6.6. Actuadores y componentes auxiliares</b>	<b>23</b>
6.6.1. Módulo RTC (reloj de tiempo real)	23
6.6.2. Luces de crecimiento NeoPixel WS2812B	24
6.6.3. Ventiladores para circulación de aire	24
<b>6.7. Sistemas de control y conectividad con la nube</b>	<b>25</b>
6.7.1. Lectura, procesamiento y control de datos	25
6.7.2. El internet de las cosas (IoT)	26
6.7.3. Protocolo de comunicación HTTP	27
<b>7. Diseño y ensamblaje del sistema hidropónico</b>	<b>30</b>
7.1. Componentes del sistema	30
7.2. Diseño de la estructura	31
7.2.1. Requerimientos físicos y restricciones de espacio	31
7.2.2. Primera iteración, estructura de aluminio	32
7.2.3. Segunda iteración, estructura prefabricada	34
7.2.4. Comparación de las iteraciones de diseño de la estructura	37
7.2.5. Diseño de componentes auxiliares	38
7.2.6. Modelado CAD de la estructura	40
7.3. Construcción del sistema	41
7.3.1. Integración de sistemas	42
<b>8. Desarrollo de circuitos para sensado y control de parámetros</b>	<b>45</b>
8.1. Diseño de circuitos	45
8.1.1. Características de alimentación de potencia	46
8.1.2. Configuración de conexiones para sensores y actuadores	48
8.1.3. Pruebas físicas de circuitos principales	53
8.2. Desarrollo de placa de circuito impreso (PCB)	54
8.2.1. Diseño en <i>EasyEDA</i>	55
8.2.2. Fabricación y ensamblaje	58
8.2.3. Pruebas realizadas con la placa impresa	60
<b>9. Desarrollo de aplicación móvil</b>	<b>61</b>
9.1. Requisitos de funcionalidad	61
9.1.1. Diseño de interfaz gráfica	62
9.1.2. Lectura de datos de servidor HTTP	63
<b>10. Programación del <i>firmware</i> del sistema</b>	<b>64</b>
10.1. Definición del protocolo de comunicación inalámbrica	65
10.1.1. Conexión inalámbrica mediante WiFi	65
10.2. Configuración de sensores y accionamiento de actuadores	68
10.2.1. Lectura y calibración de sensor de nivel de pH	68
10.2.2. Control de actuadores	69

<b>11. Evaluación del crecimiento del cilantro</b>	<b>72</b>
<b>11.1. Cultivo del cilantro con métodos tradicionales</b>	72
11.1.1. Período de germinación del cilantro	73
11.1.2. Transplante de retoños a sustrato nutritivo de crecimiento	73
<b>11.2. Crecimiento del cilantro en sistema hidropónico</b>	75
11.2.1. Elementos de soporte para las plantas	75
11.2.2. Desarrollo de las plantas	76
11.2.3. Control de temperatura	79
11.2.4. Control de nivel de pH	80
<b>12. Conclusiones</b>	<b>82</b>
<b>13. Recomendaciones</b>	<b>83</b>
<b>14. Bibliografía</b>	<b>84</b>

---

## Lista de figuras

---

1. Modelo 3D de invernadero propuesto en estudio de factibilidad de cultivos hidropónicos. . . . .	3
2. Granja hidropónica vertical de <i>Eden Green</i> . [3]. . . . .	4
3. Esquemático de la unidad de monitoreo y control del sistema diseñado. . . . .	5
4. Sistema hidropónico implementado en condiciones de laboratorio. . . . .	6
5. Variedad de métodos de irrigación para cultivos [7]. . . . .	12
6. Diagrama simplificado de metodología NFT para cultivos hidropónicos [10]. . . . .	12
7. Sensor analógico de oxígeno disuelto [20]. . . . .	17
8. Sensor analógico de electro conductividad [21]. . . . .	18
9. Escala de pH con valores adimensionales y logarítmicos [24]. . . . .	19
10. Sensor analógico de potencia de hidrógeno (pH) [25]. . . . .	20
11. Sensor tipo sonda de temperatura del agua [26]. . . . .	21
12. Sensor de temperatura y humedad DHT11 [31]. . . . .	23
13. Módulo RTC DS3231 [32]. . . . .	23
14. Tira de luces LED neopixel de Adafruit [34]. . . . .	24
15. Ventilador utilizado para flujo de aire [35]. . . . .	25
16. Componentes de la placa de desarrollo ESP WROOM-32 [36]. . . . .	26
17. Diagrama de la arquitectura IoT generalizada [38]. . . . .	27
18. Estructura de una solicitud para retirar datos en el protocolo HTTP/1.1 [41]. . . . .	28
19. Diagrama de la comunicación entre cliente y servidor mediante el protocolo HTTP [41]. . . . .	28
20. Diagrama de la comunicación entre cliente y servidor de <i>Dweet.io</i> . . . . .	29
21. Estructura inicial diseñada utilizando perfiles de aluminio tipo L de dos pulgadas. . . . .	33
22. Perfil horizontal con perforación para tubería de distribución. . . . .	33
23. Bandejas de forraje a utilizarse como canales de crecimiento. . . . .	34
24. Modelo 3D de la estantería prefabricada. . . . .	35
25. Perfil con ranuras de ojo de cerradura. . . . .	35
26. Estructura con canales de crecimiento. . . . .	36
27. Soporte con inclinación de 0.8°, respecto a la horizontal, para tuberías de crecimiento. . . . .	37

28. Soporte para sensores DHT11 en varillas de 0.5 pulg.	38
29. Soporte para ventiladores con tornillos de 0.25 pulg, vista frontal e isométrica.	39
30. Versiones diseñadas del acople del ventilador con poste ranurado de la estructura.	39
31. Acople entre servomotor MG90S y válvula de bola para regulación de pH.	40
32. Ensamblaje del modelo CAD de la estructura principal del sistema.	40
33. Corte de ranuras en repisa de MDF utilizando router manual.	41
34. Cable UTP soldado a conector tipo <i>header</i> para sensor DHT11.	42
35. Estructura instalada en vivero con los sensores de temperatura instalados y conectados.	43
36. Acople de servomotor con válvula tipo bola para control de nivel de pH.	44
37. Estructura finalizada con todos los componentes integrados en el sistema.	44
38. Fuente conmutada seleccionada para la alimentación del circuito principal.	47
39. Diagrama de circuito regulador de voltaje tipo <i>buck</i> para reducir voltaje DC	
46.	47
40. Diagrama de circuito del sistema completo con terminales para conexión en PCB.	48
41. Diagrama del circuito con resistencia calculada para control de ventiladores con relés de 5 VCC.	49
42. Diagrama del circuito con conexión para sensores DHT11 y sus resistencias individuales.	50
43. Diagrama de conexión para sensores DS18B20 con resistencia del bus de datos.	50
44. Diagrama de conexión del reloj de tiempo real.	51
45. Diagrama de conexión de las luces de crecimiento <i>NeoPixel</i> WS2812B.	51
46. Diagrama de conexión del sensor de pH de <i>Atlas Scientific</i> al pin A0 del ESP WROOM-32.	52
47. Relación de nivel de pH leído por sonda y voltaje entregado por el módulo del sensor.	52
48. Circuito de conexión entre pines de los servomotores y digitales del ESP WROOM-32.	53
49. Prueba de circuito de control de ventilador mediante relé utilizando transistor 2N222A.	53
50. Prueba inicial de luces de crecimiento integradas en el sistema.	54
51. Esquemático de los circuitos requeridos para diseño de circuito impreso.	55
52. Reglas de diseño establecidas para la conexión de elementos en PCB.	56
53. Vista 2D del diseño de conexiones para circuito impreso.	57
54. Reglas utilizadas para geometrías tipo gota en circuito impreso.	57
55. Visualización tridimensional de circuito impreso diseñado.	58
56. Inicio del proceso de soldadura de los componentes a la capa inferior de la placa.	59
57. Ensamblaje final del circuito fabricado.	59
58. Prueba inicial de circuito impreso con ESP-32S, sensores, luces de crecimiento y RTC.	60
59. Diagrama de flujo de las tareas realizadas por la aplicación móvil a implementar.	62
60. Interfaz gráfica diseñada para la visualización de datos con transición de pantallas.	63

61. Diagrama de funcionamiento general del <i>firmware</i> desarrollado para controlar el sistema. . . . .	64
62. Diagrama de ciclo establecido para la conexión WiFi, primera iteración. . . .	66
63. Diagrama de la función desarrollada para envío de datos por HTTP. . . . .	67
64. Visualización gráfica de paquetes enviados a servidor de Dweet.io mediante HTTP en formato JSON. . . . .	68
65. Proceso de calibración del sensor de nivel de pH utilizando soluciones de pH conocido. . . . .	69
66. Diagrama de proceso para activar ventiladores. . . . .	70
67. Diagrama de del ciclo de control de los servomotores para la regulación de pH en el agua. . . . .	71
68. Semillas germinadas utilizando papel toalla y bolsa resellable. . . . .	73
69. Configuración de los retoños luego de ser transplantados a sustrato nutritivo de crecimiento. . . . .	74
70. Nivel de desarrollo de retoños sin espigado 2 semanas después de ser transplantados. . . . .	74
71. Retoño de cilantro con tallo seco y raíces bloqueadas por sales de la solución nutritiva. . . . .	76
72. Configuración de canastas con fibra de coco como sustrato mecánico para el soporte de tallos. . . . .	76
73. Cilantro marchitado con hojas secas, descoloradas y tallos débiles. . . . .	77
74. Raíces descoloradas con puntos negros y pelusa blanca indicativas de moho. . . . .	77
75. Cilantro en sistema completo durante la segunda etapa de pruebas. . . . .	78
76. Comparación de plantas de cilantro en el sistema hidropónico contra grupo de control. . . . .	79
77. Históricos de temperatura ambiente del sistema durante segunda etapa de pruebas. . . . .	80
78. Comparación entre histórico de temperatura con ventiladores activos y con ventiladores desconectados. . . . .	80
79. Comparación de plantas de cilantro en el sistema hidropónico contra grupo de control. . . . .	81

---

Lista de cuadros

---

1.	Elementos mayores según su relevancia para el crecimiento de las plantas [11].	13
2.	Parámetros esenciales para el crecimiento de cilantro en sistemas hidropónicos [17] [13] [18].	15
3.	Características de funcionamiento del sensor SEN0237 de <i>DFRobot</i> .	16
4.	Características de funcionamiento del sensor DFR0300 de <i>DFRobot</i> .	18
5.	Características de funcionamiento del kit de pH <i>Surveyor Analog pH Kit</i> .	20
6.	Características de funcionamiento del sensor de temperatura del agua.	21
7.	Características de funcionamiento del sensor DHT11 [30].	22
8.	Características de funcionamiento del módulo RTC DS3231.	23
9.	Características de tiras de luces LED NeoPixel de Adafruit.	24
10.	Características de los ventiladores utilizados [35].	24
11.	Características de funcionamiento y conexión de la placa de desarrollo <i>ESP WROOM-32</i> .	26
12.	Protocolos de comunicación y otros periféricos disponibles en el <i>ESP WROOM-32</i> .	26
13.	Análisis comparativo entre primera y segunda iteración de la estructura.	37
14.	Corriente continua máxima requerida por el sistema completo de voltaje CC.	46
15.	Características de los transistores NPN 2N222A y del circuito.	48
16.	Valores mínimos y máximos preestablecidos para temperatura, humedad y pH.	68

La hidroponía es un método de cultivo que permite eliminar la dependencia en la tierra y utiliza agua mineralizada para suministrar nutrientes a las plantas, mejorando el uso del espacio y eliminando la necesidad de riego. Sin embargo, requiere de cuidados y mediciones precisas, dificultando su adopción. Con este proyecto se buscó establecer una línea base para futuras investigaciones en cultivos hidropónicos automáticos. Se desarrolló un prototipo de un sistema hidropónico de solución nutritiva re-circulante con el cual se evaluaron tres sensores y actuadores para el control de parámetros ambientales y del agua. Se realizó una comparación de un cultivo en el sistema automático y uno en sustrato tradicional. Se determinó que, si bien el sistema no produjo un crecimiento positivo, fue capaz de monitorear parámetros clave. La pérdida de plantas debido a falta de monitoreo y control de concentración de oxígeno y nutrientes comprobó la importancia de un control preciso de estos parámetros.

Hydroponic agriculture improves land use and reduces water consumption by removing the need for soil and utilizing water to supply plants with required nutrients for development. However, its wide implementation is limited due to its requirements for skilled maintenance and precise parameter measurement. Studies related to its implementation in Guatemala have been limited to small-scale sectors and economic viability analysis. The current project was implemented to establish a baseline for future research on automatic hydroponic systems. The proposed prototype was implemented to evaluate three different sensors and actuators to measure and control water and ambient parameters. Once established, the system was assessed using a comparative analysis between cilantro grown in a traditional medium and within the proposed system. It was determined that, although the system wasn't able to sustain plant development, it was able to monitor key parameters. Furthermore, it highlighted the importance of precise nutrient and oxygen concentration control.

# CAPÍTULO 1

---

## Introducción

---

La hidroponía es un modelo de agricultura utilizado para el crecimiento de plantas sin la dependencia del suelo. Este modelo utiliza una solución de nutrientes disuelta en agua para suministrar las sales y minerales requeridas para el desarrollo de los cultivos. Existen una gran variedad de métodos para la implementación de cultivos hidropónicos, los cuales se caracterizan por su bajo consumo de agua, independencia del suelo y su eficiencia en el uso de espacio. Todos estos métodos tienen como denominador común el agua, la cual permite que las raíces tengan acceso a los nutrientes que requieren las plantas, mientras que provee la hidratación necesaria para su crecimiento.

Si bien en Guatemala este método de cultivo se está empezando a implementar en diferentes regiones y sectores, como en el área de forraje para ganado, aún se encuentra en sus etapas iniciales. A pesar de ser un proceso prometedor para mejorar la seguridad alimenticia del país, estos sistemas requieren de un control y monitoreo de alta precisión en intervalos constantes. Por esta razón, los sistemas hidropónicos presentan retos al requerir mano de obra constante y con conocimientos técnicos para realizar las mediciones y cálculos necesarios para asegurar que los cultivos reciban los nutrientes esenciales.

Este proyecto de graduación busca desarrollar e implementar un sistema hidropónico automático, que sea capaz de monitorear y controlar una gama de parámetros, como el nivel de pH del agua y densidad de nutrientes, sin intervención humana constante. Se realizará la implementación a escala de un sistema para cultivos hidropónicos urbanos, capaz de realizar mediciones de parámetros ambientales y del agua. Adicionalmente, se implementará una interfaz gráfica demostrativa para que el sistema pueda ser monitoreado de manera remota desde un dispositivo móvil aprovechando el contexto del internet de las cosas.

En las últimas décadas se ha observado un movimiento global hacia sistemas de cultivo automatizados capaces de incrementar la calidad y efectividad de producción de cultivos. Factores como la urbanización, el crecimiento poblacional y el cambio climático han promovido el desarrollo de nuevas tecnologías de cultivo para reducir su consumo de agua y espacio requerido.

Uno de los sistemas más prometedores es el cultivo hidropónico. Estos cultivos requieren de entornos controlados y soluciones de fertilizantes en agua para lograr el crecimiento de hortalizas sin la necesidad de sustratos convencionales. La reducción en espacio y agua requerida para estos cultivos, así como su requisito de un control ambiental específico, han facilitado su integración con diferentes tecnologías para su automatización. Ciertas plataformas automatizadas para cultivos hidropónicos han sido desarrolladas e implementadas exitosamente. Sin embargo, en Guatemala, este campo de estudio aún se encuentra en desarrollo.

### 2.1. La hidroponía en Guatemala

Actualmente, el mercado de cultivos e infraestructuras hidropónicas en Guatemala sigue en sus etapas iniciales. Mientras que existen cultivos hidropónicos en diferentes sectores agro-industriales, esta metodología no ha sido ampliamente implementada.

En la Universidad del Valle de Guatemala, se realizó un estudio que buscó determinar la oportunidad de crecimiento y la demanda existente en el mercado para cultivos producidos en una granja urbana empleando metodologías hidropónicas [1]. Dicho estudio buscó determinar la viabilidad económica de un sistema de cultivo hidropónico en Quetzaltenango mediante estudios de mercado y el diseño de un sistema para el cultivo de hortalizas de hoja. Se analizó la ubicación, espacio requerido, variedades de sistemas hidropónicos existentes, la segmentación del mercado, entre otros factores. Adicionalmente, se realizó un diseño preliminar de un sistema hidropónico utilizando la metodología NFT (Nutrient Film Tech-

nique) implementando una configuración de invernadero con túneles. La metodología NFT mantiene un flujo constante de agua sobre las raíces de manera que estas estén levemente cubiertas. Esta metodología mejora la oxigenación de las raíces y permite que estas absorban la cantidad necesaria de nutrientes.

Al analizar los resultados de los estudios técnicos y financieros realizados, se determinó que existe un mercado disponible en el área de Quetzaltenango para la venta de cultivos hidropónicos. Adicionalmente, los resultados presentaron una alta rentabilidad para el proyecto con una tasa interna de retorno (TIR) de 128.07 % lo cual indica la factibilidad positiva de los sistemas hidropónicos en Guatemala. Cabe mencionar que este estudio consideró un sistema hidropónico manual en donde las variables estarían siendo controladas por un equipo de trabajo capacitado.

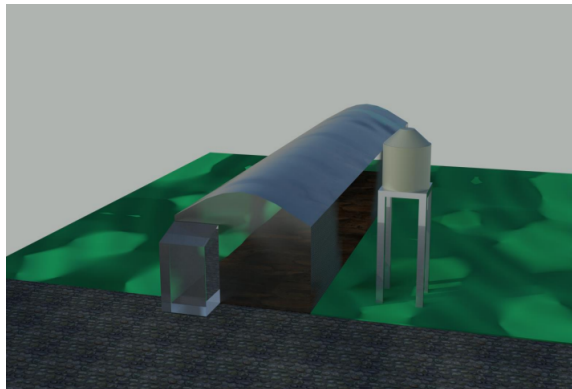


Figura 1: Modelo 3D de invernadero propuesto en estudio de factibilidad de cultivos hidropónicos.

## 2.2. Tendencias actuales en la producción sostenible de hortalizas

El concepto de cultivos sin sustrato ha existido en la sociedad desde hace cientos de años. A inicios y mediados del Siglo XVII, diferentes científicos realizaron experimentos para demostrar que las plantas son capaces de crecer suspendidas en soluciones de agua, minerales y otros nutrientes. A mediados del mismo siglo, se descubrió la importancia de diferentes sales las cuales ayudan a regular el proceso de crecimiento de las plantas, mejorando su rendimiento y calidad [2].

En la actualidad, diferentes factores como el cambio climático y el crecimiento de la población global han requerido nuevos avances en los sistemas de producción de alimentos. Estos factores han llevado a la implementación de sistemas hidropónicos en diferentes países como una medida para aumentar la producción alimenticia sin sacrificar espacio en sus territorios. Los cultivos hidropónicos presentan una gran ventaja al ser un método de cultivo altamente controlable, lo cual aumenta la productividad de un terreno. Adicionalmente, diferentes configuraciones permiten la producción de un mayor volumen de hortalizas en espacios reducidos. Junto a esto, estas metodologías reducen el impacto ambiental del cultivo de alimentos al eliminar la necesidad de alterar ecosistemas para la instalación de plantaciones masivas y reducir el consumo de agua.



Figura 2: Granja hidropónica vertical de *Eden Green*. [3]

En el estudio de Rajaseger y colaboradores [2], se detallan las tendencias recientes más relevantes alrededor de la integración de cultivos hidropónicos con tecnologías inteligentes. Se destaca cómo la hidroponía es capaz de reducir el consumo de agua, minimizar el impacto ambiental de la agricultura y mejorar la calidad de los productos mientras ahorra energía y reduce tanto el espacio como la mano de obra requeridos para su producción. Adicionalmente, presenta esta tecnología como uno de los mejores candidatos para lidiar con los retos del Siglo XXI [4], al permitir su implementación en entornos urbanos, en especial, al considerar la tendencia actual de urbanización. Se presentan los diferentes métodos de cultivo hidropónico que se han desarrollado en los últimos años así como un resumen de los desarrollos tecnológicos en la integración de agricultura inteligente e hidroponía. Se detalla cómo varios estudios, buscando determinar la factibilidad de la hidroponía para producción sostenible, han incorporado diferentes sensores para medir características como niveles de oxígeno o pH en el agua. Estos componentes, junto con sistemas de control, permiten monitorear una gran cantidad de variables internas y externas, y controlarlas para obtener mejores resultados. De igual manera, este estudio cuenta con una recopilación sobre la importancia de las soluciones nutritivas, las diferentes deficiencias de nutrientes que se pueden observar en sistemas hidropónicos, el nivel de pH de la solución nutritiva y la importancia de la correcta selección de los medios sustratos utilizados para la sujeción de las plantas en los sistemas hidropónicos.

En general, el estudio presenta a los cultivos hidropónicos como una herramienta fundamental para asegurar el crecimiento sostenible de la humanidad, haciendo énfasis en el valor de esta tecnología para la producción local de alimentos en áreas urbanas. Su posición respecto a los cultivos hidropónicos se puede apreciar claramente en la siguiente frase: “Esta estrategia novedosa podrá llegar a alterar de manera significativa el sector agrícola al incentivar la producción regional de alimentos, mejorando la seguridad alimenticia y añadiendo a metodologías de cultivo más resilientes” (*Rajaseger et al.*, 2023, p. 926).

---

<sup>1</sup>Los retos principales citados por el estudio incluyen la escasez de agua y comida, el crecimiento poblacional, la disminución en áreas fértiles para el cultivo de hortalizas y el desperdicio de alimentos.

## 2.3. Monitoreo y control de cultivos hidropónicos utilizando tecnología IoT

El monitoreo de las variables presentes en sistemas hidropónicos es esencial para asegurar un crecimiento óptimo de las hortalizas. Sin embargo, este proceso puede llegar a consumir mucho tiempo en el caso de sistemas a mayores escalas y puede ser ineficiente en lugares remotos. Por esta razón, el estudio de Tatas y colaboradores [4] buscó desarrollar un sistema de monitoreo y control automático de parámetros relacionados con la calidad de agua y condiciones ambientales para un cultivo hidropónico en invernadero. Uno de los objetivos de la investigación fue lograr que este aprovechara tecnologías IoT para la transferencia y el análisis de datos.

Se establecieron dos requerimientos principales para el sistema. Su funcionalidad principal se enfocó en la recolección de parámetros de calidad de la solución nutritiva de las plantas. Esto mediante la evaluación de los niveles de pH, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica del agua [3]. Por otro lado, se estableció como requisito que el sistema fuese capaz de determinar la presencia de personas en el invernadero utilizando una combinación de un sensor de movimiento y una cámara. Junto con estos requerimientos, se definieron períodos de muestreo para los sensores, así como las acciones a realizar o alarmas a activar según el estado de los parámetros.

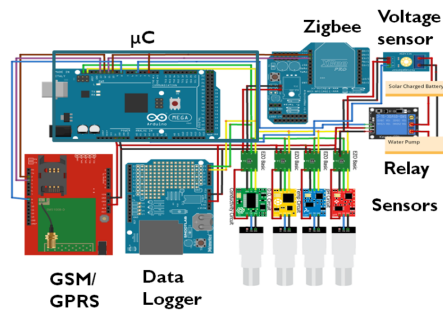


Figura 3: Esquemático de la unidad de monitoreo y control del sistema diseñado.

Una vez establecidos los parámetros a analizar, se seleccionaron los sensores que se utilizarían, en función de los parámetros que se irán a monitorear y considerando una baja frecuencia de re-calibración. Los sensores seleccionados fueron de la marca *Atlas Scientific*, debido a que cumplieron con los requerimientos de frecuencia de re-calibración y precisión en las mediciones. Se configuró la conexión entre nodos de tal manera que todos transmitieran su señal a un solo dispositivo. Esto permitió una comunicación eficiente entre el controlador principal y los monitores de estado (sensores) sin el uso de conexiones físicas. Se realizaron mediciones de consumo eléctrico mediante las cuales se determinó un consumo máximo para la unidad principal de 11.5W bajo condiciones de alta demanda, principalmente debido a la transmisión de datos por el módulo GSM/GPRS. Luego de esto, se desarrolló un controlador implementando *Fuzzy Logic* con tal de activar las bombas de circulación en los momentos adecuados. Se evaluaron los resultados tanto en pruebas de laboratorio como en campo al instalar el sistema en un invernadero para simular condiciones reales. Se desplegaron los datos recolectados en la plataforma Ubidots mediante la cual fue posible visualizar el nivel

de cada uno de los parámetros evaluados. Finalmente, se realizó un análisis de confiabilidad de los sensores, evaluando el error de lectura de datos o *bias* de los sensores, y los errores de transmisión de datos. Esto se logró registrando el tiempo transcurrido entre el fallo en la lectura de datos de algún sensor, el *drift* o desviación en los datos obtenidos de los sensores, y el tiempo entre fallos de transmisión. Se observó, con base a una distribución de *Poisson* y una binomial, que los sensores contaban con una probabilidad de fallar durante un día del 0.93 % con una frecuencia de muestreo de 24 lecturas por día. Con estos datos se determinó que, tanto el sistema como los sensores, cuentan con una probabilidad de falla relativamente baja lo cual hace del sistema altamente confiable.

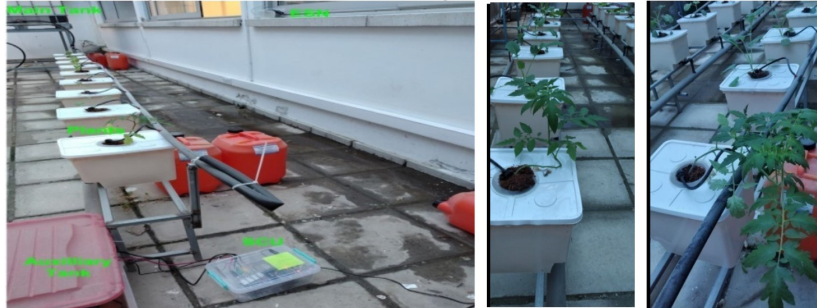


Figura 4: Sistema hidropónico implementado en condiciones de laboratorio.

## 2.4. La digitalización de la agricultura

En los últimos 20 años se ha observado una tendencia hacia la automatización de la agricultura y el concepto de las granjas inteligentes: *Smart Farms (SF)*. Mientras que esta tendencia es bastante reciente, siendo popularizada alrededor de los años 90 del siglo pasado, se han empezado a desarrollar tecnologías que están facilitando su implementación. En el estudio de Bacco y colaboradores [5], realizado en la Unión Europea en el año 2019, se realizó un análisis de las tendencias en el desarrollo de la tecnología agrícola, junto con los retos a los que se enfrenta la agricultura moderna en el contexto de la globalización. Adicionalmente, se analizaron los retos a los que se enfrentan las tecnologías de granjas inteligentes y las dificultades que se han enfrentado en su desarrollo e implementación. Se destacaron factores como costos elevados en la adopción de las tecnologías, así como falta de conectividad en áreas rurales. Así mismo, se analizaron factores técnicos y socio-económicos que están afectando la adaptación de los sistemas de agricultura tradicional a metodologías automatizadas. Un aspecto clave que se mencionó fue la tendencia de estas tecnologías hacia un sistema excesivamente industrializado, el cual tiende a desanimar a los agricultores. Sin embargo, como se menciona en el artículo, “El objetivo de las granjas inteligentes (SF) no debería restringirse a la industrialización de la agricultura, sino en mejorar el proceso entero para que este sea más eficiente, sostenible y de mejor calidad, mientras que se respetan las necesidades de los agricultores.” (Bacco *et al.*, 2019, p. 1), estos sistemas pueden ser diseñados de tal manera que sean más compatibles con las necesidades puntuales de los agricultores.

La hidroponía ha presentado grandes avances a lo largo de los últimos años, desde sus inicios teóricos en el Siglo XVII hasta su crecimiento en popularidad en años recientes. Es-

ta tecnología se encuentra posicionada para ser revolucionaria en la agricultura moderna. Actualmente, existen diversas empresas las cuales están demostrando los beneficios de esta tecnología junto con su viabilidad. Adicionalmente, varios estudios han comprobado su factibilidad y el potencial presente en la integración con sistemas inteligentes. El campo de la automatización agrícola se ha encontrado en crecimiento a lo largo de los últimos 20 años, y los cultivos hidropónicos presentan una plataforma idónea para su implementación en los años por venir. Tanto el calentamiento global como la urbanización han sido reconocidos como retos que pueden llegar a aumentar la falta de seguridad alimenticia en esta y futuras generaciones. Por esta razón, es de gran importancia mejorar los protocolos de automatización y sistemas de control para facilitar la adopción de los cultivos hidropónicos tanto en Guatemala como en Latinoamérica.

La hidroponía ofrece grandes beneficios, entre ellos, el ahorro significativo de agua, la reducción en el espacio de crecimiento requerido para producción a escala y un control más robusto de las características de crecimiento del cultivo deseado. Estos beneficios son particularmente relevantes en el siglo XXI, debido al ritmo de crecimiento poblacional, ocasionando inseguridad en el suministro de agua potable y el espacio disponible para agricultura. Ahora bien, estos sistemas requieren de cuidados específicos y diferentes a los de la agricultura tradicional, como el monitoreo de acidez o alcalinidad de la solución de nutrientes, o su concentración de oxígeno. Como lo han demostrado varios estudios en el extranjero, contar con un sistema de regulación de parámetros autónomo permite obtener mejores resultados con sistemas hidropónicos.

Este trabajo de graduación busca establecer los inicios de una plataforma que pueda ser utilizada para desarrollar y analizar sistemas hidropónicos automáticos capaces de reforzar la producción de hortalizas locales e incentivar su cultivo en contextos urbanos. Se desarrollará un sistema capaz de medir y controlar las diversas variables involucradas en el crecimiento de plantas con metodologías hidropónicas. La primera iteración de dicha plataforma consistirá en un prototipo a pequeña escala, diseñado con la intención de que sea adoptado en entornos urbanos para mejorar la calidad de las hortalizas consumidas. Mientras que el enfoque principal del trabajo recaerá en diseñar un sistema capaz de recolectar datos relacionados a parámetros ambientales y del agua, se buscará también analizar cómo el cultivo responde al sistema implementado. Adicionalmente, establecerá una línea base para futuras investigaciones que deseen aprovechar el control automático de parámetros para cultivos hidropónicos a grande y mediana escala.

Se espera que el desarrollo de un sistema que cumpla con estas características, junto con los bajos requisitos de trabajo manual, aumente la atractividad de los sistemas hidropónicos en el mercado guatemalteco. Este tipo de sistemas serán esenciales para asegurar una producción estable de hortalizas en Guatemala, sin el riesgo de pérdidas por cambios en condiciones climáticas.

#### 4.1. Objetivo general

Diseñar e implementar un sistema hidropónico automático capaz de mantener una producción de hortalizas en un contexto urbano con espacio reducido.

#### 4.2. Objetivos específicos

- Diseñar e implementar un sistema hidropónico automático de dimensiones compactas con monitoreo y regulación de parámetros del agua.
- Comparar las características de crecimiento del cilantro en el sistema hidropónico automático contra una metodología tradicional.
- Integrar el sistema hidropónico automático con una aplicación móvil para un monitoreo remoto de parámetros.

Este proyecto se enfocó en establecer las bases para el desarrollo y análisis de métodos de cultivo automático utilizando técnicas de hidroponía en la Universidad del Valle de Guatemala. Con esto en mente, se desarrolló un prototipo que permitiera controlar diferentes parámetros relacionados al crecimiento de las plantas haciendo enfoque en la metodología de solución nutritiva re-circulante o NFT por sus siglas en inglés. Este prototipo permitió establecer una estructura que funcionara como plataforma para la integración de múltiples sensores y actuadores, con tal de monitorear y controlar tanto parámetros ambientales como de la solución nutritiva para el crecimiento de las plantas.

El prototipo se centró en la implementación de sensores de temperatura, tanto ambiental como del agua, así como un sensor de pH que permitiera monitorear y controlar dicho parámetro. Estos parámetros fueron seleccionados luego de realizar una investigación acerca de las características de los sistemas hidropónicos, y las variables esenciales para el crecimiento de las plantas. El propósito principal de los sensores fue determinar su viabilidad en el monitoreo de los parámetros críticos para la absorción de nutrientes en un sistema hidropónico. Adicionalmente, establecieron una línea base respecto a los ciclos de control, las relaciones entre variables y el crecimiento de las plantas dentro del sistema diseñado. Se desarrolló la programación del sistema embebido encargado de monitorear y procesar los diferentes parámetros recolectados por los sensores instalados. Junto al desarrollo de prototipo preliminar, se realizó una comparación de diferentes indicadores de crecimiento del cultivo seleccionado, tanto en el entorno hidropónico como en uno tradicional. Finalmente, se desarrolló una aplicación sencilla la cual permitiera monitorear los parámetros recolectados por el sistema.

## 6.1. Cultivos hidropónicos

Históricamente, la agricultura tradicional ha utilizado el suelo como medio principal para el crecimiento de plantas gracias a su alta concentración de minerales y nutrientes esenciales para el desarrollo de hojas y frutos. Debido al crecimiento poblacional observado en los últimos siglos, las metodologías de agricultura tradicional han extraído una cantidad considerable de nutrientes del suelo, reduciendo su productividad y aumentando su dependencia de fertilizantes añadidos.

A mediados del siglo pasado, se empezaron a investigar metodologías alternas de agricultura con tal de eliminar la dependencia del suelo para el crecimiento de las plantas. Una de las soluciones encontradas fueron los cultivos hidropónicos los cuales no dependen de un sustrato para entregar minerales y nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas, sino se aprovechan de una solución de estos en agua para maximizar la absorción por medio de las raíces [6]. Los sistemas hidropónicos se caracterizan por su bajo consumo de agua, alta eficiencia de espacio y altos niveles de productividad. Se destaca que estos sistemas no dependen de las condiciones climáticas de la región, al encontrarse en un entorno controlado, como un invernadero. Esto permite una producción constante a lo largo del año la cual no es susceptible a sequías o inundaciones. Adicionalmente, al no depender del suelo, estos sistemas se pueden expandir de manera vertical, lo cual aumenta la producción de plantas por metro cuadrado utilizado. Estas características han vuelto a la hidroponía una de las soluciones más prometedoras en el contexto del crecimiento urbano y poblacional visto en el siglo XXI. Otra de las grandes ventajas de contar con un entorno cerrado y controlable, es que los cultivos hidropónicos raras veces se encuentran expuestos a pestes o enfermedades relacionadas al suelo. Sin embargo, su dependencia de un control constante y riguroso de parámetros, hace de esta metodología de cultivo susceptible a pérdidas por mal manejo del sistema [6].

## 6.2. Solución nutritiva re-circulante (NFT)

La hidroponía cuenta con diversas metodologías para asegurar que la solución nutritiva llegue a las raíces de las plantas. Estas metodologías han sido ideadas con la finalidad de maximizar espacio, eficiencia de distribución de materiales y otros parámetros de crecimiento de las plantas [2]. La principal diferencia entre los métodos de cultivo hidropónico consiste en los métodos de irrigación. El método de solución nutritiva re-circulante (*Nutrient Film Technique*), también conocido como método NFT, utiliza un sistema de irrigación que genera una película delgada de agua con nutrientes que fluye sobre las raíces de las plantas. Tradicionalmente, estos sistemas se implementan con una serie de canaletas o tuberías colocadas a una inclinación de entre  $0.1719^\circ$  y  $1.146\%$  [7]. Una de las características más retadoras del método NFT consiste en el control de parámetros, como lo son los niveles de pH de la solución, su temperatura, oxígeno disuelto y saturación de nutrientes [8]. Adicionalmente, varios estudios han demostrado que la tasa de flujo de la solución en el sistema se encuentra fuertemente relacionada con el rendimiento del crecimiento de las plantas. En el caso de las lechugas, Al-Tawaha y colaboradores encontraron que un flujo de 20 L/minuto fue óptimo para el desarrollo de las plantas, llevando a un mayor rendimiento [9]. Finalmente, es importante destacar que este sistema requiere que las plantas sean germinadas en un espacio separado, antes de que puedan ser introducidas al sistema.

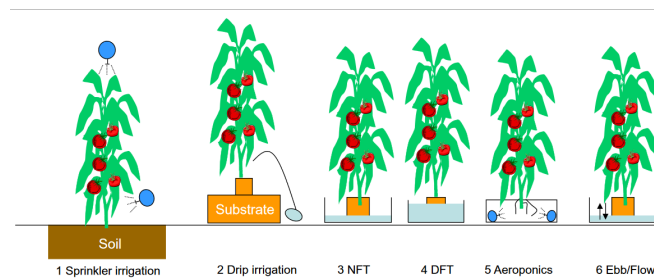


Figura 5: Variedad de métodos de irrigación para cultivos [7].

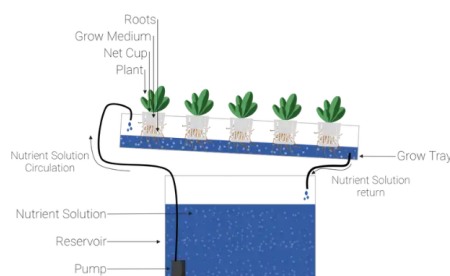


Figura 6: Diagrama simplificado de metodología NFT para cultivos hidropónicos [10].

### 6.3. Solución de nutrientes

Las plantas requieren mantener un acceso constante a luz solar, agua, oxígeno y dióxido de carbono para asegurar su supervivencia. Sin embargo, esto no es lo único que requieren para su crecimiento. Normalmente, las plantas obtienen la mayoría de los minerales y nutrientes necesarios para su crecimiento del suelo, el cual, a lo largo de varios años por procesos naturales, ha acumulado en diferentes cantidades. Las plantas requieren de 13 nutrientes minerales necesarios para su desarrollo y crecimiento adecuado. Sus características de crecimiento y la calidad de las plantas estarán definidas por el porcentaje de nutrientes que tengan disponibles y que sean capaces de absorber [11]. Estos nutrientes se pueden dividir en tres categorías según la función que cumple cada elemento. La primera categoría se conoce como los macro-nutrientes, estos son nutrientes que las plantas requieren en altas cantidades pues son esenciales para el desarrollo de las estructuras fundamentales para su crecimiento. Dicho grupo se detalla en el Cuadro 1.

Elementos mayores en solución nutritiva	
Elemento	Importancia
Nitrato	Desarrollo de hojas y tallos
Fósforo	Desarrollo de raíces, la formación de semillas y la maduración de frutos
Potasio	Desarrollo de frutos y la acumulación de nutrientes en la planta

Cuadro 1: Elementos mayores según su relevancia para el crecimiento de las plantas [11].

La segunda categoría consiste en minerales requeridos para el correcto desarrollo de la planta, sin embargo, estos son requeridos en cantidades más bajas por lo que se conocen como elementos secundarios. Estos apoyan a las plantas en su desarrollo facilitando procesos de defensa, absorción de nutrientes, entre otros [11]. Los elementos secundarios o elementos menores se detallan a continuación:

- **Calcio:**  
Activa la formación de raíces en desarrollo temprano y neutraliza las sustancias tóxicas.
- **Azufre:**  
Esencial en la producción de proteínas, mejora el crecimiento de las plantas y facilita el desarrollo de semillas.
- **Magnesio:**  
Requerido para la creación de clorofila, azúcares necesarias para el funcionamiento de la planta, regula los nutrientes disponibles y fomenta la creación de aceites y grasas.

Finalmente, se cuenta con una serie de micro-nutrientes, los cuales cumplen una gran variedad de funciones que facilitan el desarrollo de la planta y aseguran un mayor rendimiento de la misma. Estos se detallan a continuación [12]:

- **Cloro:**  
Utilizado para facilitar el proceso de fotosíntesis y regular los niveles de sales y líquido en las células lo cual asegura una planta fresca y saludable.

- **Molibdeno:**  
Elemento esencial para la fijación de nitrógeno y utilizado en el proceso de conversión de nitrato a amoniaco.
- **Manganeso:**  
De gran utilidad para aumentar la resiliencia de las plantas ante situaciones de alto estrés y utilizado en el proceso de activación de enzimas.
- **Zinc:**  
Requerido para la síntesis de hormonas de crecimiento y el desarrollo de raíces.
- **Boro:**  
Apoya en el proceso de crecimiento al fomentar la división de células y el metabolismo de carbohidratos.
- **Hierro:**  
Esencial para la transferencia de energía entre células y la producción de clorofila.
- **Cobre:**  
Mejora la estructura de las plantas al reforzar las paredes celulares mediante la formación de lignina. Esencial en la creación de estructuras maderosas.

El correcto suministro y balance de estos componentes en un sistema hidropónico es esencial para asegurar el crecimiento adecuado y el rendimiento de los cultivos. Ahora bien, su aplicación y control de manera individual sería sumamente difícil. Por esta razón, se han desarrollado fórmulas para proveer estos nutrientes en un sistema hidropónico. En la industria estas soluciones se conocen como solución concentrada A y B, donde la primera cuenta con los macro-nutrientes y nutrientes secundarios, mientras que la segunda cuenta con los micro-nutrientes [11]. Estas soluciones pueden ser creadas de manera independiente, o se pueden adquirir en el mercado. Es importante destacar que los porcentajes de concentración a utilizar en el sistema hidropónico dependerá del tipo de cultivo y sus requisitos. Por ejemplo, un cultivo de hortalizas requerirá mayores porcentajes de nitrógeno y nutrientes secundarios, mientras que plantas con flores y frutos, requerirán una mayor concentración de fósforo y potasio. Así mismo, cambios en la temperatura requerirán de un ajuste en la concentración total en el agua, puesto que, a mayores temperaturas, las plantas aumentarán su consumo de agua, mas no su dependencia en minerales, mientras que a menores temperaturas, se ve lo opuesto [11].

## 6.4. Características de la solución nutritiva del cilantro

El cilantro es una hierba bastante versátil la cual requiere de una baja cantidad de nutrientes para lograr una productividad significativa. De los nutrientes mencionados anteriormente, el cilantro requiere únicamente un control riguroso de los macro-nutrientes principales así como una baja cantidad de Calcio y Magnesio [13]. Este control de macro-nutrientes va de la mano con una regulación cuidadosa de la temperatura del agua debido a la relación entre la facilidad de absorción de los nutrientes y la temperatura de la solución alrededor de las raíces [14].

Según el estudio realizado por Currey y colaboradores, uno de los factores que más interfiere en el crecimiento y desarrollo del cilantro es la cantidad de fotones que reciben las plantas durante el día. Esto se puede traducir a la cantidad de horas de luz que requieren para su crecimiento óptimo, el cual se encuentra en un rango de 12 a 16 horas de luz diarias [13]. Una conclusión importante del estudio de Currey y colaboradores es que, si bien la concentración de luz disponible para la planta aumenta su productividad, no es necesario realizar un ajuste de la densidad de nutrientes debido al aumento en concentración de luz [15]. A continuación se detallan los parámetros del agua requeridos para el correcto desarrollo del cilantro en un sistema hidropónico [4]:

Características de la solución nutritiva	
Conductividad de la solución:	1.2 a 1.8 mS/cm
Concentración de oxígeno:	5.0 a 8.5 mg/L
Potencia de hidrógeno (pH):	5.5 a 6.7
Temperatura del agua:	15 a 20 °C (59 a 68 °F)
Nutrientes requeridos:	Nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio
Concentración de nutrientes:	NPK 15:15:15
Nutrientes adicionales:	0.5 % Nitrato de calcio y 0.5 % Sulfato de magnesio
Tiempo de crecimiento:	50 a 55 días
Espacio entre plantas:	18 cm

Cuadro 2: Parámetros esenciales para el crecimiento de cilantro en sistemas hidropónicos [17] [13] [18].

## 6.5. Monitoreo de parámetros para el crecimiento de plantas

Como se detalló anteriormente, los cultivos hidropónicos requieren de un control constante y preciso de una gran variedad de parámetros. El monitoreo adecuado de parámetros como el nivel de oxigenación del agua, la cantidad de nutrientes, el nivel de acidez de la solución, la temperatura del ambiente, temperatura del agua, y el nivel de humedad son esenciales para asegurar el crecimiento óptimo de las plantas. Tradicionalmente, estos parámetros se miden con una serie de pruebas químicas o sensores independientes. A continuación, se detallan los diferentes sensores que se pueden utilizar en un cultivo hidropónico para medir los parámetros del agua así como la importancia de cada uno de dichos parámetros.

### 6.5.1. Oxígeno disuelto en agua

Los sistemas hidropónicos se enfrentan a varios retos, entre estos, la cantidad de oxígeno disuelto en la solución de nutrientes. Este parámetro es esencial para el desarrollo saludable de las raíces, puesto que con bajos niveles de oxígeno, estas pueden experimentar una enfermedad conocida como hipoxia. Según el estudio realizado por Roosta, los niveles de oxígeno están directamente relacionados no sólo con el crecimiento de las raíces, sino también con los procesos fotosintéticos y de crecimiento de los cultivos hidropónicos. Este parámetro

<sup>1</sup>La conductividad se puede relacionar a la concentración de sales (nutrientes) de manera casi lineal y es indicativa de la disponibilidad de nutrientes [16]. Consultar la sub-sección [6.5.2] para más información.

afecta la absorción de Nitrógeno ya sea que se encuentre en la forma de sales de nitratos o amoníacos [19]. La concentración de oxígeno disuelto se mide en mg/L, lo cual se puede lograr con una gran variedad de sensores.

### **SEN0237 Gravity Analog Dissolved Oxygen Sensor de DFRobot**

El sensor analógico de oxígeno disuelto consiste en una sonda galvánica equipada con un electrodo el cual junto con una solución de hidróxido de sodio, también conocido como sosa cáustica, es capaz de detectar la concentración de oxígeno disuelto en agua. Dicho sensor debe ser calibrado antes de que se pueda utilizar, sin embargo, dicho proceso es relativamente sencillo [20].

Según el fabricante, el sensor se puede calibrar utilizando un método de punto singular o de doble punto. El primer proceso requiere de la preparación de una solución de oxígeno concentrado en agua, esto se puede lograr utilizando un batidor o con una bomba de aire inmersa en el agua destilada durante 10 minutos. Una vez terminen los 10 minutos, se espera a que dejen de salir burbujas, y se sumerge la sonda en la solución. Se mantiene mezclando la solución lentamente para evitar burbujas hasta que el nivel de voltaje se estabilice y se guardan los valores de temperatura y voltaje como punto de saturación. El proceso de doble punto es similar al descrito anteriormente, sin embargo, requiere de dos soluciones a dos temperaturas diferentes. Se recomienda que una se encuentre alrededor de 5°C y la otra entre los 35° y 38°C [20].

A continuación, se detallan las características del sensor:

<b>Sonda del sensor de oxígeno disuelto</b>	
Rango de detección:	0 a 20 mg/L
Rango de temperatura:	0 a 40 °C
Tiempo de respuesta:	90 segundos a 25 °C
Rango de presión:	0 a 50 PSI
Vida útil del electrodo:	1 año (bajo condiciones normales de uso)
Tiempo de reemplazo de membrana:	Cada 4 a 5 meses en agua clara
Tiempo de reemplazo de solución:	Una vez al mes
Largo del cable:	2 metros
Tipo de conector de la sonda:	BNC
<b>Placa de conversión de señales del sensor</b>	
Voltaje de alimentación:	3.3 a 5.5 VDC
Voltaje de señal de salida:	0 a 3.3 VDC
Cable de conexión:	BNC
Conector de señal:	Interfaz PH2.0 - 3 pin
Dimensiones:	42mm × 32mm (1.65in × 1.26in)

Cuadro 3: Características de funcionamiento del sensor SEN0237 de *DFRobot*.



Figura 7: Sensor analógico de oxígeno disuelto [20].

### 6.5.2. Electro conductividad (EC) en solución nutritiva

La electro conductividad, medida en  $\text{mS/cm}$  (miliSiemens por centímetro), es una propiedad de los materiales la cual se define como el inverso de la resistencia y refleja la facilidad con la cual una corriente atraviesa un material. En agua des-mineralizada, la concentración de iones libres es insignificativa, lo cual dificulta la transmisión de corriente a través de dicha sustancia. Esto se ve reflejado en una electro conductividad cercana o igual a cero. Al agregar minerales, particularmente sales con iones libres, los electrones son capaces de desplazarse con mayor libertad, aumentando la conductividad de la solución. En la hidroponía, las soluciones nutritivas utilizadas cuentan con sales, las cuales proporcionan a las plantas los nutrientes necesarios para su funcionamiento como se discutió en la Sección 6.3. Las raíces de las plantas absorben los nutrientes mediante un proceso de difusión, en el cual los iones de las sales atraviesan una membrana gracias a una diferencia en concentración [18]. Esto quiere decir, que al contar con niveles bajos de iones en el agua, las raíces no serán capaces de absorber adecuadamente los nutrientes que necesitan. Es importante considerar que en procesos de difusión pasiva, los iones se trasladan desde la mayor hacia la menor concentración. Es por esta razón que la electro conductividad se define como uno de los mejores indicadores de la facilidad de absorción de los nutrientes [16].

Si bien una baja concentración de nutrientes llevará a una disminución en la facilidad de absorción por parte de las raíces, una concentración demasiado elevada también presentará efectos negativos. Una electro conductividad elevada se verá reflejada en el desarrollo de las plantas, principalmente en el desarrollo de las raíces y el follaje. Como se menciona en la publicación de Atlas Scientific [16], niveles elevados de sales en la solución llevarán hojas descoloradas, pobre desarrollo de raíces, hojas y tallos marchitados, entre otros resultados negativos. Por esta razón, es sumamente importante contar con sistemas capaces de medir y regular la concentración de sales en sistemas hidropónicos.

## Sensor de electro conductividad *DFR0300*

El sensor *DFR0300 Gravity Analog Electrical Conductivity Sensor* de *DFRobot* cuenta con dos electrodos los cuales son introducidos en el agua para determinar su conductividad eléctrica. Esta señal es luego convertida a un valor de voltaje analógico y transmitido a un microcontrolador [21]. A continuación se detallan las características del sensor:

Sonda del sensor de conductividad eléctrica	
Constante de celda:	1.0
Rango de detección admisible:	0 a 20 mS/cm
Rango de detección recomendado:	1 a 15 mS/cm
Rango de temperatura:	0 a 40 °C
Vida útil del sensor:	Más de 6 meses según frecuencia de uso
Largo del cable:	100 cm
Placa de conversión de señales del sensor	
Voltaje de alimentación:	3.0 a 5.0 VDC
Voltaje de señal de salida:	0 a 3.4 VDC
Certeza de medición:	±5% F.S.
Cable de conexión:	BNC
Conector de señal:	Interfaz PH2.0 - 3 pin
Dimensiones:	42mm × 32mm (1.65in × 1.26in)

Cuadro 4: Características de funcionamiento del sensor DFR0300 de *DFRobot*.



Figura 8: Sensor analógico de electro conductividad [21].

### 6.5.3. Potencia de hidrógeno (pH)

El pH o potencia de hidrógeno se define como la facilidad con la que una sustancia disuelta en agua libera protones de hidrógeno ( $H^+$ ) o iones de oxidrilo ( $OH^-$ ). Según esta definición, una sustancia ácida se caracteriza por como aquella que libera protones de hidrógeno mientras que una sustancia básica es aquella que entrega iones de oxidrilo. La escala de pH es una función logarítmica, como se observa en la Figura 9 que describe la relación entre estas propiedades de una solución. Esta se encuentra en un rango de 0 a 14, en donde

0 corresponde a una sustancia ácida, mientras que 14 indica una extremadamente básica [22]. La solución de agua utilizada para alimentar las plantas en un cultivo hidropónico debe contar con un pH estable, usualmente definido por el tipo de planta que se desea cultivar. En el libro *Plant Factory Using Artificial Light*, el autor Wada describe cómo la regulación de pH en las soluciones nutritivas no es sólo esencial para el crecimiento de las plantas, sino también para asegurar que los nutrientes se mantengan en su estado óptimo. Wada indica que un pH por encima de 7.0 induce la precipitación del Hierro y Manganeseo, lo cual afectará la producción de clorofila y volverá a las plantas más susceptibles a estrés, mientras que un pH debajo de 4.5 implicará un daño a las raíces. La regulación de los niveles de pH en sistemas hidropónicos se pueden realizar mediante mediciones de electro conductividad, para determinar los porcentajes de bicarbonato en el agua, o utilizando un sensor de pH [23]. Ambos métodos presentarán resultados útiles para el control de dicho parámetro, sin embargo, contar con un sensor de pH permitirá obtener una lectura directa mientras que las lecturas de conductividad únicamente indicarán el pH según las sales presentes en la solución.

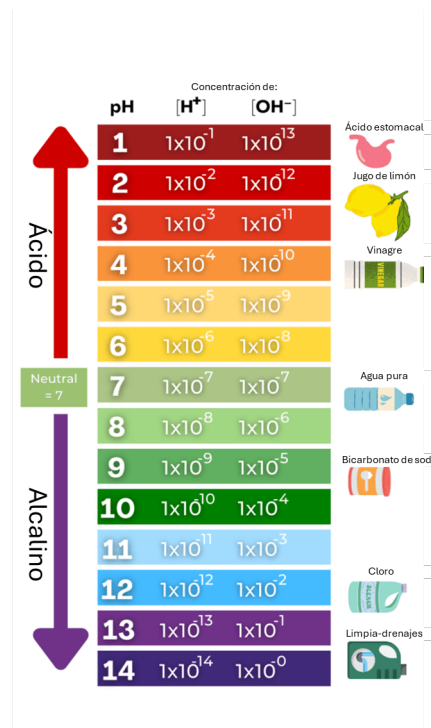


Figura 9: Escala de pH con valores adimensionales y logarítmicos [24].

### Sensor de pH *Gravity Analog pH Kit*

Este kit cuenta con un sensor de una construcción sencilla la cual lo hace fácil de utilizar. Al ser un sensor analógico, este requiere de un proceso de calibración utilizando soluciones cuyo pH sea conocido. Cuenta con un indicador led el cual se utiliza para determinar si el sensor se encuentra encendido o no. Adicionalmente, el conector utilizado para la placa de conversión de señales permite su fácil integración con placas de desarrollo como el Arduino o ESP32 [25]. Este kit de medición de pH es apto tanto para aplicaciones industriales, de

laboratorio, y de alimentos, lo cual lo hace ideal para sistemas hidropónicos. A continuación se detallan las características del sensor:

<b>Sonda del sensor de pH</b>	
Rango de detección:	2 a 13 pH
Rango de temperatura:	1 a 60 °C
Resolución:	± 0.1
Exactitud:	± 0.1
Tiempo de respuesta:	4 s
Presión máxima:	50 PSI
Profundidad máxima:	35 m
Conexión coaxial	SMA macho
Largo del cable:	1 m
Tiempo antes de calibración:	3 meses
Vida útil:	Mayor a 18 meses según uso
<b>Placa de conversión de señales del sensor</b>	
Voltaje de alimentación:	5.0 VDC
Voltaje máximo:	5.5 VDC
Corriente de operación:	3 mA
Conexión coaxial	SMA hembra
Tolerancia:	±0.015V
Exactitud:	± 0.2
Dimensiones:	42 mm × 32 mm (1.6 in × 1.2 in)
Indicador de potencia:	LED

Cuadro 5: Características de funcionamiento del kit de pH *Surveyor Analog pH Kit*.



Figura 10: Sensor analógico de potencia de hidrógeno (pH) [25].

#### 6.5.4. Temperatura de agua

La temperatura del agua es de gran importancia para las plantas puesto que está directamente relacionado a la capacidad de absorción de nutrientes. Esta temperatura es de especial importancia en las raíces, puesto que variaciones en la temperatura de estas afecta tanto la micro-biología que se desarrolle en las raíces como la habilidad de las mismas para absorber nutrientes. Adicionalmente, la temperatura afectará la precisión de lecturas de

electro conductividad así como pH y oxígeno disuelto [14]. Es por esta razón que la lectura y el control adecuado de la temperatura del agua es esencial en un sistema hidropónico.

### Sensor de temperatura de agua DS18B20

Uno de los sensores más fáciles de utilizar es el sensor de temperatura tipo sonda DS18B20. Este sensor utiliza el protocolo de comunicación 1-wire, lo cual reduce considerablemente la complejidad de conexión y la transmisión de datos. A continuación se detallan sus características [26]:

Sonda del sensor DS18B20	
Rango de medición:	-55 a 125 °C
Voltaje de operación:	3.5 a 5.0 VDC
Protocolo de comunicación:	1-wire
Resolución programable:	9 a 12 bits
Largo de cable:	1 metro

Cuadro 6: Características de funcionamiento del sensor de temperatura del agua.



Figura 11: Sensor tipo sonda de temperatura del agua [26].

#### 6.5.5. Temperatura y humedad ambiental

Las plantas son organismos particularmente susceptibles a las condiciones ambientales, tanto a los niveles de luz como a la temperatura y humedad disponible. Estos parámetros afectan diferentes procesos de las plantas, desde la absorción de nutrientes hasta el desarrollo de las hojas. Según el estudio realizado por Chia y Lim, la humedad ambiental presentó un impacto significativo en el desarrollo de cultivos, donde se observó un aumento en la masa de las plantas luego de su cosecha [27]. Los autores describen cómo las plantas, en un rango de humedad relativa (RH) alrededor del 85 %, presentan un aumento en su masa seca. Destacaron que a mayores porcentajes de humedad, las plantas presentan dificultades con las razones de transpiración, regulación de agua, desarrollo de área superficial de las hojas y una disminución en absorción de nutrientes. Por otro lado, destacaron que a menores concentraciones de humedad, las plantas aumentan su consumo de agua junto con sus tasas

de transpiración, lo cual puede presentar un riesgo en plantas que presentan dificultades en el control de las aperturas estomáticas, lo cual afecta los procesos de fotosíntesis [27].

Al igual que la humedad ambiental, la temperatura del aire alrededor de las plantas afectará su crecimiento. En el estudio realizado por Rusu y colaboradores, se analizó el crecimiento de plantas de albahaca bajo condiciones controladas con tal de determinar el impacto de dichos parámetros en el desarrollo de las plantas. Se estableció que si bien el control de la temperatura de la solución es esencial para el correcto desarrollo de las plantas, la temperatura del ambiente es igual de importante. Esto se debe a que la temperatura ambiental afectará los procesos de transpiración de las plantas, el proceso de fotosíntesis, la conductividad estomática y el crecimiento de las estructuras de la planta [28]. Por otro lado, ciertos compuestos bioactivos aumentan en concentración al estar en rangos de temperatura elevados (mayores a 30° C). Finalmente, los extremos de temperatura presentan un aumento en el estrés de las plantas, llevando a una mayor demanda de agua, lo cual puede aumentar la concentración de sales creando bloques [29].

### Sensor de temperatura y humedad DHT11

El sensor DHT11 es uno de los sensores más básicos y de bajo costo disponibles en el mercado para la medición de temperatura y humedad relativa en el entorno. Cuenta con un sensor capacitivo el cual es capaz de detectar el porcentaje de humedad relativo en el aire, así como una termo-resistencia la cual es capaz de detectar cambios en la temperatura ambiental. [30] Este sensor utiliza el protocolo *one-wire* lo cual minimiza los puertos a utilizar, y elimina la necesidad de puertos analógicos para realizar lecturas. Ahora bien, cuenta con un período de muestreo máximo de una lectura por segundo, lo cual hace que sea poco preciso en ambientes con alta variabilidad. A continuación se detallan las características del sensor.

<b>Sensor DHT11</b>	
Rango de medición de temperatura:	0 a 50 °C
Precisión de temperatura:	± 2° C
Rango de medición de humedad:	20 a 80 %
Precisión de humedad:	5 %
Voltaje de operación:	3.0 a 5.0 VDC
Corriente máxima:	2.5mA
Frecuencia de muestreo:	1Hz
Protocolo de comunicación:	<i>1-wire</i>

Cuadro 7: Características de funcionamiento del sensor DHT11 [30].



Figura 12: Sensor de temperatura y humedad DHT11 [31].

## 6.6. Actuadores y componentes auxiliares

### 6.6.1. Módulo RTC (reloj de tiempo real)

Los módulos RTC cuentan con un reloj interno el cual puede ser utilizado para determinar la hora y fecha con gran precisión. El módulo DS3231 cuenta con un protocolo de comunicación el cual permite conectar varios sensores en serie, reduciendo la cantidad de entradas y salidas requeridas en placas de desarrollo. A continuación se detallan las características del módulo [32]:

Placa del módulo RTC DS3231	
Voltaje de alimentación:	3.3 a 5.5 VDC
Precisión de reloj:	Error de 1 minuto a temperatura entre 0 y 40 °C
Salida programable de onda cuadrada:	Sí
Chip de memoria:	AT24C32 con capacidad de almacenamiento de 32kB
Dimensiones:	38 mm × 22 mm × 14 mm
Peso:	8g

Cuadro 8: Características de funcionamiento del módulo RTC DS3231.

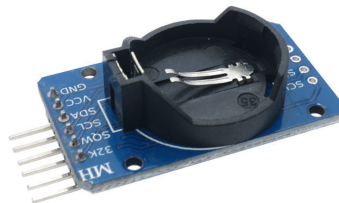


Figura 13: Módulo RTC DS3231 [32].

### 6.6.2. Luces de crecimiento NeoPixel WS2812B

Las tiras flexibles de luces LED NeoPixel de Adafruit consisten de luces individualmente programables, las cuales se pueden controlar mediante un único puerto de datos gracias al protocolo interno utilizado [33]. Estas tiras de luces cuentan con una capa aislante la cual las protege de polvo y agua. Por otro lado, estas tiras son fáciles de modificar, se pueden acortar y conectar entre sí a diferentes longitudes, siempre y cuando se mantengan conectados adecuadamente las entradas y salidas digitales utilizadas por el protocolo.

Luces LED con control integrado WS2812	
Voltaje de alimentación:	4.5 a 5.5 VDC
Ancho de banda color rojo:	620-630 nm
Ancho de banda color azul:	465-475 nm
Ancho de banda color verde:	515-530 nm
Corriente por LED:	0.036 mA
Peso por metro:	39g

Cuadro 9: Características de tiras de luces LED NeoPixel de Adafruit.



Figura 14: Tira de luces LED neopixel de Adafruit [34].

### 6.6.3. Ventiladores para circulación de aire

Se seleccionaron ventiladores de 120 V CA con tal de facilitar la integración de otros sistemas de enfriamiento en futuras iteraciones del sistema, las cuales pueden llegar a necesitar una alimentación de alto voltaje. Los ventiladores SunFlow presentaron un consumo eléctrico considerablemente bajo junto con un tamaño mediano y puntos de fijación en diferentes secciones [35].

Ventilador SunFlow	
Voltaje de alimentación:	110 a 220 VCA
Corriente requerida:	0.04 A
Velocidad de giro:	2500 RPM
Dimensiones:	80 × 80 × 25 mm (ancho, alto y grosor)

Cuadro 10: Características de los ventiladores utilizados [35].



Figura 15: Ventilador utilizado para flujo de aire [35].

## 6.7. Sistemas de control y conectividad con la nube

### 6.7.1. Lectura, procesamiento y control de datos

En la sección anterior se detallaron diferentes sensores y módulos los cuales estarán recolectando datos necesarios para el funcionamiento correcto del sistema. Estos componentes estarán enviando datos tanto analógicos como digitales, los cuales serán recolectados y procesados por un módulo de procesamiento dedicado. Los microcontroladores presentan la capacidad de leer los datos tanto analógicos como digitales y de procesar la información recibida. Las principales ventajas del uso de microcontroladores es que permiten no solo leer la información de los sensores, sino realizar el procesamiento necesario para utilizarlos y activar los actuadores necesarios para controlar parámetros. La combinación de la lectura, el procesamiento y el control permitirá regular parámetros ambientales y del agua. Finalmente, permitirán enlazar el sistema al internet de las cosas, logrando transmitir datos a la nube.

#### Placa de desarrollo *ESP WROOM-32*

La ejecución de los procesos de control así como la recolección de datos de los sensores instalados requiere del uso de un microcontrolador. Las placas de desarrollo de la familia ESP32 son de gran utilidad, puesto que permiten la fácil integración del módulo ESP32 en cualquier proyecto. El módulo ESP32 es uno de los microcontroladores más versátiles y de menor costo disponibles en el mercado. Este cuenta con conectividad WiFi, *Bluetooth v4.2*, *Bluetooth Low Energy*, pines analógicos, diferentes protocolos de comunicación serial y paralela, dos núcleos de procesamiento y compatibilidad con el lenguaje de programación de Arduino. Adicionalmente, las placas de desarrollo diseñadas alrededor de este microcontrolador cuentan con un costo reducido y bajo consumo eléctrico, lo cual lo hace ideal para aplicaciones con limitantes de costos. A continuación se detallan las características generales de la placa de desarrollo *ESP-WROOM-32* [36]:

Placa de desarrollo <i>ESP WROOM-32</i>	
Procesador:	2 núcleos hasta 240 MHz
WiFi:	2.4 GHz hasta 150 Mbits/s
<i>Bluetooth</i> :	<i>Bluetooth Low Energy</i> y <i>Bluetooth</i> v4.2
Arquitectura del procesador:	32 bits
Memoria RAM:	520 KB
Cantidad de pines IO:	38
Cantidad de pines tipo ADC:	16
Botones disponibles:	Botón de arranque y reinicio
Leds disponibles:	Indicador LED de estado
Puente USB a UART:	CP2102

Cuadro 11: Características de funcionamiento y conexión de la placa de desarrollo *ESP WROOM-32*.

Periféricos adicionales
Sensor capacitivo integrado
Convertor Digital Analógico
I2C ( <i>Inter-Internal Circuit</i> )
UART ( <i>Universal asynchronous receiver/transmitter</i> )
SPI ( <i>Serial Peripheral Interface</i> )
PWM ( <i>Pulse Width Modulated</i> )

Cuadro 12: Protocolos de comunicación y otros periféricos disponibles en el *ESP WROOM-32*.

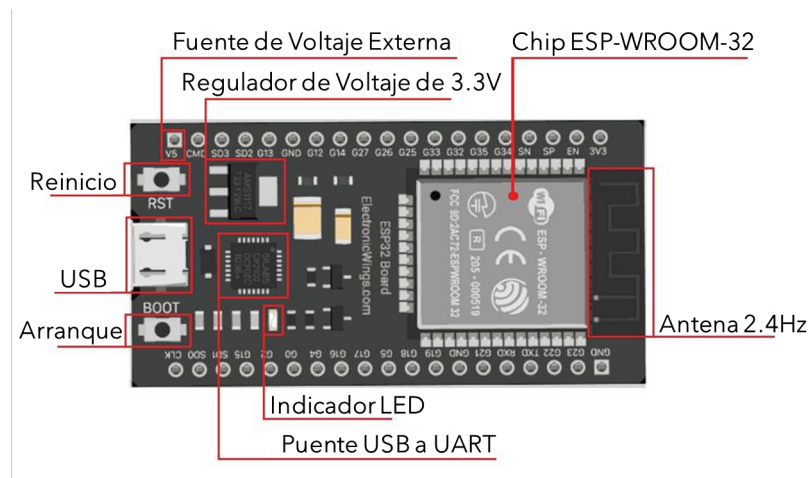


Figura 16: Componentes de la placa de desarrollo ESP WROOM-32 [36].

### 6.7.2. El internet de las cosas (IoT)

El internet de las cosas se refiere a la capacidad de conectar dispositivos de uso cotidiano al internet para compartir parámetros de funcionamiento y otros datos entre diferentes dispositivos. La capacidad de compartir datos de manera inalámbrica con poca intervención

humana hace de este proceso ideal para la automatización de procesos en diferentes sectores, desde el hogar hasta la ciudad entera. En general, los dispositivos IoT se pueden categorizar en sensores, actuadores y controladores, donde estos cumplen la función de recolectar datos y activar procesos respectivamente. Un sistema IoT básico funciona mediante un ciclo de retroalimentación constante de recolección, envío y análisis de datos para controlar diferentes eventos o indicar el estado de estos. El internet de las cosas se puede encontrar en una gran variedad de aplicaciones, desde la industria de manufactura, procesos de logística y transportación de productos hasta la agricultura. [37]

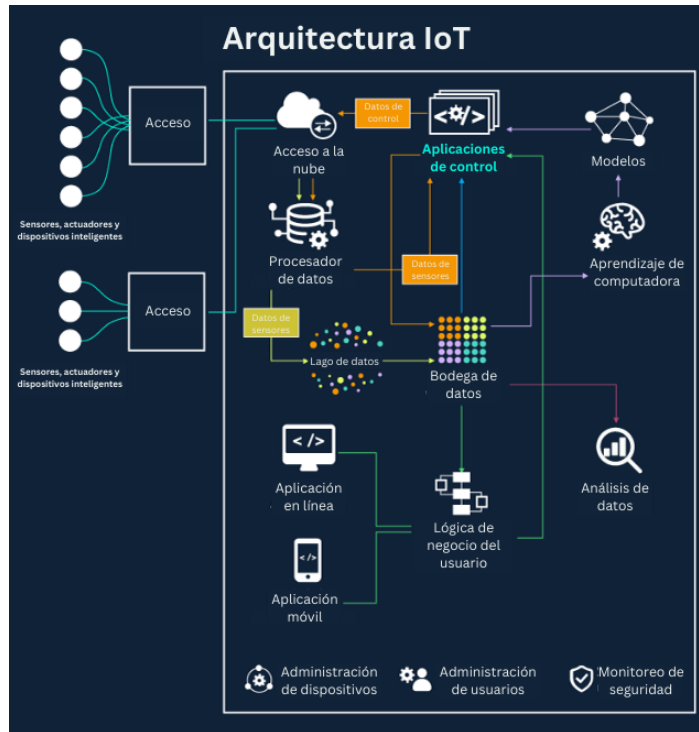


Figura 17: Diagrama de la arquitectura IoT generalizada [38].

### 6.7.3. Protocolo de comunicación HTTP

El internet funciona gracias a una serie de protocolos de comunicación que permiten la transferencia de datos como imágenes, texto, videos y audios entre servidores y usuarios. Uno de los protocolos fundamentales para la transmisión de estos datos es el protocolo HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*) o Protocolo de Transferencia de Hipertexto. La primera versión de HTTP para la transferencia de datos fue utilizada en 1990 como una herramienta para enviar datos a un usuario. Esta primera versión se conoce como HTTP/0.9. Esta iteración del protocolo se conoció como el protocolo de una línea, puesto que contaba con una gran cantidad de limitaciones, permitiendo únicamente realizar búsquedas de elementos como páginas escritas en HTML, imágenes o archivos específicos [39]. Unos años después, gracias a un esfuerzo conjunto entre el MIT, *Microsoft* y otras empresas, se desarrolló el protocolo HTTP/1.1. Una de las ventajas principales de este nuevo protocolo consistía en la adición de sistemas para el envío de datos a un servidor. Adicionalmente, se definieron nuevas reglas que permitieron que este sistema fuese más estable e incluso permitiera la

transferencia de datos de manera simultánea [40]. Este protocolo estableció los fundamentos para el desarrollo de futuras versiones, actualmente, las más utilizadas son es la versión HTTP/2.0 y HTTP/3.0.

El protocolo HTTP consiste en el uso de una solicitud con una instrucción específica la cual es transmitida desde un usuario o cliente (*client*). Esta solicitud se realiza mediante una conexión TCP o UDP dependiendo de la versión del protocolo, y cuenta con una estructura estandarizada para extraer, agregar, cambiar o eliminar información en el servidor. Una solicitud para retirar datos presenta la estructura observada en la Figura 18. Las palabras *GET*, *POST*, *PUT*, *PATCH* y *DELETE* son utilizadas para indicarle al servidor durante la solicitud realizada las acciones a realizar. Adicionalmente, se especifica la dirección del servidor junto con información importante para la transacción y el contenido del mensaje en caso de que este sea requerido [41]. Finalmente, el protocolo establece un estándar para códigos de error, los cuales brindan información acerca del estado de la conexión. Estos se clasifican en cinco categorías diferentes, con rangos de 100 códigos por categoría. Cada una de las categorías representa información específica relacionada a la conexión, a la respuesta del servidor o a errores relacionados con el paquete de solicitud o envío de datos [42].



Figura 18: Estructura de una solicitud para retirar datos en el protocolo HTTP/1.1 [41].

Las solicitudes realizadas por el cliente son dirigidas directamente al servidor indicado en la dirección, sin embargo, usualmente se utilizan dispositivos intermedio para realizar dicha conexión. Una vez que el servidor recibe la solicitud, este devuelve una respuesta con un encabezado en el cual se detallan las características del archivo, así como ciertos códigos para indicar el estado de la conexión. Adicionalmente, la respuesta del servidor contará con la información solicitada por el cliente, ya sea esta un segmento de texto, un archivo, una página web o un video. Gracias a su simplicidad, este protocolo es el más utilizado hoy en día para intercambios de información en la red [41].

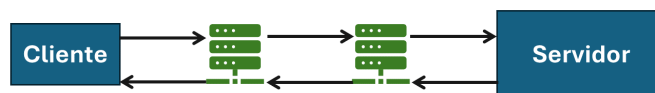


Figura 19: Diagrama de la comunicación entre cliente y servidor mediante el protocolo HTTP [41].

## Comunicación WiFi con *Dweet.io*

*Dweet.io* es un servicio abierto al público y totalmente gratuito que permite la transferencia de datos entre dispositivos funcionando como servidor para comunicaciones mediante HTTP. *Dweet.io* utiliza un tema, llamado *Thing*, el cual funciona como un servidor que recibe solicitudes mediante HTTP. Esta funcionalidad permite que diferentes dispositivos con conexión a la red puedan solicitar información almacenada o cargar nuevos datos a este servidor utilizando la dirección del tema. Una de sus mayores ventajas es que almacena datos en la forma de texto, el cual es distribuido en el cuerpo de las solicitudes HTTP. Esto permite almacenar diferentes valores de manera legible para cualquier humano, facilitando así el proceso de recolección e intercambio de datos. Es importante destacar que al ser gratuito, este servicio es completamente público y los mensajes pueden ser leídos por cualquiera con acceso a este servicio [43]. Adicionalmente, los mensajes enviados a los servidores de *Dweet.io* son almacenados únicamente durante 24 horas, a menos de que se pague una suscripción a un servidor privado.

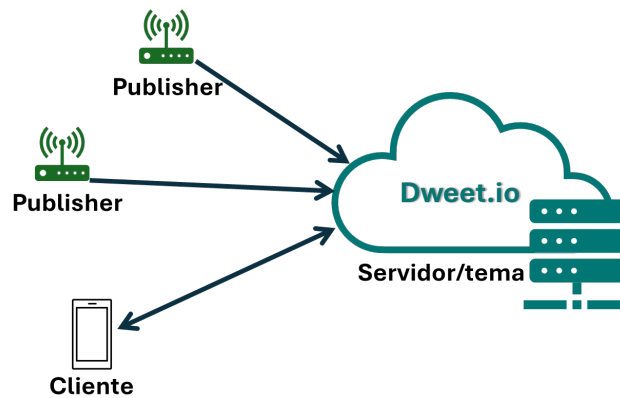


Figura 20: Diagrama de la comunicación entre cliente y servidor de *Dweet.io*.

---

## Diseño y ensamblaje del sistema hidropónico

---

En el presente capítulo se detallan los procesos, metodologías, retos y soluciones encontradas durante el desarrollo de la estructura física del sistema hidropónico. Este proceso de desarrollo se puede segmentar en tres etapas esenciales: Diseño de estructura, diseño de circuitos y la construcción del sistema.

### 7.1. Componentes del sistema

Los diferentes componentes seleccionados para el diseño e implementación del sistema se categorizan en tres grupos distintos según su función dentro del sistema. Entre estos componentes se encuentran sensores, actuadores, microcontroladores e incluso estructurales. Todos estos elementos juegan un papel clave en el funcionamiento del sistema, y como se detallará en el resto del capítulo, se integran de manera que permiten obtener datos puntuales de los parámetros hidropónicos a monitorear y controlar. A continuación se detallan las categorías y de los componentes utilizados por el sistema:

- **Estructura hidropónica:**

- Bomba de circulación y depósito de almacenamiento de solución nutritiva disuelta en agua.
- Canales de crecimiento, tuberías de conexión y manguera de suministro principal (unión entre depósito y canales de crecimiento).
- Bomba de aire para oxigenación del agua en el sistema.
- Nailon negro flexible para aislar el sistema de luz externa.

- Estantería sobre la cual estarían montados los canales de crecimiento y demás componentes.
- **Sensores y procesamiento de datos:**
  - Sensores de temperatura y humedad ambiental DHT11.
  - Sensores de temperatura del agua DS18B20.
  - Sensor de nivel de pH del kit de *Atlas Scientific*.
  - Módulo de reloj de tiempo real (RTC) para sincronización de hora del sistema.
  - Microcontrolador ESP WROOM-32 de *HiLetgo* para procesamiento de datos.
- **Actuadores y fuentes de electricidad:**
  - Servomotores MG90S para accionamiento de válvulas de bola para regulación de niveles de pH en la solución nutritiva.
  - Ventiladores *SUNFLOW* de corriente alterna activados mediante relés *SHORI SH3-5-1CS*.
  - Tiras de luces LED *NeoPixel WS2812B* de *Adafruit* para regular la luz recibida por las plantas.
  - Fuente conmutada MAX S-25-10 y S-25-5, de 10 y 5 amperios a 5VDC respectivamente, para alimentación de sensores, actuadores y el microcontrolador.

## 7.2. Diseño de la estructura

El diseño del sistema atravesó diferentes etapas de iteración, en las cuales se encontraron áreas de mejora que facilitaron el proceso de manufactura y adquisición de la estructura. Durante las etapas iniciales, se propuso una iteración la cual se centraba en un proceso de manufactura extenso, utilizando como base perfiles angulares de aluminio 6061-T6. Si bien este diseño de la estructura cumplía con algunos de los requerimientos, se determinó que el proceso de manufactura sería un factor considerable, por lo que se diseñó una nueva iteración utilizando una estructura base prefabricada. A continuación se detallan las iteraciones diseñadas así como las consideraciones generales que llevaron a la elección de la última iteración para su construcción.

### 7.2.1. Requerimientos físicos y restricciones de espacio

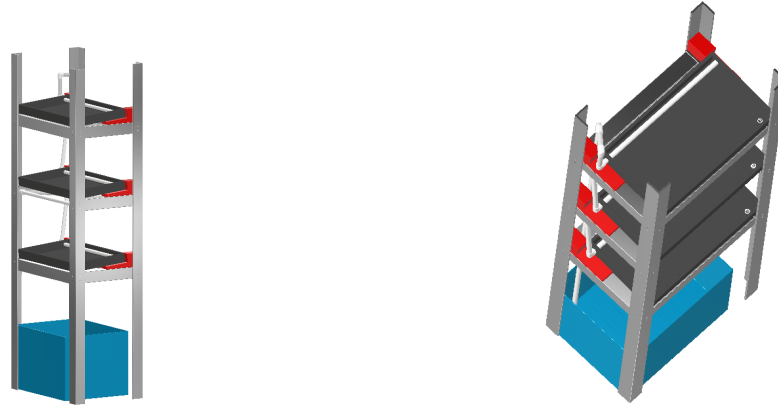
La estructura física del sistema se diseñó para que integrara todos los componentes necesarios para el funcionamiento del sistema hidropónico automático. Entre estos, se resaltan el depósito de almacenamiento de solución nutritiva, los canales de crecimiento, las tuberías de distribución de agua, los diferentes sensores, ventiladores, luces de crecimiento y actuadores, así como el sistema de control y la fuente de potencia. Esto, junto con las restricciones de espacio establecidas en los objetivos específicos del presente trabajo de graduación, establecieron requerimientos críticos relacionados a la estructura del sistema los cuales se detallan a continuación:

- Altura máxima aproximada de 175 cm para acomodar espacio entre repisas de aproximadamente 40 cm.
- Ancho de repisas de 70 cm para acomodar plantas con un espacio de 18 cm entre sí.
- Adaptabilidad para instalar sensores, actuadores y demás elementos necesarios para el funcionamiento del sistema, tanto antes como después del ensamblaje de la estructura principal.
- Rigidez y resistencia estructural para soportar el peso del agua circulando por el sistema.
- Resistencia a la corrosión debido a exposición a altos niveles de humedad.
- Repisas de madera o plástico rígidas que permitan realizar modificaciones como agujeros o ranuras para ventilación y fijación de componentes.
- Facilidad de construcción con un proceso de manufactura sencillo sin el uso de herramientas altamente especializadas.

### 7.2.2. Primera iteración, estructura de aluminio

Como se mencionó al inicio de esta sección, la primera iteración de la estructura principal se diseñó utilizando perfiles tipo L estándares de aluminio 6061-T6, de 1/4 de pulgada de grosor por dos pulgadas en cada lado. Se seleccionó este material considerando su facilidad de corte, baja densidad y alta disponibilidad en el país. Adicionalmente, se consideró que esta aleación es resistente a la corrosión y admite fácilmente la aplicación de recubrimientos tanto estéticos como funcionales [44].

Como se observa en la Figura 21, la estructura se diseñó utilizando cuatro perfiles verticales, unidos por una serie de perfiles horizontales para las repisas a distancias preestablecidas. Una de las primeras limitaciones observadas durante las etapas de evaluación de este diseño fueron los altos requerimientos de maquinado para su manufactura. Según el diseño elaborado, esta iteración requería agujeros y cortes precisos, los cuales serían necesarios para instalar tornillos de fijación y tuberías de distribución.



(a) Vista general de la estructura

(b) Vista superior para detalles

Figura 21: Estructura inicial diseñada utilizando perfiles de aluminio tipo L de dos pulgadas.

Una vez completado el modelo CAD del sistema, se analizaron los requerimientos de manufactura. Si bien se eliminó la necesidad de realizar soldaduras en aluminio para unir los diferentes perfiles esta decisión de diseño implicó agregar una mayor cantidad de agujeros para elementos de fijación mecánicos. Por esta razón, el proceso de fabricación requeriría tanto del corte de los perfiles, utilizando sierra de calar u otras herramientas de corte afines, como el taladrado de agujeros. Adicionalmente, varios de los perfiles, como el perfil horizontal con perforación para tubería de distribución [22], contaban con agujeros de diámetros mayores para tuberías, los cuales deberían ser realizados utilizando una máquina fresadora. Considerando los diferentes procesos de maquinado, se determinó que esta etapa de construcción requeriría de una inversión de tiempo considerable.

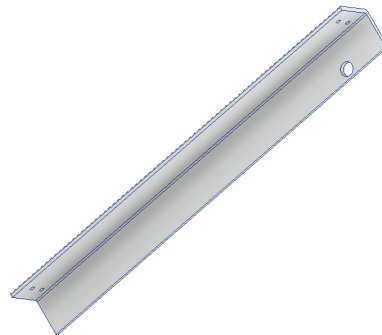


Figura 22: Perfil horizontal con perforación para tubería de distribución.

## Canales de crecimiento

Como se observa en la Figura 21, en esta iteración se contempló el uso de bandejas de forraje las cuales permitirían el flujo del agua sobre su superficie, logrando así el suministro de nutrientes a las plantas. Adicionalmente, se contemplaba utilizar tuberías de PVC de 0.5 pulg, las cuales estarían a cargo de distribuir la solución nutritiva hacia las bandejas de crecimiento y entre cada nivel del sistema. Al utilizar tuberías de distribución para la solución nutritiva, se diseñaron perforaciones que serían necesarias en las bandejas de crecimiento para integrarlas con las tuberías. Adicionalmente, sería necesario implementar una cobertura para las bandejas de crecimiento que mantuviera oscuro el entorno de las raíces, mientras que brindaban una estructura de fijación para las plantas. Este cobertor agregaría tiempo de manufactura, requiriendo de un proceso de impresión por partes el cual se traduciría en un aumento en la complejidad de construcción.



Figura 23: Bandejas de forraje a utilizarse como canales de crecimiento.

Una de las ventajas identificadas en las bandejas de forraje fue su versatilidad a la hora de distribuir las plantas. Sin embargo, se observó que las bandejas disponibles en el mercado guatemalteco, bandejas de forraje 23, contaban con canales que dirigían el flujo de agua, y podrían llevar a puntos secos. Estas áreas sin agua se deben a la irregularidad en el flujo del agua a través de la superficie de las bandejas, lo cual presentaría un riesgo significativo hacia las plantas. Finalmente, las modificaciones necesarias para asegurar un flujo de agua constante entre las repisas generaría puntos de fuga los cuales podrían llegar a presentar un riesgo para el sistema. Por estas razones, se decidió iniciar una nueva iteración para el diseño del sistema.

### 7.2.3. Segunda iteración, estructura prefabricada

Si bien la primera iteración permitía una mayor flexibilidad en cuanto al diseño de la estructura, el proceso de fabricación dificultaba cualquier modificación que llegara a ser necesaria. Adicionalmente, al utilizar perfiles de aluminio, esta primera iteración requeriría de una gran cantidad de material, lo cual dificultaría el proceso de transporte e instalación. Por esta razón, se inició una segunda iteración buscando utilizar una estructura prefabricada, la cual se pudiera adecuar de manera que fuera funcional en el sistema sin grandes modificaciones.

Al realizar un proceso de búsqueda de repisas disponibles en el mercado, se encontró una estantería de 152 cm de altura y 76 cm de ancho. Adicionalmente, cuenta con repisas de madera MDF con marcos de metal, las cuales podían ser instaladas a diferentes alturas. Se creó un modelo 3D de la estantería [24](#), con el cual fue posible observar los beneficios de esta selección en el diseño. Algunas de las ventajas incluyen a las estanterías de madera, las cuales se pueden modificar con facilidad y permiten el uso de tornillos de madera para la fijación de diferentes componentes. Así mismo, los perfiles con ranuras de ojo de cerradura [25](#), se pueden aprovechar para instalar diferentes componentes en el sistema utilizando tornillos y tuercas sin la necesidad de modificar la estructura física.

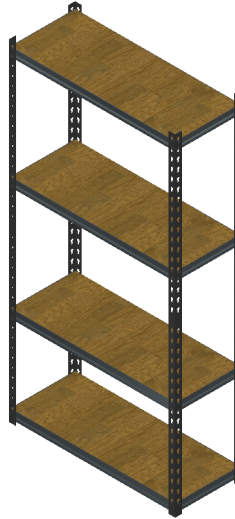


Figura 24: Modelo 3D de la estantería prefabricada.

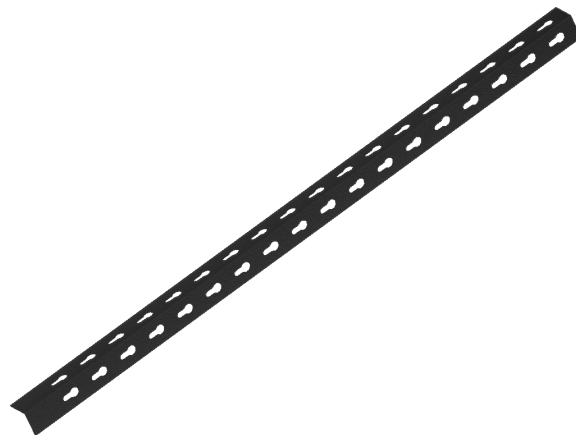


Figura 25: Perfil con ranuras de ojo de cerradura.

### Canales de crecimiento

Una vez se había definido la estructura de soporte del sistema en la segunda iteración, se continuó con el diseño del sistema de distribución de nutrientes. Con tal de mejorar

la canalización del agua y asegurar que las raíces de las plantas recibieran una cantidad adecuada de agua, se seleccionaron tuberías de PVC para los canales de crecimiento de las plantas. Estas tuberías, además de asegurar que el agua se desplazara por una ruta predecible y predeterminada, facilitaban el proceso de construcción. Adicionalmente, estas tuberías de PVC se encontraban con facilidad en el mercado guatemalteco y no requerían de grandes esfuerzos para su ensamblaje. Por otro lado, el uso de estas tuberías elimina la necesidad de encontrar una forma cubrir los canales de crecimiento, puesto que únicamente es necesario crear agujeros puntuales en la tubería para el crecimiento de las plantas.

Al tomar en cuenta las consideraciones anteriores, se seleccionaron tuberías de 2.5 pulg, las cuales, junto con uniones de codo a  $90^\circ$  y uniones tipo T, permitirían la elaboración de los canales de crecimiento del sistema. Si bien la mayoría de las modificaciones necesarias para las tuberías consistirían en cortes, realizaron perforaciones de 1.25 pulg de diámetro las cuales permitirían introducir las canastas de crecimiento en las tuberías. Finalmente, se colocaron los canales de crecimiento alineados al borde largo del la estantería. Esta selección permitiría utilizar dos tuberías transversales con una longitud aproximada de 500 mm en cada nivel.

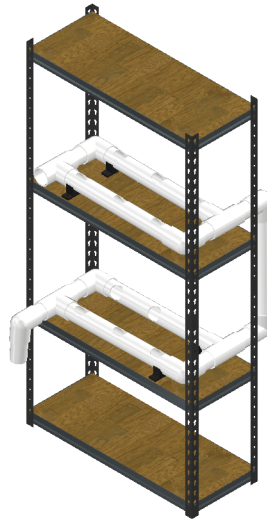


Figura 26: Estructura con canales de crecimiento.

Como se observa en la figura anterior, los canales de distribución de solución nutritiva y de crecimiento, se diseñaron completamente utilizando tuberías y accesorios de PVC. Si bien las tuberías serían capaces de transportar el agua sin dificultad, aún sería necesaria una inclinación para asegurar el flujo constante de agua. Tomando en cuenta la curvatura de las tuberías, se diseñaron dos soportes los cuales permitirían crear una inclinación tanto a lo largo de la tubería de crecimiento como a lo largo de las tuberías de conexión. Estas inclinaciones serían necesarias para promover el flujo del agua desde el nivel superior hasta el inferior, y a través de las tuberías de crecimiento. Como se observa en la Figura 27, los soportes consistirían de piezas rectangulares con una sección semicircular inclinada a un ángulo de  $0.8^\circ$  respecto a la superficie de la repisa, lo cual brindaría la pendiente necesaria para el flujo de agua requerido por el sistema. Estos soportes serían impresos en 3D para facilitar su manufactura y se utilizarían tornillos para fijarlos a las superficies de las repisas. Cabe mencionar que se crearon dos soportes idénticos de alturas diferentes con tal de obtener

una diferencia en elevación entre el canal frontal y posterior. La inclinación resultante de esta diferencia permitiría que el agua se distribuyera de manera uniforme entre ambas tuberías y que pudiera alcanzar al próximo nivel.

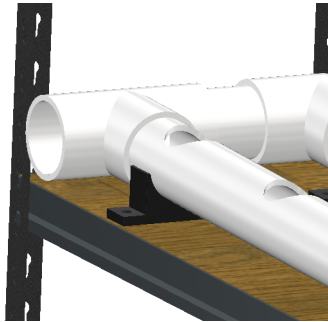


Figura 27: Soporte con inclinación de 0.8°, respecto a la horizontal, para tuberías de crecimiento.

#### 7.2.4. Comparación de las iteraciones de diseño de la estructura

Si bien la segunda iteración del diseño presentó grandes mejoras en cuanto a la facilidad de ensamblaje y construcción, se realizó una comparación entre ambas iteraciones para determinar cuál sería utilizada en el sistema final. A continuación, se encuentra un cuadro comparativo en donde se evaluaron ambas iteraciones respecto a los requerimientos establecidos en la Sección [7.2.1](#), del presente capítulo.

	<b>Primera iteración</b>	<b>Segunda iteración</b>
<b>Altura max. (cm)</b>	175	152
<b>Ancho de repisas (cm)</b>	58.67	76
<b>Adaptabilidad</b>	Pre construcción	Pre y post construcción
<b>Rigidez estructural</b>	Media	Alta
<b>Resistencia a la corrosión</b>	Alta	Media
<b>Repisas de madera</b>	Sin repisas de madera	Repisas de MDF
<b>Facilidad de construcción</b>	Manufactura compleja	Ensamblaje rápido

Cuadro 13: Análisis comparativo entre primera y segunda iteración de la estructura.

Luego de analizar las características del diseño desarrollado para ambas iteraciones mostradas en el Cuadro [13](#), se determinó que la segunda iteración sería la más factible para su desarrollo. Esto debido a que cumplió de mejor manera con los requisitos de facilidad de construcción, adaptabilidad [1](#) y rigidez estructural [2](#). Una vez se determinó estructura a utilizar, se iniciaron los procesos de diseño secundarios.

<sup>1</sup>Esta se ponderó en función de la facilidad de realizar modificaciones una vez se haya instalado el sistema.

<sup>2</sup>Se determinó que la rigidez estructural de la primera iteración sería menor debido a una mayor altura y menor ancho de repisas, lo cual haría de la estructura menos estable

### 7.2.5. Diseño de componentes auxiliares

Luego del proceso de diseño de la estructura principal, se inició el diseño de los componentes que permitirían integrar los sensores y actuadores requeridos. Con tal de facilitar el proceso de manufactura, se definieron las siguientes restricciones y consideraciones. Estas deberían ser cumplidas con todos los diseños realizados, asegurando un ensamblaje sencillo.

- Simplicidad para impresión 3D: Para modelos pequeños, que su diseño cuente con chaflanes, redondeados y ángulos adecuados con tal de facilitar su manufactura utilizando impresoras 3D con materiales como PLA, ABS o PETG.
- Factibilidad de manufactura utilizando corte láser: En caso de que el modelo sea demasiado grande, que este pueda ser fabricado utilizando corte láser con materiales como MDF o acrílico.
- Facilidad de ensamble: Que los modelos se puedan ensamblar fácilmente utilizando tornillos u otros medios mecánicos.

Utilizando las consideraciones anteriores, se diseñaron tres componentes secundarios. En la Figura 28 se observa el primer componente, utilizado para fijar los sensores de temperatura y humedad DHT11 a las repisas de crecimiento. La estructura utilizada para fijar estos sensores debería ser capaz de elevar el sensor en una ubicación central en cada repisa de crecimiento. Esto permitiría que la información recolectada fuese representativa de las condiciones ambientales locales alrededor de las plantas de cilantro. Dicha elevación se logró mediante el uso de una varilla de madera de 0.5 pulg de diámetro y 160 mm de alto. Los sensores estarían sujetos por un anillo con una ranura con el grosor del PCB en el cual se encontraba montado cada sensor. Estos anillos encajarían en el diámetro de la varilla, y estarían fijados utilizando un tornillo de madera.

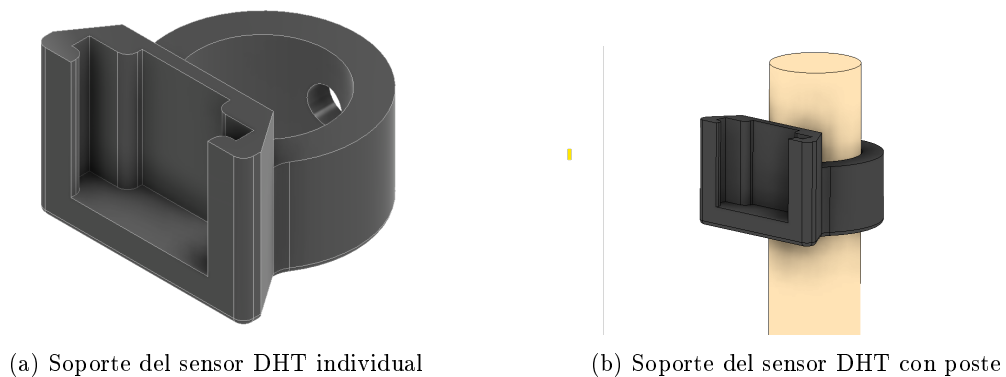


Figura 28: Soporte para sensores DHT11 en varillas de 0.5 pulg.

Una vez establecido el diseño para fijar los sensores de temperatura y humedad ambiental, se continuó con el diseño de una estructura para la sujeción de los ventiladores. Se buscó fijar estos elementos a la estructura metálica del sistema, aprovechando las ranuras de ojo de cerradura presentes en los postes. El soporte de los ventiladores se acopló a la estructura

metálica utilizando un tornillo de 0.25 pulg para el cual se diseñó un agujero en la parte central del soporte [29](#). Durante la primera iteración de este diseño, no se consideró el ancho de los postes metálicos, por lo que se presentó una ligera obstrucción del ventilador [30a](#). Esto se corrigió en la segunda iteración al aumentar el ancho de la pieza, asegurando así que el ventilador se encontrara libre del poste ranurado [30b](#).



Figura 29: Soporte para ventiladores con tornillos de 0.25 pulg, vista frontal e isométrica.

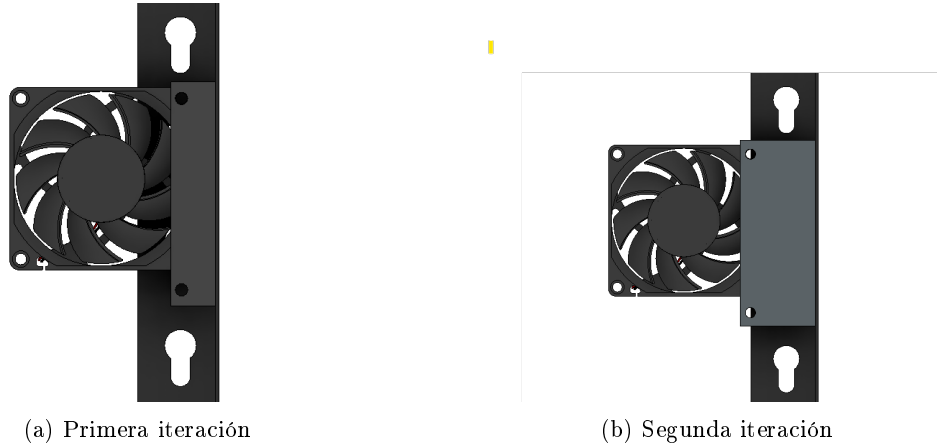


Figura 30: Versiones diseñadas del acople del ventilador con poste ranurado de la estructura.

Finalmente, se diseñó el acople con la válvula de bola utilizada para regular el suministro de sustancia de regulación de pH. Este componente fue diseñado considerando la geometría de los servomotores MG90S utilizados para accionar las válvulas. Con tal de facilitar el acople con la válvula, se diseñó una rosca la cual permitiría fijar el servomotor en una posición relativa a la llave de la válvula. Con tal de transferir el movimiento entre el servomotor y la llave, se utilizarían cables delgados que fueran capaces de atravesar los agujeros en el brazo de los servomotores, y que serían introducidos en pequeños agujeros maquinados en cada llave. El diseño final aseguró que quedaran alineados tanto el eje del servomotor como el de

la llave de la válvula, permitiendo un acople con facilidad entre ambos sistemas 31.

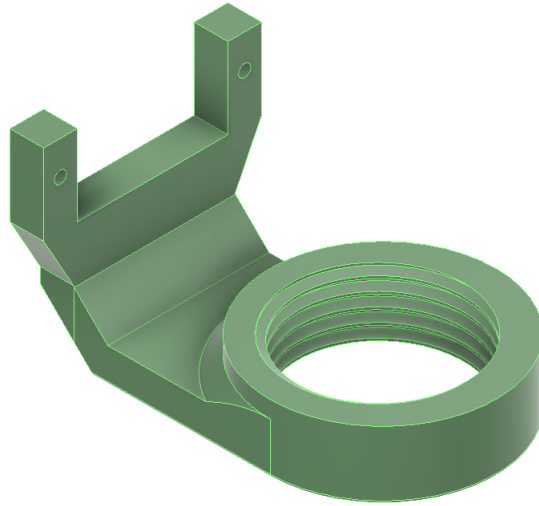


Figura 31: Acople entre servomotor MG90S y válvula de bola para regulación de pH.

#### 7.2.6. Modelado CAD de la estructura

Una vez finalizados los diferentes modelos a instalar en el diseño de la segunda iteración, se integraron todos los componentes para tener un modelo completo del sistema. El modelo permitió visualizar la ubicación de cada uno de los componentes, estableciendo una metodología para su construcción. Adicionalmente, permitió validar de manera preliminar el proceso de ensamblaje de los diferentes componentes y cómo se comportarían en el sistema físico.

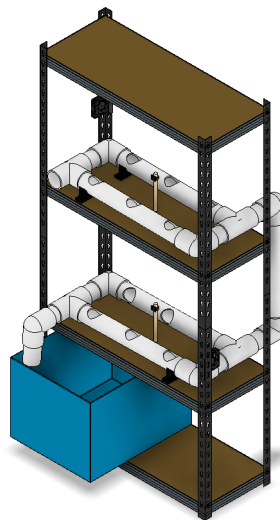


Figura 32: Ensamblaje del modelo CAD de la estructura principal del sistema.

### 7.3. Construcción del sistema

Una vez completado el proceso de diseño general, se inició la construcción física del sistema. Como primer paso, se ensambló la estantería de metal, la cual sería utilizada como estructura principal para el sistema. Este proceso se logró con la ayuda de un mazo de goma y una cinta métrica, con los cuales se fijaron las repisas de la estantería a las alturas definidas en la etapa de diseño. Durante la construcción, se observó que la repisa intermedia que soportaría los canales de crecimiento superiores, obstruiría el flujo de aire, por lo que se realizó una modificación durante el proceso de ensamblaje. Esta consistió en agregar 8 ranuras que partieran del centro de la plancha y se extendieran hacia los extremos laterales, las cuales permitirían el flujo de aire del primer al segundo nivel. Estas modificaciones se realizaron utilizando un router manual con una fresa de 0.5 pulg para crear las ranuras en la plancha de MDF. Una vez ensamblada la estructura principal, se inició con el ensamblaje de las tuberías de distribución y crecimiento.



Figura 33: Corte de ranuras en repisa de MDF utilizando router manual.

El ensamblaje de las tuberías de crecimiento se inició con una tubería de 3 metros de largo, con un diámetro de 2 pulg. Esta tubería se cortó en las diferentes secciones requeridas para la construcción de los canales de crecimiento y tuberías de distribución. Luego, se utilizó una broca de copa de 1.5 pulg para realizar perforaciones en los canales de crecimiento espaciados a 17.54 cm. Estos agujeros serían utilizados para contener las plantas durante el período de crecimiento. Una vez se habían recortado todas las secciones de PVC, se utilizó sellador de silicona con una pureza del 100 % para unir las piezas con los codos y uniones tipo T. Se utilizó esta silicona para asegurar que no se encontraran fugas en los canales de distribución o crecimiento. Adicionalmente, la pureza aseguró que no se encontraran contaminantes los cuales podrían interferir con las pruebas a realizar. Finalmente, se conectó una manguera flexible de 0.5 pulg de diámetro interno al inicio de los canales de distribución, la cual permitiría suministrar el agua utilizando una bomba sumergible.

### 7.3.1. Integración de sistemas

Una vez se contaba con la estructura principal ensamblada, se inició la instalación de los diferentes componentes eléctricos y electrónicos en el sistema. Se instaló una caja plástica de 32 litros, la cual funcionaría como sistema de almacenamiento de agua. Una vez instalado dicho contenedor, se continuó con la instalación y conexión de sensores, actuadores, y la bomba sumergible.

#### Conexión de sensores

Tanto los sensores de temperatura ambiental como del agua requirieron de pequeñas modificaciones para su instalación. En el caso de los sensores DHT11, se crearon cables de conexión utilizando alambres de un cable UTP. Estos se soldaron a pines *header* los cuales se utilizaron para conectar los cables a cada sensor y a la placa de desarrollo. Por otro lado, los sensores DS18B20 ya contaban con cables suficientemente largos, con la excepción de uno, por lo que se soldaron pines axiales directamente a los cables de los sensores. En el caso del sensor de temperatura de agua que se encontraba más alejado de la placa de desarrollo, se utilizó cable UTP para crear las extensiones requeridas. Finalmente, el sensor de pH del kit de *Atlas Scientific* cuenta con cables de desarrollo los cuales cuentan con *headers* incluidos, por lo que no fue necesario realizar modificaciones a este sensor.

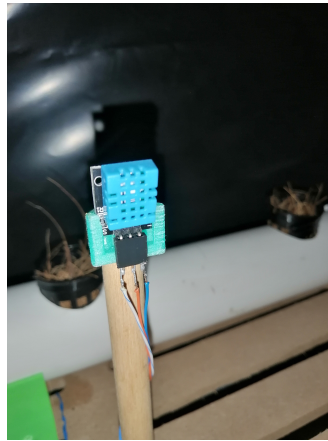


Figura 34: Cable UTP soldado a conector tipo *header* para sensor DHT11.

Los sensores DHT11 se instalaron utilizando las piezas impresas en 3D mencionadas al inicio del capítulo. Se utilizaron las varillas de 0.5 pulg para fijar los anillos de los sensores, y estas se insertaron directamente en la madera de las repisas. En el caso de las sondas de temperatura de agua, se introdujeron mediante los agujeros diseñados para fijar las plantas. Estas se ubicaron en cada una de las repisas de crecimiento, asegurando tomar mediciones en el punto de inicio del flujo de agua. La tercera sonda de temperatura de agua se instaló directamente en el depósito central de agua.

## Instalación de bomba de circulación de agua

La bomba de circulación de agua utilizada se acopló a la manguera flexible utilizando una boquilla de 0.5 pulg de diámetro, la cual se insertó a presión dentro de la manguera. Se aseguró que la distancia de la bomba hacia el punto de salida de la manguera se encontrara dentro de un rango de 3.5 pies, con tal de no forzar la bomba y asegurar un flujo adecuado de agua. Finalmente, la bomba se sumergió en el agua, y se fijó utilizando ventosas al fondo del depósito plástico. Se aseguró que la conexión del cable se encontrara lo más alejada de la fuente de agua posible, para evitar fallos por corto circuito.

## Instalación de actuadores

Durante las primeras fases de construcción, se instalaron los ventiladores utilizando sus bases impresas, las cuales se fijaron mediante tornillos y tuercas a los perfiles de metal de la estructura principal. Al igual que los sensores, se soldaron extensiones de cable UTP a los ventiladores, permitiendo que los cables llegaran a sus puntos de conexión en la placa de desarrollo. Adicionalmente, se cubrieron todos los empalmes utilizando cinta de aislar, con tal de evitar fallos por corto circuito. Por otro lado, las luces de crecimiento se instalaron en el lado inferior de las repisas que quedaron encima de cada canal de crecimiento. Para esto se utilizaron alambres de amarre, los cuales se colocaron tanto en el centro como en los extremos de cada tira. Se utilizó cable UTP para unir las diferentes secciones de tiras LED, y se colocaron conectores tipo *header* en cada una de las secciones, asegurando así una fácil conexión entre la placa de desarrollo y las luces de crecimiento.

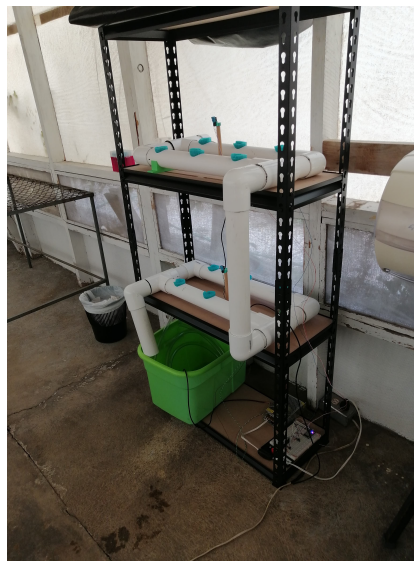


Figura 35: Estructura instalada en vivero con los sensores de temperatura instalados y conectados.

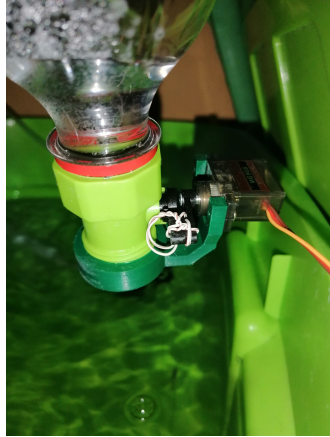


Figura 36: Acople de servomotor con válvula tipo bola para control de nivel de pH.

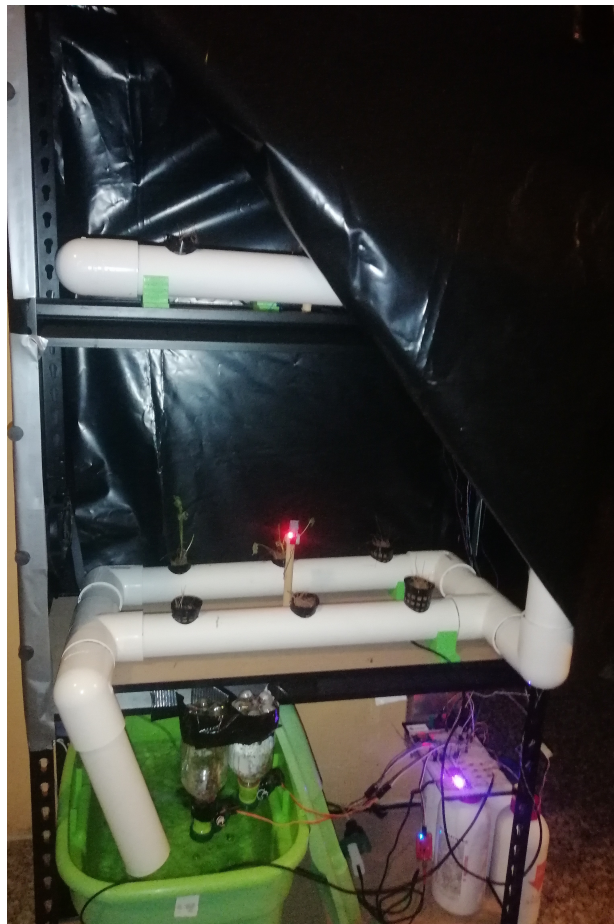


Figura 37: Estructura finalizada con todos los componentes integrados en el sistema.

---

## Desarrollo de circuitos para sensado y control de parámetros

---

El núcleo del sistema hidropónico automático se encuentra compuesto por una serie de sensores, actuadores así como otros componentes eléctricos y electrónicos requeridos para recolectar datos y controlar parámetros en el sistema. En este capítulo, se expanden los conjuntos: “Sensores y procesamiento de datos” y “actuadores y alimentación”, definidos en la Sección 7.1. De igual manera, se buscó establecer las relaciones entre los sensores, actuadores, componentes analógicos y digitales así como las pruebas realizadas para asegurar su funcionamiento. Con esto, se establecen los requisitos de corriente y voltaje para el funcionamiento de los diferentes componentes eléctricos, así como las conexiones necesarias y cálculos efectuados para establecerlas. Finalmente, se detalló el diseño y la fabricación del circuito impreso (PCB) creado para la integración de los componentes eléctricos.

### 8.1. Diseño de circuitos

El sistema de control se basó en el microcontrolador ESP WROOM-32 y la placa de desarrollo de *HiLetgo* ESP-32S. Esta placa se utilizó para obtener información de los diferentes sensores y activar los actuadores conectados al sistema. Debido al uso de un microcontrolador con una placa de desarrollo, la mayor parte de los circuitos del sistema se categorizaron como conexiones de componentes digitales o analógicos. Si bien esto redujo la complejidad del diseño de los circuitos, se encontraron varios retos relacionados a niveles de voltaje y disponibilidad de conexiones en la placa de desarrollo.

Si bien el microcontrolador seleccionado y su placa de desarrollo cuentan con una cantidad de 38 pines de entrada y salida 6.7.1, fue importante considerar que existen pines reservados para funciones internas de la placa de desarrollo creada por *HiLetgo*. Por esta razón, la cantidad de pines disponibles para la conexión de componentes, se redujo de manera considerable a poco más de los 16 pines con funcionalidad ADC. Esta limitante se

mantuvo bajo consideración durante el diseño de los circuitos, con tal de asegurar que todos los sensores y actuadores a utilizar contaran con un pin de lectura o control.

### 8.1.1. Características de alimentación de potencia

El diseño de los circuitos inició con la selección de la fuente de potencia del sistema. Esta sería utilizada por todos los componentes electrónicos, desde el controlador hasta los sensores, luces y actuadores, los cuales requirieron una alimentación regulada de voltaje CC (corriente continua). Como se discutió en la Sección 6.5, la mayoría de los componentes utilizados cuentan con un rango de voltaje de operación entre los 3 y 5.5 voltios CC. Considerando el rango disponible de voltaje para los elementos de corriente continua, se seleccionó un voltaje nominal de 5 voltios CC. Luego de determinar el voltaje nominal a utilizar en el circuito, se analizó el voltaje máximo requerido para alimentar a todos los componentes a la vez. Para esto, se utilizó la información de los parámetros máximos absolutos de las hojas de datos para cada elemento [1]. Al considerar el controlador junto con todos los sensores y actuadores, se obtuvo una corriente continua máxima de aproximadamente 8 amperios [14].

Componente	Corriente máxima (mA)
2 sensores DHT11	10
3 sensores DS18B20	12
Sensor pH <i>Analog Surveyor</i>	3
Relé Shori S3H-5-1C-S	72
RTC DS3231	0.575
ESP WROOM-32	1500
Neopixel WS2812B	4356
2 servomotores MG90S	1600
Total:	7554

Cuadro 14: Corriente continua máxima requerida por el sistema completo de voltaje CC.

Por otro lado, los ventiladores a utilizar en el sistema deberían ser alimentados mediante corriente alterna (CA), por lo que sería necesario acceso a una línea de 120 voltios CA. En cuanto al consumo de corriente alterna de los ventiladores, esta se calculó en un total de 80 mA para ambos ventiladores en conjunto. Tomando bajo consideración el análisis realizado de corriente y voltaje requeridos, la fuente seleccionada debería ser capaz de entregar un voltaje de 5 voltios CC y ser capaz de funcionar con una entrada de 120 voltios CA. Adicionalmente, debería ser capaz de suministrar la corriente máxima registrada de 7.554 amperios [14].

<sup>1</sup>En el caso de las luces de crecimiento utilizadas, se encontró que estas contaban con un consumo máximo de 0.036mA por luz, lo cual implicó un consumo total de aproximadamente 4.32A para una tira de 121 luces.

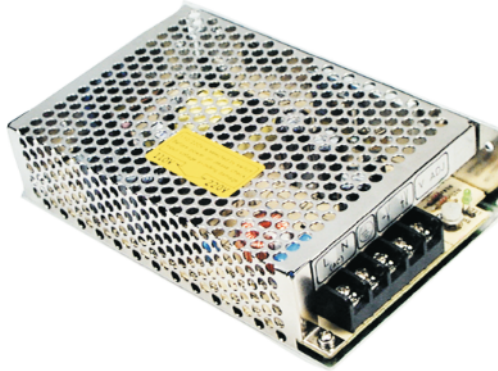


Figura 38: Fuente conmutada seleccionada para la alimentación del circuito principal.

Tomando en cuenta las opciones del mercado, se optó por una fuente conmutada de 5 voltios a 10 amperios de corriente continua con una entrada de 110 a 220 voltios corriente alterna. Se optó por este tipo de fuente debido a que tanto el microcontrolador como los sensores requieren de una alimentación constante y de bajo ruido. Adicionalmente, a comparación de fuentes de potencia lineales, que requieren de transformadores grandes y circuitos rectificadores extensos, las fuentes conmutadas utilizan componentes más pequeños. Esto permite una mayor eficiencia en la transformación de voltaje, reduciendo pérdidas por inducción en el transformador [45].

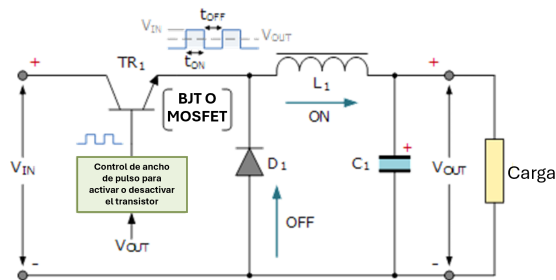


Figura 39: Diagrama de circuito regulador de voltaje tipo *buck* para reducir voltaje DC [46].

Las fuentes conmutadas cuentan con un sistema de control integrado que genera una señal con ancho de pulso modulado, formando una onda cuadrada de período variable, el cual activa o desactiva un transistor o MOSFET para regular el voltaje. El circuito de control toma como referencia un valor de voltaje deseado, en este caso 5 voltios DC, y ajusta el ancho de pulso para asegurar que el voltaje de salida sea igual a la referencia [39]. Esto, junto con un sistema de control activo, permite que las fuentes de conmutadas entreguen un voltaje constante y estable mientras mantienen un peso y tamaño reducido. Finalmente, la fuente seleccionada cuenta con terminales de 120V CA y 5V CC las cuales pueden ser conectadas al circuito principal para alimentar los diferentes componentes.

### 8.1.2. Configuración de conexiones para sensores y actuadores

Durante la etapa de diseño del circuito, fue necesario incluir componentes analógicos necesarios para la regulación del voltaje y para asegurar el funcionamiento de diferentes protocolos de comunicación. Estos se resumen en resistencias y transistores, los cuales se utilizaron para regular la corriente en pines específicos.

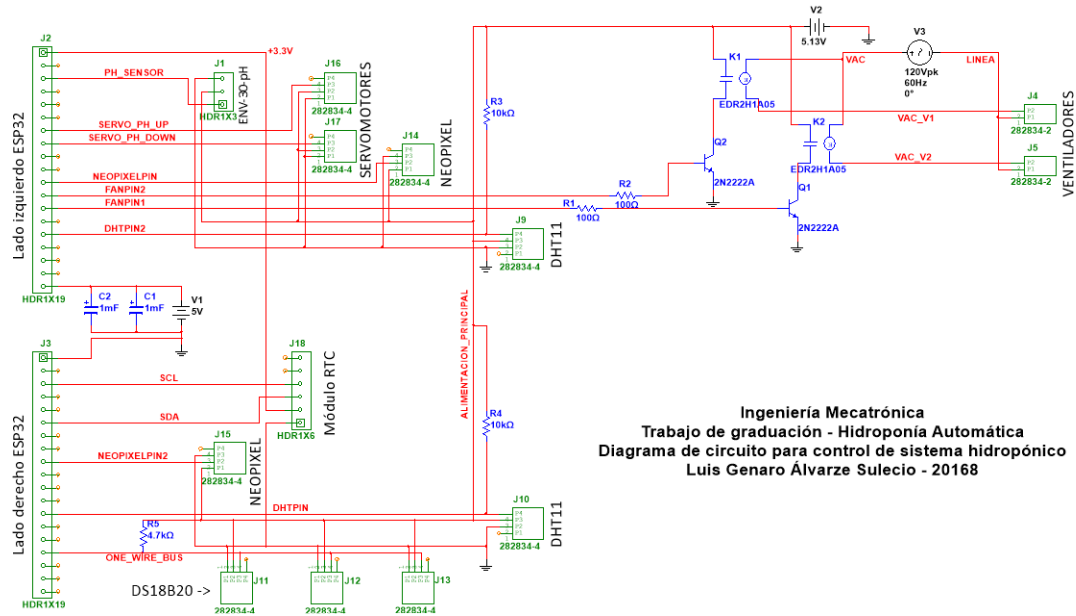


Figura 40: Diagrama de circuito del sistema completo con terminales para conexión en PCB.

### Circuito de control de relés para accionar ventiladores

El microcontrolador ESP-32S, cuenta con salidas digitales de 0 a 3.3 voltios CC, lo cual no sería capaz de controlar los relés de 5 voltios CC utilizados en el sistema. Por esta razón, se utilizó un transistor BJT 2N222A, con tal de regular el flujo de corriente entre su colector y emisor utilizando el voltaje de la señal digital del microcontrolador. Al tomar en cuenta este requerimiento en el diseño, se calculó la corriente de saturación del transistor al ser alimentado con 3.3 voltios CC.

Características principales		
Ganancia DC ( $\beta$ )	100	
Corriente de saturación	$I_B=15$	$mA$
Voltaje de saturación $V_{BE}$	1.2	$V$
Corriente requerida (por relé) $I_C$	72	$mA$

Cuadro 15: Características de los transistores NPN 2N222A y del circuito.

Con tal de calcular la resistencia de base necesaria para controlar los relés, se emplearon las siguientes ecuaciones:

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} \quad (1)$$

$$I_B = \frac{V_B - V_{BE}}{R_B} \quad (2)$$

Evaluando la ecuación 1 con la corriente del relé y la ganancia DC del transistor:

$$I_B = \frac{72mA}{100} = 72\mu A \quad (3)$$

Utilizando la corriente del colector, necesaria para activar el relé, para calcular la corriente de base del transistor según la ecuación 1, se obtuvo una corriente de base  $I_B = 72 \mu A$  3. Considerando que la corriente requerida en la base del transistor para saturación es  $I_B = 15 \text{ mA}$  15, se determinó que sería necesaria una resistencia adicional en el circuito para obtener la corriente de base necesaria. De la Ecuación 2 se despejó para la resistencia de base. Se sustituyeron las variables para la corriente de saturación, voltaje de operación y el voltaje de saturación con lo cual se obtuvo el siguiente valor para la resistencia de base:

$$R_B = \frac{3.3V - 1.2V}{0.015mA} = 140\Omega \quad (4)$$

$$I_B = \frac{3.3V - 1.2V}{100\Omega} \quad (5)$$

Con tal de utilizar un valor de resistencia comercialmente disponible, se propuso el uso de resistencias de  $100 \Omega$ . Se realizó una comprobación aplicando la Ecuación 2, con la cual se obtuvo una corriente base  $I_B = 21 \text{ mA}$  5. Al tomar en cuenta que para lograr la saturación, se debe cumplir la siguiente relación:  $I_C < \beta I_B$ , se determinó que la resistencia seleccionada sería adecuada para activar el relé a utilizar. Del análisis anterior, se derivó el diagrama de la Figura 41.

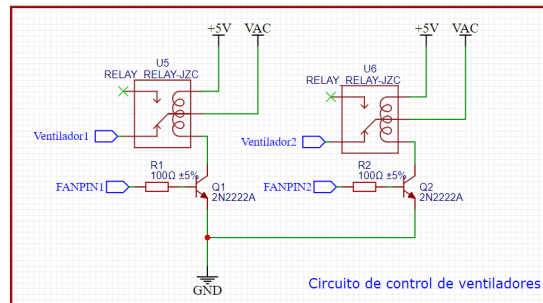


Figura 41: Diagrama del circuito con resistencia calculada para control de ventiladores con relés de 5 VCC.

Como se observa en el diagrama, los circuitos de control del ventilador inferior y superior se conectaron a los pines del microcontrolador designados *FANPIN1* y *FANPIN2* respectivamente. Estos corresponden a los pines digitales 12 y 14 del ESP WROOM-32.

## Sensores de temperatura

En el caso de los sensores de temperatura DHT11 y DS18B20, estos se conectaron según las recomendaciones del fabricante. Para los sensores DHT11 se utilizaron resistencias de  $10k\ \Omega$  conectadas entre  $5\ VCC$  y el pin de datos [42]. Para estos sensores, se utilizaron los pines digitales 4 y 13 del microcontrolador, nombrados *DHTPIN* y *DHTPIN2* respectivamente. Por otro lado, para los sensores DS18B20 se utilizó una única resistencia de  $4.7k\ \Omega$  conectada entre  $5\ VCC$  y el bus de datos. Debido al uso del protocolo One-wire, se utilizó un bus de datos conectado al pin digital número 15, nombrado *ONE\_WIRE\_BUS* para fines de programación [43].

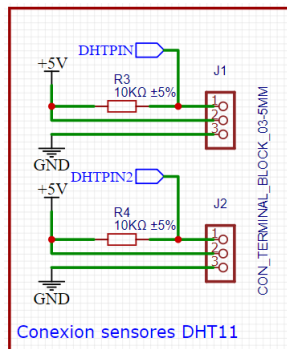


Figura 42: Diagrama del circuito con conexión para sensores DHT11 y sus resistencias individuales.

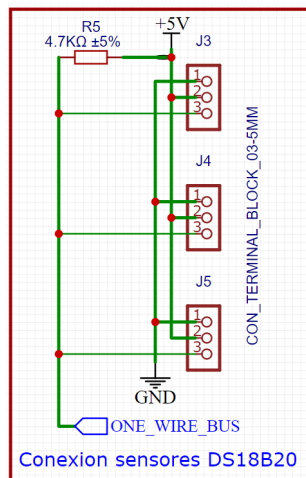


Figura 43: Diagrama de conexión para sensores DS18B20 con resistencia del bus de datos.

## Módulo RTC y luces de crecimiento

El módulo de reloj de tiempo real (RTC) requirió de un circuito parcialmente aislado del principal. Esto debido a que su voltaje de alimentación se limitó a  $3.3V$ , lo cual lo haría incompatible con la alimentación de  $5V\ CC$  de los componentes principales. Con tal de evitar la inclusión de un módulo *buck* para reducir el voltaje únicamente para el reloj de

tiempo real, se aprovechó la salida de voltaje integrada de 3.3V del ESP WROOM-32. Se aseguró que la referencia del RTC estuviera compartida con el resto del circuito y con la del ESP WROOM-32. La comunicación entre el reloj de tiempo real y el microcontrolador se estableció mediante el protocolo I2C utilizando el pin digital 22 (SCL) y 21 (SDA) [44]. Este protocolo permitió la comunicación bidireccional entre el microcontrolador y el módulo, requerida para la solicitud de información de la hora y fecha registradas por el RTC.

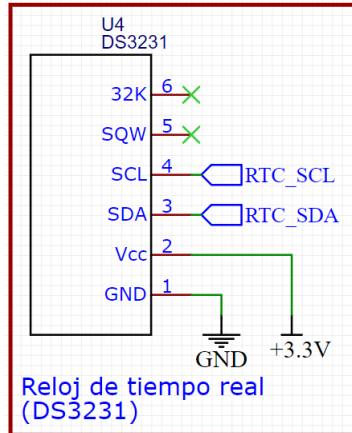


Figura 44: Diagrama de conexión del reloj de tiempo real.

Luego de establecer la conexión del módulo RTC, se diseñó el diagrama para las luces de crecimiento. Estas luces consistieron de dos tiras separadas de luces *NeoPixel* WS2812B. Según las especificaciones detalladas en la Sección 6.6, las tiras de luces LED se alimentaron utilizando el voltaje del sistema de 5V CC, y se conectaron al ESP WROOM-32 mediante los pines 18 y 27, nombrados como *NEOPIXELPIN* y *NEOPIXELPIN2*. Estas luces utilizaron un protocolo de comunicación unidireccional, que permitió el envío de datos desde el microcontrolador hacia cada luz individual en la tira, asegurando que se cambiara el estado de todas las luces sin importar la longitud de la tira [47].

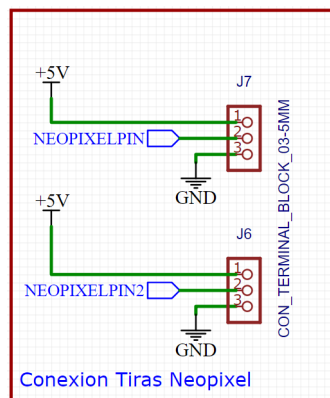


Figura 45: Diagrama de conexión de las luces de crecimiento *NeoPixel* WS2812B.

## Sensor de pH y servomotores

Si bien la mayoría de los sensores implementados en el sistema cuentan con protocolos de comunicación digitales, el sensor de nivel de pH de *Atlas Scientific* utiliza un voltaje variable para transmitir el nivel de pH obtenido por la sonda. Estos cambios de voltaje se conocen como señales analógicas, las cuales deben ser decodificadas para relacionar el nivel de voltaje con el parámetro deseado, pH para esta aplicación. En el manual del sensor de pH, se encuentra detallada la relación entre el nivel de voltaje y de pH de la solución medida [47](#). Al tratarse de una señal analógica, se conectó el sensor al pin analógico del ESP WROOM-32, pin A0 nombrado como *PH\_SENSOR*. Adicionalmente, se conectó el sensor a la alimentación general del sistema [46](#).

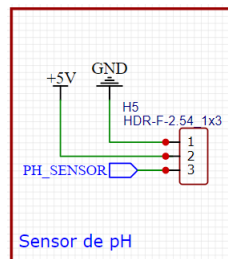


Figura 46: Diagrama de conexión del sensor de pH de *Atlas Scientific* al pin A0 del ESP WROOM-32.

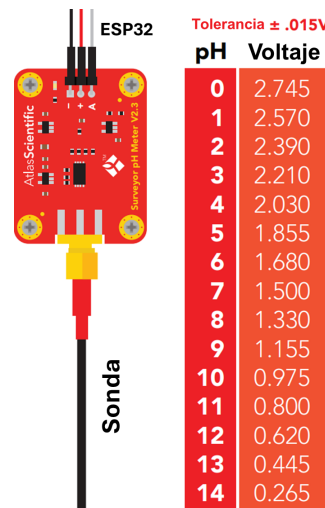


Figura 47: Relación de nivel de pH leído por sonda y voltaje entregado por el módulo del sensor.

Mientras que el sensor de pH permitiría determinar los niveles de dicho parámetro en el sistema, los servomotores que accionan las válvulas tipo bola estarían a cargo de controlar estos niveles. Por esta razón, se conectaron dos servomotores, los cuales se controlaron mediante los pines digitales 32 y 33, nombrados *SERVO\_PH\_UP* y *SERVO\_PH\_DOWN* respectivamente. Al igual que el sensor de pH, estos actuadores se conectaron a la alimentación general del sistema [48](#).

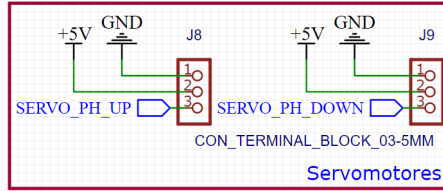


Figura 48: Circuito de conexión entre pines de los servomotores y digitales del ESP WROOM-32.

### 8.1.3. Pruebas físicas de circuitos principales

Una vez establecidas las conexiones entre los diferentes módulos, sensores, actuadores y el microcontrolador, se realizaron pruebas de funcionamiento de los diferentes circuitos. Se inició con una prueba de los sensores de temperatura, tanto ambientales como de agua, y luego se realizó una prueba del circuito de control de los ventiladores. Durante la evaluación de los circuitos de los sensores DHT11 y DS18B20, se conectaron al microcontrolador según los diagramas establecidos anteriormente. Se realizó una medición del voltaje y la corriente del sistema, con la cual se observó una fluctuación en el nivel de voltaje entregado por la fuente. Al inspeccionar el circuito, se observó una conexión errónea la cual estaba causando un corto circuito.

Luego de confirmar el funcionamiento del circuito de los sensores, se realizaron pruebas con el circuito de control de los ventiladores. Esto se realizó utilizando un único ventilador, el cual se conectó con el relé controlado por el microcontrolador mediante el transistor y la resistencia calculada. Se alimentó este circuito utilizando una fuente conmutada de 5V a 5 amperios, y se utilizó el código de ejemplo en *Arduino* para elementos digitales: *Blink Without Delay* para encender y apagar el ventilador [49](#).

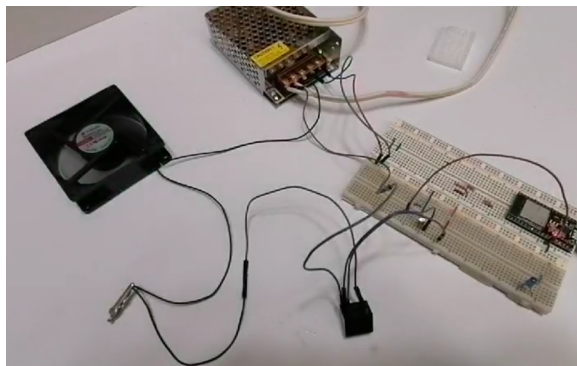


Figura 49: Prueba de circuito de control de ventilador mediante relé utilizando transistor 2N222A.

Al comprobar el funcionamiento de los ventiladores, se realizó una prueba general, integrando todos los circuitos de los sensores de temperatura, los ventiladores y las luces de crecimiento. Durante esta prueba, se conectaron ambas tiras de luces LED en serie, y se controlaron utilizando un único pin del microcontrolador. Al realizar esta pequeña modificación respecto a la metodología de conexión establecida en [8.1.2](#), se observó que la señal de control no fue capaz de alcanzar a las luces de crecimiento ubicadas en la repisa superior [50](#).

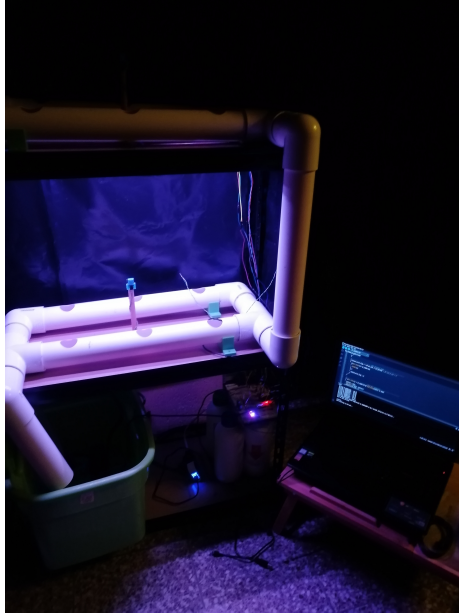


Figura 50: Prueba inicial de luces de crecimiento integradas en el sistema.

Finalmente, se realizó una prueba general, integrando todos los circuitos, con tal de confirmar el funcionamiento de todos los módulos antes de iniciar el proceso de diseño del PCB. Durante esta prueba final, se confirmó el funcionamiento de las luces de crecimiento, el sensor de pH y los servomotores. Gracias a las pruebas realizadas, se observaron ciertos cambios en el comportamiento del microcontrolador en diferentes etapas de funcionamiento del circuito. Se observó que durante ciclos de conexión a una red WiFi, así como durante el uso de las luces de crecimiento, el microcontrolador tendía reiniciarse. Este comportamiento se atribuyó al aumento en demanda de corriente por parte del sistema. Debido a esto, se consideró la implementación de dos capacitores electrolíticos de  $1000 \mu F$ , junto con la alimentación del microcontrolador utilizando una fuente adicional. Dicha modificación al circuito logró estabilizar el voltaje de alimentación del ESP WROOM-32 y presentó mejoras considerables durante los ciclos mencionados.

## 8.2. Desarrollo de placa de circuito impreso (PCB)

Buscando mejorar la organización del circuito, y facilitar la conexión de los cables de extensión de los sensores y luces de crecimiento, se desarrolló un circuito impreso. Esta se diseñó utilizando placas de cobre de doble capa, las cuales se maquinaron en el *Makerlab* del departamento de Ingeniería Mecatrónica, Electrónica y Biomédica de la Universidad del Valle de Guatemala. A continuación se detallan los pasos seguidos para el diseño, fabricación y ensamblaje de la placa, así como las pruebas realizadas y los resultados obtenidos al implementarla en el sistema.

### 8.2.1. Diseño en EasyEDA

El proceso de diseño del circuito impreso se realizó en dos etapas. Durante la primera, se diseñó el esquemático de conexiones [51](#), en el cual se colocaron los circuitos individuales desarrollados durante la sección anterior [8.1](#). Puesto que se contaba con cables UTP individuales, conectados a los sensores DHT y DS18B20, se optó por utilizar borneras *terminal block* para conectar los sensores a la placa. Estos conectores se emplearon también para los servomotores, así como las terminales de alimentación del circuito. Se utilizaron borneras de 2 y 3 pines con una distancia entre pines de 5 mm. Las borneras de 3 pines se utilizaron para los sensores, servomotores y luces de crecimiento. Por otro lado, las de borneras de 2 pines se utilizaron para la alimentación de voltajes continuos, alternos, y la conexión de los ventiladores. Tanto los modelos como los símbolos y huellas de estos componentes se obtuvieron de las librerías públicas del servicio de EasyEDA. En el caso del sensor de pH, el módulo RTC y el ESP WROOM-32, se utilizaron *headers* tipo hembra; sin embargo, estos se colocaron únicamente de manera explícita en el diagrama del circuito del sensor de pH [51](#).

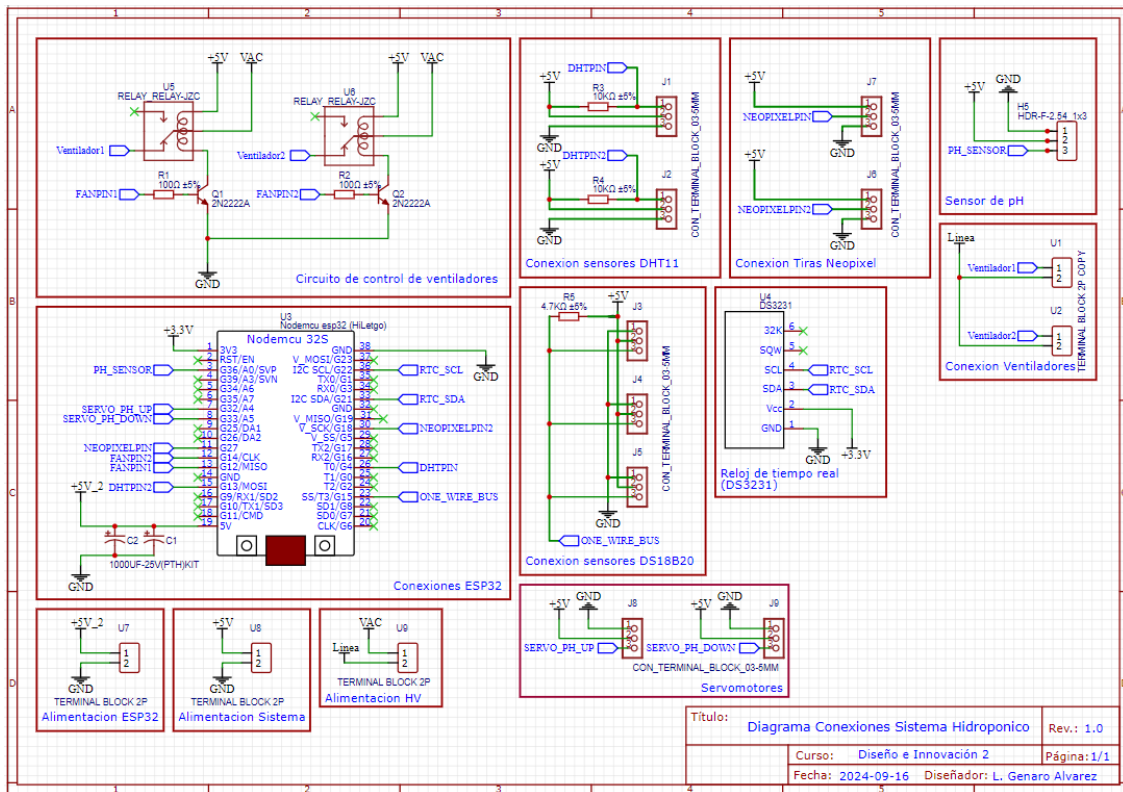


Figura 51: Esquemático de los circuitos requeridos para diseño de circuito impreso.

Una vez establecidas las conexiones de los componentes analógicos, digitales y las borneras para la conexión de los cables externos, se inició el proceso de conexión de pistas en la placa. Al utilizar componentes con pines que atravesarían ambas capas de cobre, se estableció la capa inferior como la capa en la cual realizarían la mayoría de las conexiones [53b](#). Antes de iniciar con la conexión de los componentes, se establecieron diferentes reglas para los anchos de pista, dimensiones de agujeros, y espacio entre elementos. Estas se definieron

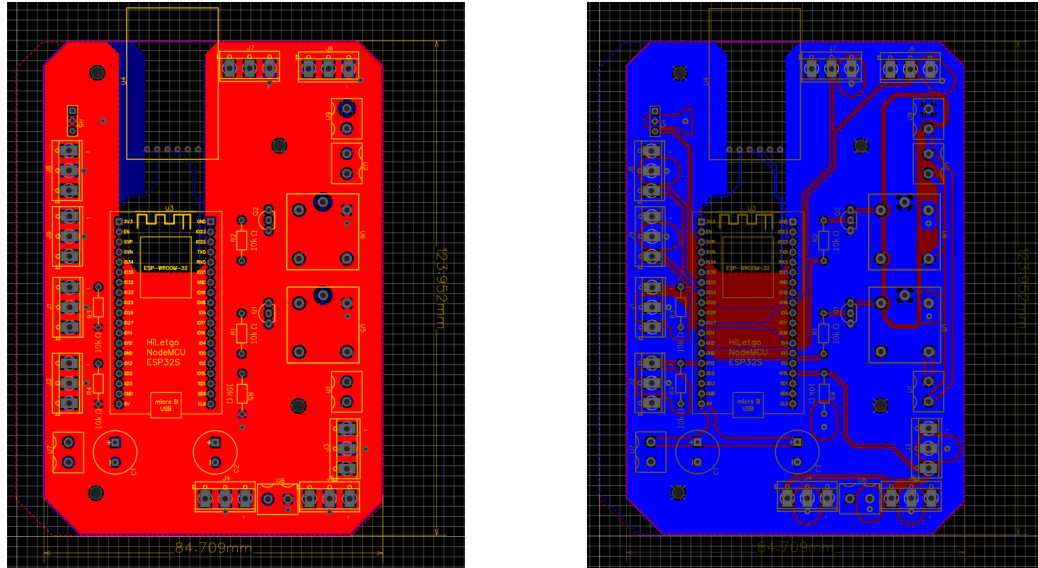
utilizando las corrientes máximas absolutas listadas en la Sección 8.1, así como los voltajes de operación. Estos valores se ingresaron a una calculadora en línea 48, la cual recomendó anchos de pista y de espacio entre estas según la corriente y el voltaje máximo.

En el caso de las pistas utilizadas para la transmisión de datos, se utilizó un ancho mínimo de 0.254 mm, puesto que no estarían transmitiendo corrientes elevadas. Así mismo, la reducción en ancho de las pistas disminuyó la resistencia eléctrica de las conexiones asegurando una mejor confiabilidad para la comunicación entre componentes. Adicionalmente, se estableció un estándar para el diámetro de los agujeros para componentes, asegurando que estos no fuesen menores de 0.8 mm. Finalmente, se estableció un diámetro estándar para vías de 0.71 mm. Estas reglas de diseño facilitaron el proceso de conexión de componentes, y buscaron reducir la interferencia entre circuitos o la posibilidad de un corto-circuito.

Nombre	Ancho de pista	Espaciado	Diámetro de vías	Diámetro de agujero
Default	0.254	0.254	1.524	0.71
+5V	6.09	0.61	1.524	0.71
+5V_2	1.4	0.508	1.524	0.71
A0	0.254	0.508	1.524	0.71
NEO_DI	0.254	0.254	1.524	0.71
SERVO	0.59	0.61	1.524	0.71
VAC	11.73	1.2	1.524	0.71
VENT	1.4	0.508	1.524	0.71

Figura 52: Reglas de diseño establecidas para la conexión de elementos en PCB.

Luego de establecer las reglas de diseño, se inició con la conexión de los componentes. Se distribuyeron las borneras de manera que estas quedaran en la periferia de la placa, y buscando evitar que se cruzaran las conexiones entre componentes. Se ubicaron los elementos analógicos entre las borneras y el controlador, y se aseguró que quedara espacio adecuado para ubicar la placa del módulo RTC. Luego de distribuir los componentes, se inició el proceso de conexión. Durante este, se estableció la necesidad de vías para conectar la alimentación general del circuito a los componentes pasantes. Estas vías formarían un puente entre la capa inferior y superior, en la cual estaría ubicado un polígono de 5V CC. Al finalizar las conexiones de la capa inferior, se utilizaron polígonos para facilitar conexiones en espacios reducidos, y para el circuito de 120V CA. Finalmente, se estableció un polígono general en la capa inferior designado a la referencia, tierra, del circuito 53b. De igual manera, y como se mencionó anteriormente, se definió un polígono en la capa superior para 5V a 10A CC 53a.



(a) Capa superior del circuito

(b) Capa inferior del circuito

Figura 53: Vista 2D del diseño de conexiones para circuito impreso.

Se consideraron las limitaciones de manufactura establecidas por el *Makerlab* donde se fabricaría la placa, con lo cual se estableció un ancho de *pads* igual o mayor al diámetro del agujero más 0.508mm. Se finalizó el proceso de diseño agregando polígonos, para eliminar ángulos cerrados, y geometrías tipo gota, para mejorar la unión de los *pads* de cada componente a su pista. Para estas geometrías adicionales, se definió una regla del 75 % y 35 % del diámetro de *pads* para el ancho y el alto de las gotas conectadas a *pads* circulares 54.

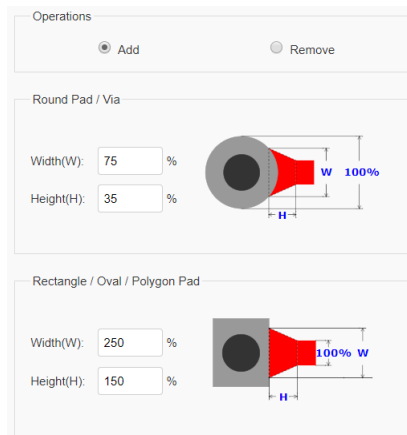


Figura 54: Reglas utilizadas para geometrías tipo gota en circuito impreso.

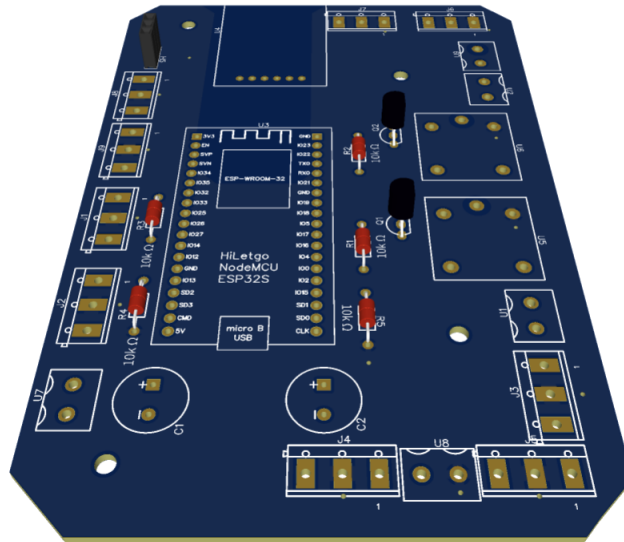


Figura 55: Visualización tridimensional de circuito impreso diseñado.

### 8.2.2. Fabricación y ensamblaje

Al finalizar el diseño en EasyEDA, se generaron archivos tipo *GERBER* para fabricar el circuito utilizando la fresadora LPKF S103 disponible en el *Makerlab* del departamento. Con los archivos generados, se envió a fabricar el circuito, resultando en una placa de cobre de doble capa con los diferentes agujeros y carriles necesarios para conectar los componentes definidos. Antes de iniciar el proceso de soldadura, se limpió la placa utilizando acetona, y se utilizó una lija de grano 320 para lijar los **pads** de los componentes. Este proceso se realizó con tal de mejorar la fijación del estaño al cobre, asegurando soldaduras más resistentes. Una vez preparada la placa, se inició con el proceso de soldadura de vías, para las cuales se utilizaron segmentos de alambre de calibre *AWG 21*. Seguido de esto, se empezaron a soldar los conectores, iniciando con los *headers* tipo hembra para el ESP WROOM-32 y el reloj de tiempo real [56](#).



Figura 56: Inicio del proceso de soldadura de los componentes a la capa inferior de la placa.

Durante el proceso de soldadura, se realizaron inspecciones visuales así como pruebas de continuidad para asegurar que todas las conexiones se hicieran correctamente y que no existieran puentes entre componentes. Se hizo un énfasis especial en la inspección de las soldaduras realizadas para el ESP WROOM-32, puesto que este sería el componente más crítico en el sistema. Luego de realizar la inspección visual de las soldaduras realizadas para el microcontrolador, se continuó con la soldadura de los componentes analógicos, con lo cual se finalizó el proceso de ensamblaje de la placa. Esta se limpió nuevamente utilizando acetona para eliminar residuos de pasta para soldar, y se conectó a los cables de alimentación para el microcontrolador [57](#).

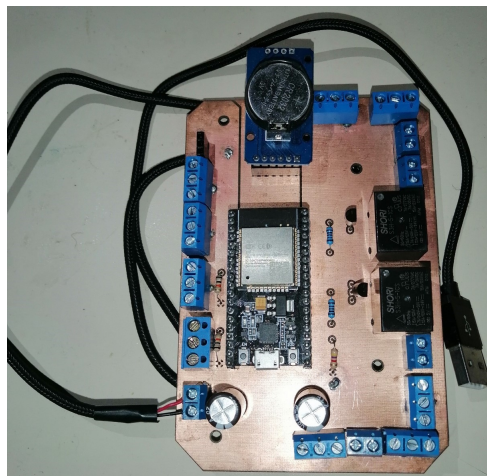


Figura 57: Ensamblaje final del circuito fabricado.

### 8.2.3. Pruebas realizadas con la placa impresa

Una vez ensamblada la placa del circuito impreso. Se realizaron dos pruebas principales. Durante la primera se evaluó el funcionamiento del microcontrolador conectado a los diferentes sensores y al módulo RTC. Esto para asegurar el funcionamiento del ciclo principal del sistema, el cual iniciaría con la configuración y lectura de los sensores de temperatura, y pH, y finalizaría con el envío de datos a la nube mediante WiFi. Luego de esta prueba se determinó que el sistema fue capaz de enviar datos recolectados correctamente. Cabe mencionar que durante la primera prueba, los sensores de temperatura y humedad ambiental se conectaron de manera incorrecta, lo cual llevó a que uno de estos fallara. Durante esta misma prueba, se conectaron las luces de crecimiento, con tal de asegurar que el circuito impreso fuera capaz de soportar la corriente máxima requerida por los componentes [58](#).

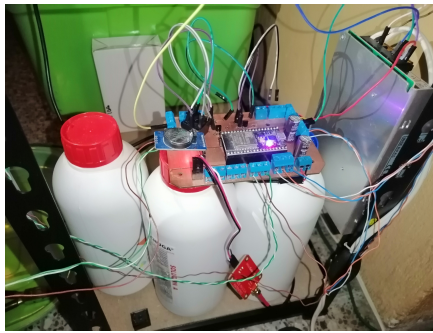


Figura 58: Prueba inicial de circuito impreso con ESP-32S, sensores, luces de crecimiento y RTC.

Luego de la prueba utilizando únicamente los componentes de corriente continua, se conectó al circuito la alimentación de 120V CA, integrando los relés y los ventiladores. Al activar la alimentación del sistema se notó que uno de los relés se activó de manera errática a una frecuencia elevada. Al inspeccionar el circuito, se observó que los pines del relé y el colector del transistor estaban conectados de manera incorrecta. Con esto en mente, se conectaron los relés utilizando cables tipo *jumper* con tal de corregir la conexión. Esta corrección también se realizó en el diseño del PCB [53b](#).

Si bien es importante que los datos recolectados por el microcontrolador sean procesados y utilizados internamente para controlar los distintos parámetros del sistema, se estableció que sería valioso que estos datos se encuentren disponibles para los usuarios y operadores. La visualización de los datos recolectados permite el monitoreo de parámetros clave, como el pH, asegurando que se realicen ajustes al sistema en caso de anomalías. Una aplicación móvil para el monitoreo de dichos parámetros facilitó el proceso de verificación y validación del sistema. Adicionalmente, proporcionó una interfaz que permitió la visualización rápida y eficiente de los datos recolectados por los sensores.

### **9.1. Requisitos de funcionalidad**

La aplicación móvil presenta una oportunidad de desarrollar una interfaz demostrativa, que sea capaz de brindar información al usuario de manera legible. Por esta razón, se establecieron diferentes requisitos de funcionalidad.

- Conexión de la aplicación al internet para establecer una comunicación con el servidor de Dweet.io y obtener los datos del sistema.
- interfaz para la visualización de datos recolectados del sistema de manera ordenada en categorías y con descriptores claros de los parámetros desplegados.
- Campos dinámicos para el despliegue de datos que permitieran únicamente la visualización y no la edición de los valores recibidos.
- Botón que permitiera al usuario solicitar datos del servidor con tal de visualizar que la lectura más reciente de los sensores.

- Ciclo de actualización de datos automática que realice una solicitud al servidor en un período constante para obtener los datos más recientes del sistema.

La definición de estos requisitos permitió establecer una secuencia de tareas que deberían ser realizadas por la aplicación cada vez que esta fuera accedida por primera vez o durante uso prolongado. El ciclo principal de la aplicación consistiría de la solicitud de datos del sistema, mientras que se agregaría una solicitud opcional activada por el usuario [59](#)

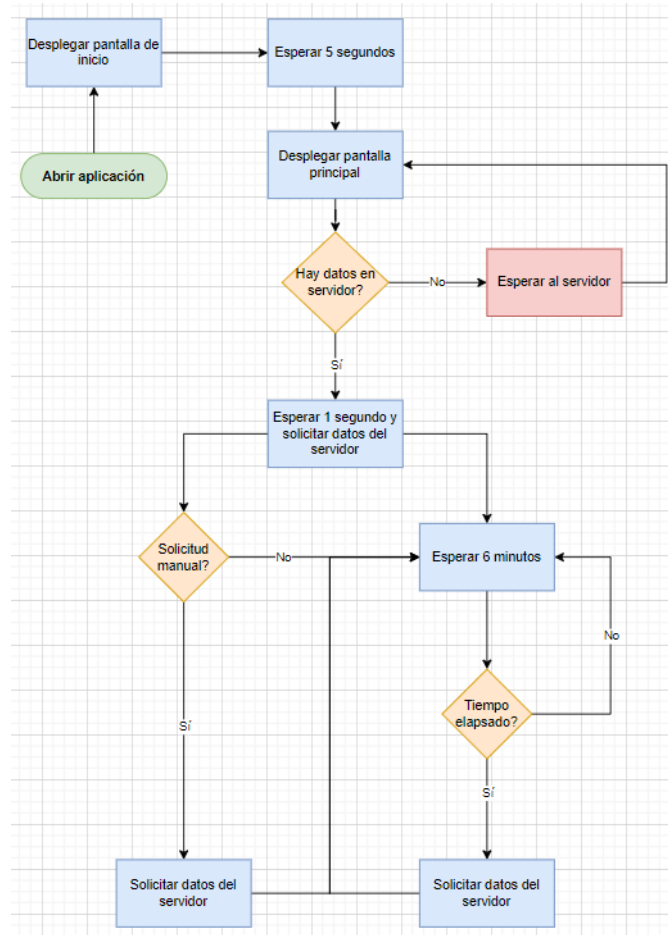


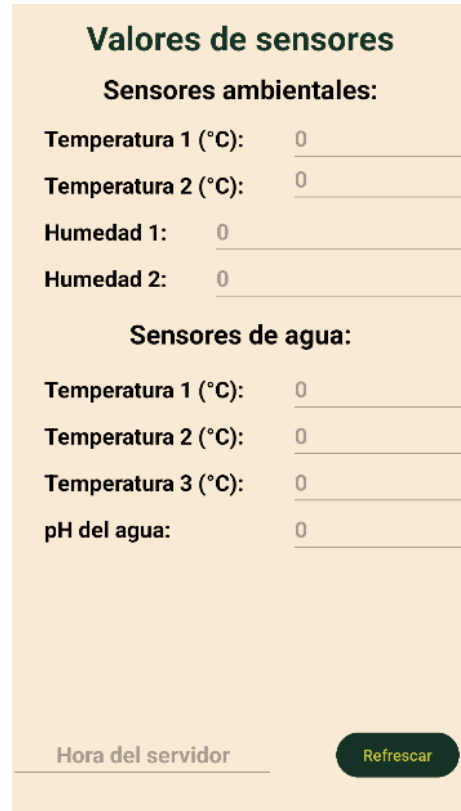
Figura 59: Diagrama de flujo de las tareas realizadas por la aplicación móvil a implementar.

### 9.1.1. Diseño de interfaz gráfica

El diseño de la interfaz gráfica se llevó a cabo utilizando el lenguaje de marcado extensible XML. Dentro del entorno de programación del estudio de *Android*, se definieron dos pantallas. Una de estas presentaría el logo de la aplicación, así como el nombre, mientras que la segunda contaría con la información de los sensores del sistema. Se desarrolló el logo de la aplicación utilizando la herramienta gratuita de *Canva*, y se utilizaron las herramientas de *Android* para importar las imágenes utilizadas en la aplicación. Una vez se definieron las pantallas, sus estructuras y sus componentes, se continuó con la programación del funcionamiento de la aplicación.



(a) Pantalla de inicio



(b) Pantalla principal

Figura 60: Interfaz gráfica diseñada para la visualización de datos con transición de pantallas.

### 9.1.2. Lectura de datos de servidor HTTP

Se utilizó el protocolo HTTP para obtener los datos del servidor de Dweet.io bajo la dirección de *hydro\_test*. Dentro de la función de lectura de datos del servidor, se obtuvieron los valores de las categorías del objeto JSON, y se asignaron a variables las cuales serían utilizadas para actualizar las casillas respectivas en la interfaz. Adicionalmente, se estableció un ciclo de lectura continuo, el cual realizaría una solicitud de información al servidor cada 6 minutos, e iniciaría un segundo después de acceder a la interfaz. Finalmente, se incluyó una función que ejecutaría una solicitud al servidor en el caso de que se presionara el botón para refrescar los datos.

Programación del *firmware* del sistema

La programación del sistema se dividió en diferentes etapas dedicadas a la configuración de cada uno de los componentes utilizados. Se inició con la configuración de la conexión inalámbrica y el envío de datos mediante el protocolo HTTP. Luego se continuó con la lectura de los sensores de temperatura, y el control de los ventiladores y luces de crecimiento. Finalmente, se configuró el sensor de nivel de pH así como los servomotores a utilizar para el ciclo de control del nivel de pH del agua. El flujo general del programa se detalla en la Figura 61.



Figura 61: Diagrama de funcionamiento general del *firmware* desarrollado para controlar el sistema.

## 10.1. Definición del protocolo de comunicación inalámbrica

Una de las ventajas de los sistemas hidropónicos se centra en sus bajos requisitos de mano de obra y atención constante. Esta ventaja se puede capitalizar significativamente al incluir un protocolo que permita enviar los datos a un servidor para ser consultados por un operador de manera remota. En el Siglo XXI, el crecimiento de tecnologías inalámbricas han facilitado esta tarea mediante el Internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés). Si bien el internet de las cosas es un concepto sumamente valioso, este no se puede aprovechar sin contar con un protocolo de comunicación de datos que habilite su acceso.

### 10.1.1. Conexión inalámbrica mediante WiFi

El crecimiento en popularidad del internet de las cosas se atribuye principalmente a los avances realizados en cuanto a la familia de protocolos de comunicación con fidelidad inalámbrica, más conocida como WiFi. Esta familia de protocolos ofrece una gran flexibilidad en cuanto a la estructura de paquetes para el envío de datos a través de grandes distancias y de una gran variedad de dispositivos. Esta versatilidad, permite a microcontroladores y plataformas de desarrollo como el ESP WROOM-32 utilizar este protocolo de comunicación para la transferencia de datos de manera inalámbrica.

La finalidad del uso de WiFi en el sistema se limitó a el envío de datos, por lo que una de las prioridades durante el desarrollo de esta funcionalidad fue asegurar que la lectura de los sensores y el sistema de control no se viera afectado por falta de conexión a una red WiFi. Durante la primera iteración, se utilizó la librería de *WiFi.h* para la conexión del ESP WROOM-32 a una red local de internet. Con tal de asegurar el funcionamiento continuo del sistema en el evento de que se desconectara de la red WiFi, se estableció un único intento inicial de conexión una vez se encendiera el sistema. En caso de que se haya perdido conexión, o esta no se hubiese establecido exitosamente, se estableció un período de espera de 30 minutos, durante los cuales el sistema no intentaría conectarse al internet. Finalizados los 30 minutos, el sistema iniciaría nuevamente su rutina para establecer dicha conexión. Este período entre intentos de conexión se justificó al considerar que durante cada intento, el sistema requería de una pausa en la ejecución del código con una duración de 20 segundos.

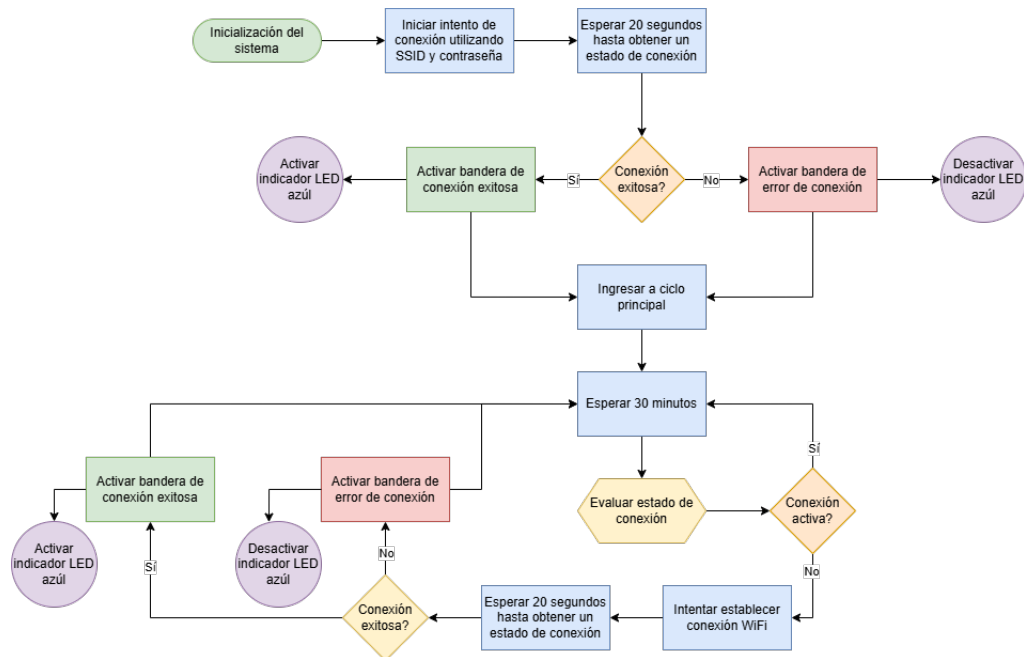


Figura 62: Diagrama de ciclo establecido para la conexión WiFi, primera iteración.

Si bien esta iteración permitió establecer una conexión adecuada con una red WiFi preestablecida con una intensidad de señal adecuada, presentó ciertas debilidades a la hora de contar con redes de señal con menor intensidad. Adicionalmente, los largos períodos de tiempo entre intentos de conexión implicaban pérdidas significativas de datos, entre 6 y 15 paquetes dependiendo del ciclo de control. Bajo estas consideraciones, se diseñó una nueva función para establecer una conexión a la red WiFi utilizando la librería secundaria *WiFiMulti.h*. Esta permitió el registro de dos o más redes WiFi a las cuales se podría conectar el sistema en caso de que una de ellas fallara. Adicionalmente, se eliminó por completo la necesidad de espera durante 20 segundos para establecer conexión con la red. Al contar con diferentes redes disponibles, la función evaluaría automáticamente la intensidad de cada red, y se conectaría con aquella que contara con la mejor intensidad. Este cambio no solo eliminó la pausa en la ejecución del código requerida por la primera iteración, sino que aseguró que el sistema fuera capaz de conectarse a cualquier red disponible y registrada. Adicionalmente, se disminuyó el período de espera entre intentos de conexión. Si bien se podría haber mantenido un intento de conexión continuo, este aumentaría el consumo eléctrico del microcontrolador.

## Protocolo HTTP

Una vez establecida la conexión WiFi, se habilitó la comunicación con el servidor de Dweet.io mediante el protocolo HTTP. Puesto que la comunicación HTTP consiste de una solicitud enviada a un servidor, esta no requiere establecer una conexión como tal. Por esta razón, se programó una función a cargo de envíos de datos al servidor, iniciando la solicitud al ser llamada dentro del ciclo principal, y finalizando una vez recibida una respuesta adecuada del servidor. Se evaluó la calidad de las respuestas obtenidas según los códigos de error incluidos por el protocolo, los cuales establecen que cualquier respuesta con un código de

200 corresponde a un envío exitoso de datos [6.7.3](#). Se desarrolló programación defensiva ante posibles interrupciones durante el envío de datos, así como códigos de error en el rango de 300 a 600, estableciendo una cantidad máxima de intentos. Con esto se aseguró que los datos fuesen enviados, o bien, que se regresara al ciclo principal en caso de no lograr establecer la comunicación. Al igual que la función para la conexión a la red WiFi, la comunicación HTTP bloqueaba la ejecución del código durante un tiempo significativo, por lo que se implementaron envíos periódicos de datos espaciados cada cinco o tres minutos según el estado del ciclo de control [63](#). Junto con la programación defensiva incluida para los intentos de envío de datos, se evaluó el estado de conexión a la red WiFi antes de cada envío de datos, con tal de evitar intentos en caso de que el sistema no estuviera conectado a la red.

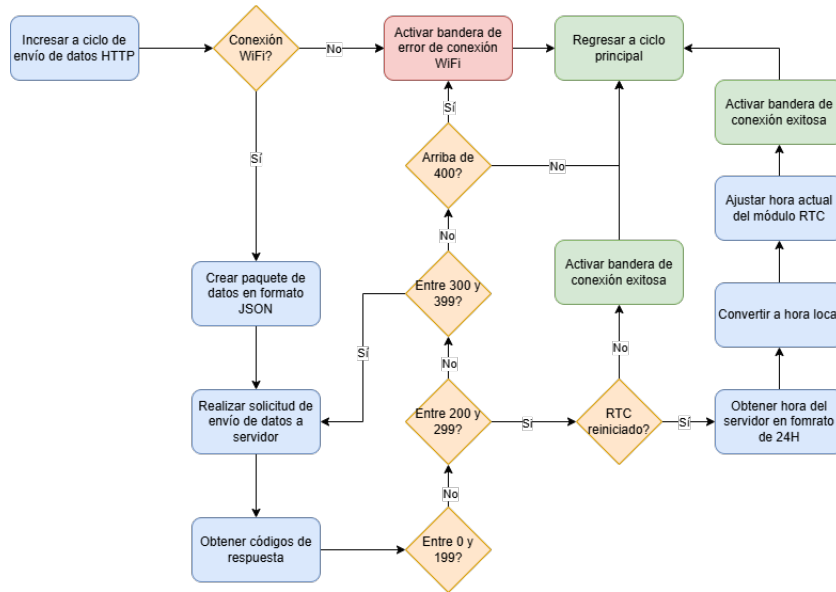


Figura 63: Diagrama de la función desarrollada para envío de datos por HTTP.

Durante cada conexión al servidor, se envían dos paquetes de información, uno a la dirección *hydro\_test* y otro a la dirección *hydro\_LOG*. El primero de estos paquetes consistió en datos de los sensores, estados de los actuadores e información de la fecha y hora del reloj de tiempo real del sistema. Esta información sería desplegada por la aplicación con tal de monitorear los parámetros dentro del sistema de crecimiento. El segundo de los paquetes consistió de información acerca del estado de la conexión, detallando el nombre de la red a la que se encuentra conectado el sistema, así como la intensidad de la señal, la fecha y hora y un contador de la cantidad de veces que falló el envío de datos al servidor antes del envío actual. Es importante mencionar que la información en ambos paquetes se configuró utilizando el formato JSON, el cual establece un objeto compuesto por un conjunto de propiedades, a las cuales se les asigna un valor según sea necesario. En este caso, se utilizó el formato JSON para establecer propiedades de temperatura, humedad, y otros parámetros los cuales se unieron con los valores recolectados por los sensores.

Paquete formato JSON	Fecha y hora registrada por el sistema
	Temperatura, humedad y nivel de pH
	Banderas del estado de cada parámetro evaluado

Paquete formato JSON	Fecha y hora registrada por el sistema
	Datos de la red WiFi conectada (nombre y calidad de señal)
	Conteo de intentos de conexión y otras banderas internas

(a) Ejemplo de paquete de datos de sensores

(b) Ejemplo de paquete de datos de conexión

Figura 64: Visualización gráfica de paquetes enviados a servidor de Dweet.io mediante HTTP en formato JSON.

## 10.2. Configuración de sensores y accionamiento de actuadores

El proceso de configuración de los sensores de temperatura y humedad, así como las sondas de temperatura del agua, se completó sin mayor dificultad gracias a la simplicidad de la recolección de datos. Los valores obtenidos de los sensores DHT11, se compararon con límites preestablecidos [16], con tal de definir una secuencia de control sencilla para los ventiladores. Esto se implementó con tal de asegurar que tanto la temperatura como la humedad ambiental se mantuvieran en un rango adecuado para el crecimiento de las plantas [6.4]. Por otro lado, los datos recolectados de las sondas de temperatura únicamente fueron almacenadas para ser enviadas al servidor de Dweet.io para su monitoreo.

Parámetro	Valor mínimo	Valor máximo
Temperatura (°C)	18.0	23.5
Humedad (%)	30.0	75.0
Nivel de pH	5.5	6.5

Cuadro 16: Valores mínimos y máximos preestablecidos para temperatura, humedad y pH.

### 10.2.1. Lectura y calibración de sensor de nivel de pH

El sensor de nivel de pH utilizó una señal analógica, voltaje variable, para indicar el nivel de pH en la solución. Si bien este sensor es capaz de leer valores de pH desde el primer uso, el proveedor recomienda una calibración inicial, la cual busca reducir el desvío de los datos obtenidos a lo largo del tiempo. Esta calibración requiere de tres soluciones de pH conocido, típicamente una solución de pH 4.0, otra de 7.0 y una última de 10.0. Al medir y almacenar el valor observado por el sensor para cada una de estas mediciones, se utilizó un polinomio cuadrático para reducir la desviación de las mediciones reales. Con tal de facilitar este proceso, se utilizó el código de ejemplo proporcionado por *Atlas Scientific* con el cual se

calibró el sensor utilizando cada una de las soluciones mencionadas [65](#). Luego de calibrar el sensor de nivel de pH, se utilizó la librería “ph\_surveyor.h” para leer los valores del sensor de pH y almacenarlos para su evaluación con el rango aceptable establecido [16](#).

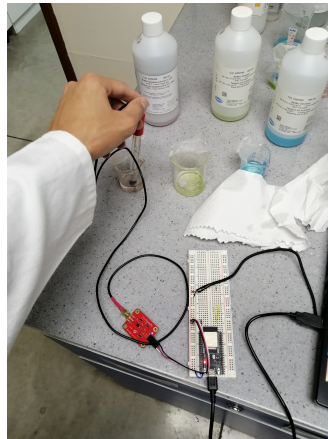


Figura 65: Proceso de calibración del sensor de nivel de pH utilizando soluciones de pH conocido.

### 10.2.2. Control de actuadores

Entre los actuadores necesarios, los ventiladores presentaron la menor complejidad. Esto gracias al uso de transistores para activar los relés, lo cual permitió el uso de señales lógicas para encender y apagar los ventiladores. La en cuanto a la función de control de los actuadores, se calculó el valor promedio tanto para la temperatura como la humedad de ambos sensores, buscando contar con la temperatura y humedad promedio del sistema. Este valor se evaluó en los límites establecidos [16](#), activando los ventiladores en caso de que el valor de temperatura llegara a superar el valor máximo establecido y se mantuvieran apagados si la temperatura se encontraba por debajo del máximo. Adicionalmente, en esta función se empleó para desplegar alertas de temperatura y humedad cuando estos valores se encontraran fuera del rango admisible.

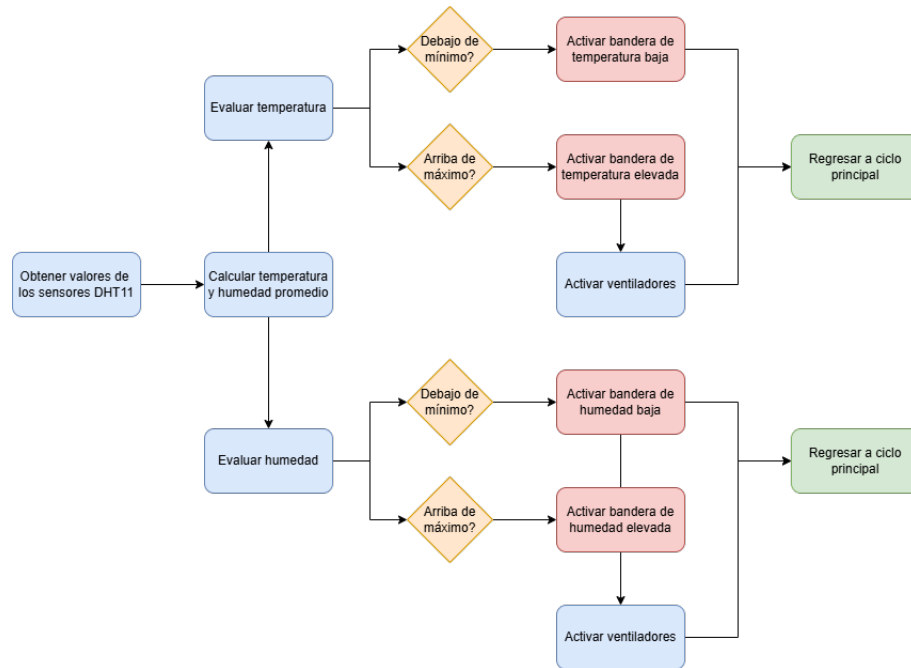


Figura 66: Diagrama de proceso para activar ventiladores.

Luego de configurar el ciclo de control de los ventiladores, se implementó una función para activar las luces de crecimiento. Puesto que el sistema de iluminación sería controlado según la hora del día, se estableció una función auxiliar. Esta recolectaría la hora actual registrada por el reloj de tiempo real y la compararía con un rango establecido con base a la hora del amanecer y del anochecer en la ciudad de Guatemala. Mientras que la hora del módulo RTC se encontrara dentro del rango de 6:00 am y 6:00 pm, la función auxiliar activaría una bandera. Esta información se utilizó para determinar el tiempo durante el cual las luces de crecimiento deberían estar encendidas. Adicionalmente, se implementó un contador en la función de control de las luces de crecimiento, con el cual se determinó el tiempo transcurrido desde que estas se activaron. Esto permitiría limitar el tiempo de luz, en caso de que se requiriera activar las luces de crecimiento durante menos de 12 horas. Una vez definida la lógica para activar las luces de crecimiento, se utilizaron tres ecuaciones [6](#) para crear una secuencia de luz con los colores rojo, azul y fucsia [6.6.2](#).

$$\begin{aligned}
 y_1 &= 3n \\
 y_2 &= 3n - 1 \\
 y_3 &= 3n - 2
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

Junto con la función auxiliar, se implementó una rutina dentro del ciclo principal, la cual evaluaría el estado del reloj de tiempo real, para determinar si este se encontraba desconfigurado. En dicho caso, la rutina obtendría la hora y fecha del servidor de Dweet.io durante el próximo intercambio de datos con tal de actualizar la hora y fecha del módulo RTC. Debido a que la hora del servidor se trataba de la hora del meridiano de *Greenwich*, se implementó un ajuste a la hora obtenida, asegurando que el módulo mantuviera la hora actual de la ciudad de Guatemala.

Finalmente, se implementó una función para el control de los servomotores, los cuales estarían activando las válvulas tipo bola utilizadas para dispensar la solución de corrección de pH en el sistema. Esta función de control realizó una comparación entre el valor leído por el sensor y el límite admisible de pH en el agua [16]. Si el valor obtenido se encontraba arriba del límite superior, se activaría el servomotor a un ángulo de 50° respecto a la horizontal, con tal de abrir la válvula de la solución reductora de pH. Luego de 500 mili-segundos, se regresaría el servomotor a su posición inicial (0°) con tal de cerrar la válvula, y evitar que continúe el flujo de solución reductora de pH. Esta rutina se replicó en el caso del servomotor para la solución de aumento de nivel de pH, la cual sería utilizada en caso de que el nivel de pH se encontrara por debajo del límite inferior definido.

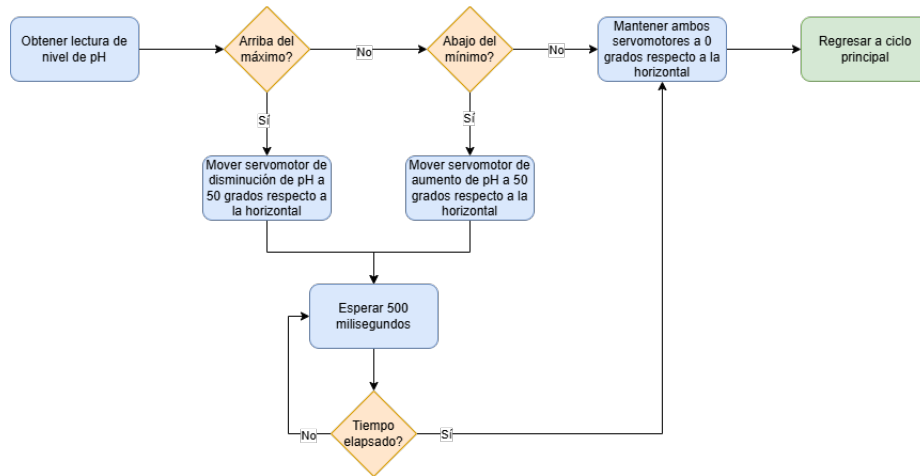


Figura 67: Diagrama de del ciclo de control de los servomotores para la regulación de pH en el agua.

---

## Evaluación del crecimiento del cilantro

---

Una vez completada la estructura, la instalación de los sensores, el desarrollo de circuitos y la programación del sistema de lectura y control de parámetros, se inició una etapa de prueba del funcionamiento del sistema. Esto se logró mediante la evaluación de históricos del comportamiento de la temperatura dentro del sistema, así como una comparación cualitativa entre el crecimiento de plantas del cilantro dentro y fuera del sistema. Esto se realizó con tal de determinar el impacto de los sistemas de control y los actuadores en el desarrollo de las plantas dentro del sistema.

La evaluación del crecimiento de las plantas en el sistema se realizó en dos etapas diferentes según el nivel de desarrollo del sistema hidropónico propuesto. La primera etapa se realizó en un invernadero, dentro del cual se ubicó únicamente el sistema hidropónico de solución recirculante, sin sistemas de control implementados. En esta etapa se registraron temperaturas elevadas, y las plantas recibieron luz solar indirecta. La segunda etapa se realizó con el sistema completo, en un entorno doméstico donde se registraron temperaturas considerablemente menores. Se emplearon los sistemas de control establecidos mientras que las plantas recibieron luz proporcionada por las luces de crecimiento.

### 11.1. Cultivo del cilantro con métodos tradicionales

Con tal de comparar el crecimiento del cilantro en el sistema, se inició un cultivo utilizando un sustrato activo. Este cultivo funcionaría como punto de comparación, permitiendo identificar cambios en el crecimiento del cilantro dentro del sistema. Con tal de lograr el crecimiento adecuado de las plantas de cilantro, se estableció un sustrato que fuese capaz de cumplir con las siguientes características: alta retención de humedad, baja densidad permitiendo oxigenación y un alto contenido nutritivo. Con estas características en mente, se realizó una mezcla de vermiculita, *peat-moss*, tierra abonada y compost orgánico. Esta mez-

cla permitió contar con una buena retención de agua gracias a la vermiculita, un nivel bajo de densidad debido al *peat-moss*, y una alta cantidad de nutrientes. Una vez se preparó el sustrato de crecimiento, se repartió en diferentes contenedores, los cuales permitirían el desarrollo de las plantas.

### 11.1.1. Período de germinación del cilantro

Tanto las plantas para el cultivo en sustrato activo como en el sistema hidropónico propuesto se iniciaron utilizando semillas de cilantro. Se utilizó una bolsa resellable, en la cual se introdujo una toalla de papel húmeda dentro de la cual se colocaron semillas de cilantro [68]. Esta bolsa se almacenó en un ambiente oscuro y a una temperatura constante cercana a los 25 °C. Al contener a las semillas dentro de la bolsa resellable entre un pliego de papel toalla húmedo, se aseguró que las semillas estuvieran expuestas a un nivel de humedad adecuado para su germinación.



Figura 68: Semillas germinadas utilizando papel toalla y bolsa resellable.

Se evaluó el proceso de germinación de las semillas en la bolsa resellable durante una semana, al final de la cual, 8 días después de colocar las semillas dentro de la bolsa, se observó el desarrollo de hojas y raíces [68]. Gracias a la toalla de papel humedecida, junto con el sello hermético de la bolsa resellable, se aseguró que los niveles de humedad dentro del entorno para germinar las semillas se mantuviera en un rango adecuado. Si bien dicho rango de humedad nunca se midió, las semillas se desarrollaron con facilidad y en un tiempo promedio en relación al tiempo esperado (entre 7 y 10 días según indicaciones en el empaque) para la germinación de las semillas de cilantro. Junto con esto, se resalta como ventaja el ahorro de espacio, puesto que al utilizar una bolsa resellable fácil de doblar y almacenar, se redujo la necesidad de un espacio dedicado o un sustrato adicional para germinar las semillas.

### 11.1.2. Transplante de retoños a sustrato nutritivo de crecimiento

Durante las primeras etapas de desarrollo de los retoños, estos son particularmente sensibles a los niveles de luz. Al ubicarlos en un entorno con bajos niveles de luz, los retoños

presentaron un fenómeno conocido como *bolting* o espigado. Este ocasionó que los retoños presentaran tallos largos y débiles, dificultando su crecimiento. Por otro lado, al asegurar una exposición prolongada a sol directo y constante, se logró que los retoños iniciaran su desarrollo de hojas sin el aumento en el largo de los tallos. En el caso de los retoños con tallos largos y débiles, se sembraron a una mayor profundidad, buscando evitar la pérdida de retoños por daños al tallo. Mientras que este proceso ayudó a que la mayoría de los retoños se continuaran desarrollando, la exposición a los elementos como la lluvia y el viento inevitablemente dañó los tallos de algunos de los retoños, llevando a pérdidas por falta de circulación de nutrientes a través de los tallos. En la Figura 69, se observa la configuración de los retoños en las macetas al sembrarlos a mayor profundidad. Finalmente, es importante mencionar que durante el proceso de transplante, se descartaron aquellos retoños que se habían vencido sobre su propio peso, así como retoños que no habían desarrollado suficientemente sus raíces como para absorber nutrientes del sustrato. Finalmente, se destaca que los retoños con acceso adecuado a luz solar presentaron un mejor desarrollo de tallos y hojas durante las primeras semanas de crecimiento, y no fue necesario realizar el mismo descarte por nivel de desarrollo 70.



Figura 69: Configuración de los retoños luego de ser transplantados a sustrato nutritivo de crecimiento.



Figura 70: Nivel de desarrollo de retoños sin espigado 2 semanas después de ser transplantados.

## 11.2. Crecimiento del cilantro en sistema hidropónico

Luego de las primeras 4 semanas del desarrollo del cilantro en sustrato de crecimiento, se trasladaron 12 plantas de cilantro al sistema hidropónico. Se colocó una planta por espacio disponible en los canales de crecimiento, y se reguló la concentración de solución nutritiva, diluyendo 2.5 mL de macro y micro nutrientes por litro de agua en el sistema. Como se mencionó al inicio del capítulo, durante la primera etapa de pruebas se trasladaron las plantas a un sistema sin control, mientras que en la segunda etapa se contó con la regulación de nivel de pH automática, así como el sistema de ventilación y luces de crecimiento.

### 11.2.1. Elementos de soporte para las plantas

En un sustrato activo, este provee tanto los nutrientes necesarios para el crecimiento de las plantas, como la estabilidad mecánica para asegurar que estas se mantengan erguidas. Ahora bien, en un sistema hidropónico, las plantas no cuentan con este sustrato, por lo cual es necesario utilizar otros métodos para brindar estabilidad mecánica a las plantas. Durante las pruebas iniciales, se utilizaron pedazos de tubo flotador, los cuales se cortaron de manera que fuesen capaces de ingresar en los agujeros disponibles en los canales de crecimiento. Además, se aseguró que estos fueran capaces de apoyar a las plantas, asegurando que se mantuvieran en su lugar. Ahora bien, cabe mencionar que estos tubos flotadores están elaborados de un material sintético el cual absorbe e irradia calor con facilidad. Esto no habría sido un gran problema en un sistema hidropónico sumergible, sin embargo, al utilizar la metodología NFT, este material no contó con una manera de intercambiar calor.

Mientras se realizaron pruebas iniciales de crecimiento, se observó una temperatura máxima en el sistema alrededor de los 32 °C, la cual fue considerablemente mayor a la temperatura máxima del cilantro, alrededor de los 20 °C. Este aumento en temperatura elevó el consumo de agua de las plantas, resultando en una acumulación de sales en las raíces, como se observa en la Figura 71. Esta acumulación de sales, junto a las elevadas temperaturas en los pedazos de tubo flotante, llevaron a la pérdida del 66 % de las plantas en el sistema hidropónico.



Figura 71: Retoño de cilantro con tallo seco y raíces bloqueadas por sales de la solución nutritiva.

Durante las próximas pruebas, se cambió el sustrato mecánico por fibra de coco, buscando reducir el impacto de la temperatura, así como la presión en los tallos. Ahora bien, debido a que la fibra de coco es relativamente suelta, fue necesario utilizar canastas de crecimiento, las cuales se modificaron, agregando un pequeño corte en uno de sus lados, para reducir su diámetro. Esto permitió que las canastas de 2 pulgadas de diámetro ingresaran en las perforaciones de los canales de crecimiento con un diámetro de 1.25 pulgadas. Si bien esta configuración redujo el estrés en los tallos, es importante mencionar que debido a la época del año, las temperaturas se encontraban por debajo de los 25 °C.



Figura 72: Configuración de canastas con fibra de coco como sustrato mecánico para el soporte de tallos.

### 11.2.2. Desarrollo de las plantas

Durante la primera etapa de pruebas, se observó claramente el efecto de temperaturas elevadas en el crecimiento de las plantas [71]. Se trasladó el cilantro al sistema hidropónico ubicado dentro del invernadero con tal de evaluar el crecimiento del cilantro sin sistemas de control, únicamente monitoreando parámetros de temperatura y humedad dentro del sistema. En esta evaluación se utilizaron 12 plantas de cilantro, de aproximadamente 2 pulgadas

de altura, por inspección visual. Se preparó la solución nutritiva con aproximadamente 16 litros de agua en la cual se diluyeron 40 mL de solución nutritiva A y B (macro y micronutrientes respectivamente). Luego del traspaso de las plantas al sistema hidropónico, se monitorearon las temperaturas registradas por los sensores. Este monitoreo se realizó desde la interfaz de *Dweet.io* la cual no almacenó ninguno de los datos recolectados. Por esta razón, durante la segunda etapa de pruebas, se desarrolló un programa capaz de solicitar la información subida a la nube y escribirla a un archivo de valores separados por comas. Luego de aproximadamente 5 días, se notaron des-coloraciones en las hojas del cilantro en el sistema, así como tallos débiles y hojas deformadas. Al inspeccionar las raíces de los retoños en el sistema, se observó una acumulación de sales en las raíces, así como la presencia de una pelusa blanca, similar a moho o un hongo en el inicio del tallo de las plantas 74.

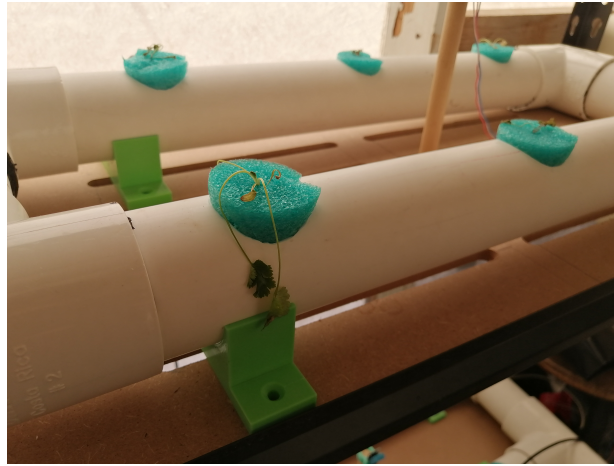


Figura 73: Cilantro marchitado con hojas secas, descoloradas y tallos débiles.



Figura 74: Raíces descoloradas con puntos negros y pelusa blanca indicativas de moho.

En la segunda etapa de pruebas se implementó el el control de pH, junto con las luces de crecimiento y los ventiladores de circulación de aire para regular temperatura en el sistema. Adicionalmente, se trasladó la estructura a un entorno doméstico el cual contó con un rango de temperatura ambiente entre los 25.5 y 23 °C. Se trasladaron 12 plantas de cilantro, con características físicas similares a los retoños utilizados durante la primera etapa de pruebas. Ahora bien, como se mencionó anteriormente [11.1.2](#), los retoños empleados en las pruebas en el sistema completo presentaron un mejor desarrollo inicial. Durante la primera semana de crecimiento, se observó que las plantas respondieron de manera positiva a las luces de crecimiento, buscando alinearse con el eje vertical para maximizar la absorción de la luz. Sin embargo, se observó nuevamente la des-coloración de las hojas así como la debilitación de los tallos y raíces bloqueadas con sales de la solución nutritiva. Si bien las temperaturas del sistema no alcanzaron los niveles de la prueba inicial, estas se encontraron por encima del nivel aceptable para el desarrollo adecuado del cilantro [2](#).



Figura 75: Cilantro en sistema completo durante la segunda etapa de pruebas.

### **Comparación con cilantro cultivado en sustrato tradicional**

En la segunda etapa de pruebas, se observó que si bien las plantas lograron sobrevivir durante la primera semana en el sistema, gracias a temperaturas reducidas y a un nivel de pH regulado en la solución, este no fue el caso durante la segunda semana. Como se mencionó anteriormente, las hojas presentaron una des-coloración considerable, los tallos cedieron y eventualmente se marchitaron por completo. Se retiraron las plantas del sistema, y se realizó un análisis comparativo entre estas y las plantas de control en sustrato activo, las cuales estuvieron creciendo a la intemperie durante el mismo período de tiempo. Se observó un desarrollo similar de las raíces en ambos grupos de plantas, sin embargo, se notó una cloración ligeramente amarilla en las raíces del sistema, así como la acumulación de sales mencionadas en secciones anteriores. Se realizó una segunda evaluación de la literatura disponible, en donde se encontró una relación directa entre el exceso en concentración de nutrientes (electro conductividad) con la des-coloración de las hojas [16](#). Con base a esto, se determinó que una de las posibles causas para la pérdida total del cultivo en el sistema hidropónico fue un nivel excesivo de nutrientes en la solución de crecimiento.

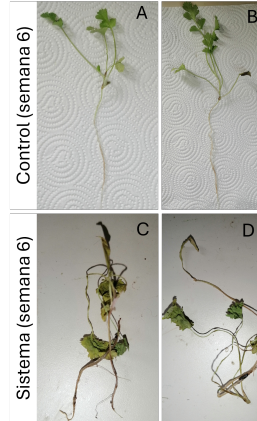


Figura 76: Comparación de plantas de cilantro en el sistema hidropónico contra grupo de control.

Al evaluar la densidad foliar, la cantidad de hojas por planta, se observó un valor similar, con un promedio de 5 hojas por planta, tanto en el sistema hidropónico como en el cultivo de control. Adicionalmente, se observó una variación relativamente baja entre el largo de los tallos para cada hoja. Si bien la cantidad de hojas y el largo de tallos se mantuvo constante tanto en el grupo de control como en el grupo dentro del sistema, fue evidente que las plantas de cilantro no fueron capaces de sobrevivir en las condiciones del sistema hidropónico.

### 11.2.3. Control de temperatura

En las pruebas realizadas, se determinó que la temperatura ambiental jugó un papel clave en el crecimiento y deterioro de las plantas de cilantro. Como se detalló en los capítulos anteriores, el control propuesto para dicha variable consistió en dos ventiladores de computadora, los cuales se ubicaron en dos extremos opuestos del sistema hidropónico con tal de generar un flujo de aire dentro del mismo. En estudios consultados, se determinó que existía una relación entre el crecimiento de las plantas en un sistema hidropónico y el flujo de aire al que las plantas estuvieran expuestas. Esta fue una de las principales motivaciones atrás de la implementación de ventiladores durante el diseño del sistema hidropónico.

Con tal de evaluar el impacto de los ventiladores en la temperatura del sistema, se recolectaron históricos de datos a lo largo de 24 horas en 8 días diferentes. Durante los primeros seis días, se registró el comportamiento de la temperatura ambiental dentro del sistema con la presencia de ventiladores activos según el ciclo de control establecido [77](#). Estos datos se compararon con el comportamiento de la temperatura del sistema al contar con los ventiladores desconectados [78](#).

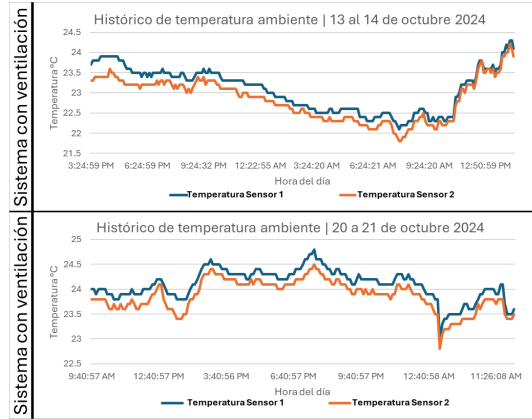


Figura 77: Históricos de temperatura ambiente del sistema durante segunda etapa de pruebas.

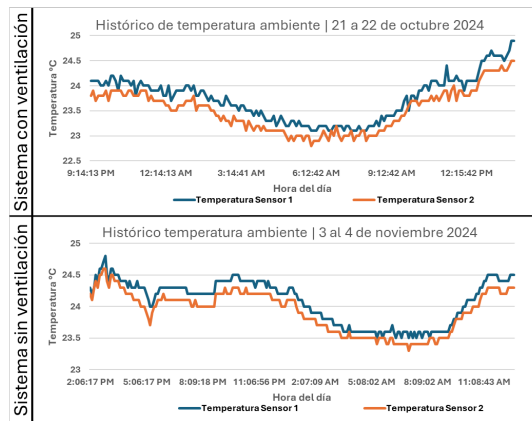


Figura 78: Comparación entre histórico de temperatura con ventiladores activos y con ventiladores desconectados.

Al realizar la comparación de la temperatura ambiente con y sin ventiladores activos, fue aparente que la temperatura no se vio afectada por la circulación de aire generada por los ventiladores dentro del sistema. Esto fue de esperarse puesto que los ventilares no contaron con un sistema de intercambio de calor, evitando un intercambio de calor significativo entre el sistema y el exterior. Adicionalmente, es importante detallar que el sistema no se aisló térmicamente, lo cual implicó un balance eventual entre la temperatura ambiente del cuarto y del interior del sistema hidropónico.

#### 11.2.4. Control de nivel de pH

Las pruebas de control de nivel de pH se realizaron durante la segunda etapa de pruebas de crecimiento. Se recolectaron datos del sistema desde el momento en el que se encendió por primera vez luego de establecer la solución nutritiva y transplantar el cilantro al sistema. Se notó un nivel de pH relativamente constante al inicio cercano a 8, el cual se mantuvo durante un tiempo considerable hasta que se activó el ciclo de control del nivel de pH 79. Se

destaca un cambio abrupto en las mediciones de pH, el cual ocurrió entre lecturas del sensor, con un período aproximado de cinco minutos. Luego del primer cambio en nivel de pH, se observa una estabilización gradual del nivel de pH hasta llegar al nivel deseado, cercano a 6.5 según los parámetros establecidos [16].

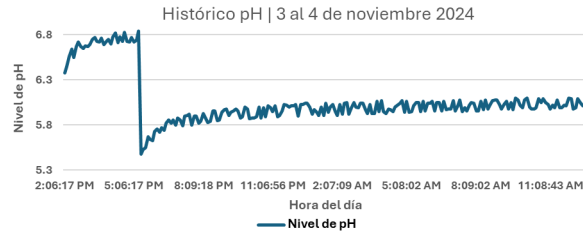


Figura 79: Comparación de plantas de cilantro en el sistema hidropónico contra grupo de control.

Una vez completado el trabajo de graduación, se determinaron ciertas conclusiones clave relacionadas a los objetivos planteados y al rendimiento del sistema luego de su evaluación. A continuación se detallan las conclusiones más relevantes derivadas del análisis de cada etapa de implementación del sistema hidropónico automático.

- Se implementó un sistema hidropónico capaz de monitorear y controlar parámetros requeridos para el desarrollo de hortalizas.
- El sistema no fue capaz de sostener el desarrollo de cilantro durante más de dos semanas debido a falta de control de temperatura y concentración de nutrientes y oxígeno en la solución.
- La aplicación móvil desarrollada en *Android Studio* permitió la visualización de los datos recolectados por los sensores.
- El protocolo de transmisión de datos HTTP permitió establecer una comunicación adecuada y persistente entre el sistema desarrollado, el servidor y la aplicación móvil desarrollada.
- Se requiere de un intercambio activo de calor para regular la temperatura en el sistema de manera adecuada.

A lo largo de las diferentes etapas de desarrollo de este proyecto de graduación, se identificaron diferentes características que se deben considerar a la hora de continuar con el desarrollo del sistema. Si bien estas características no afectaron directamente el funcionamiento principal del sistema, se consideró que su implementación facilitaría considerablemente el proceso de desarrollo, construcción, y resultados finales del trabajo. A continuación se encuentra un listado de las recomendaciones principales del presente trabajo de graduación.

- Emplear una combinación de dos microcontroladores, dedicando uno al análisis y manejo de datos y el segundo a el control de sensores y actuadores con tal de reducir la carga del firmware sobre el microcontrolador.
- Utilizar un sistema de ventilación más robusto que asegure un mejor flujo de aire y permita regular la temperatura del sistema tanto para enfriar como para calentar el entorno.
- Implementar un sistema de aislamiento térmico para aislar el interior del sistema hidropónico del entorno en donde se encuentra instalado.
- Utilizar válvulas solenoides para facilitar el control de parámetros como niveles de pH y electro conductividad en el sistema.
- Implementar sensores de electro conductividad y oxígeno disuelto para monitorear y controlar dichos parámetros.
- Realizar un análisis del desarrollo de cultivos hidropónicos agregando luz ultravioleta a las luces de crecimiento.
- Utilizar un servicio en la nube que permita almacenar datos de los sensores en una base de datos dedicada de largo plazo.

- [1] O. A. G. Natareno, «Estudio de factibilidad de una granja urbana de cultivos hidropónicos localizado en la ciudad de Quetzaltenango, Quetzaltenango.» Tesis de licenciatura, Universidad Del Valle de Guatemala, 2021. dirección: <https://repositorio.uvg.edu.gt/xmlui/handle/123456789/4129>.
- [2] G. Rajaseger, K. L. Chan, K. Yee Tan et al., «Hydroponics: current trends in sustainable crop production,» *Bioinformatics*, vol. 19, n.º 9, págs. 925-938, sep. de 2023, ISSN: 0973-8894. DOI: [10.6026/97320630019925](https://doi.org/10.6026/97320630019925). dirección: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC10625363/>.
- [3] E. Green, *10 Benefits of Hydroponics in Agriculture & Vertical Farming*, en-US. dirección: <https://www.edengreen.com/blog-collection/benefits-of-hydroponics>.
- [4] K. Tatas, A. Al-Zoubi, N. Christofides et al., «Reliable IoT-Based Monitoring and Control of Hydroponic Systems,» en, *Technologies*, vol. 10, n.º 1, pág. 26, feb. de 2022, Number: 1 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, ISSN: 2227-7080. DOI: [10.3390/technologies10010026](https://doi.org/10.3390/technologies10010026). dirección: <https://www.mdpi.com/2227-7080/10/1/26>.
- [5] M. Bacco, P. Barsocchi, E. Ferro, A. Gotta y M. Ruggeri, «The Digitisation of Agriculture: a Survey of Research Activities on Smart Farming,» *Array*, vol. 3-4, pág. 100 009, sep. de 2019, ISSN: 2590-0056. DOI: [10.1016/j.array.2019.100009](https://doi.org/10.1016/j.array.2019.100009). dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590005619300098>.
- [6] M. Raviv, J. H. Lieth y A. Bar-Tal, «Chapter 1 - Significance of Soilless Culture in Agriculture,» en *Soilless Culture (Second Edition)*, M. Raviv, J. H. Lieth y A. Bar-Tal, eds., Boston: Elsevier, ene. de 2019, págs. 3-14, ISBN: 978-0-444-63696-6. DOI: [10.1016/B978-0-444-63696-6.00001-3](https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63696-6.00001-3). dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978044463696600013>.
- [7] E. A. van Os, T. H. Gieling y J. H. Lieth, «Chapter 13 - Technical Equipment in Soilless Production Systems,» en *Soilless Culture (Second Edition)*, M. Raviv, J. H. Lieth y A. Bar-Tal, eds., Boston: Elsevier, ene. de 2019, págs. 587-635, ISBN: 978-0-444-63696-6. DOI: [10.1016/B978-0-444-63696-6.00013-X](https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63696-6.00013-X). dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978044463696600013X>.

- [8] B. Baiyin, K. Tagawa, M. Yamada et al., «Effect of the Flow Rate on Plant Growth and Flow Visualization of Nutrient Solution in Hydroponics,» en, *Horticulturae*, vol. 7, n.º 8, pág. 225, ago. de 2021, Number: 8 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, ISSN: 2311-7524. DOI: [10.3390/horticulturae7080225](https://doi.org/10.3390/horticulturae7080225). dirección: <https://www.mdpi.com/2311-7524/7/8/225>.
- [9] A. R. Al-Tawaha, G. Al-Karaki, A. R. Al-Tawaha et al., «Effect of water flow rate on quantity and quality of lettuce (*Lactuca sativa* L.) in nutrient film technique (NFT) under hydroponics conditions,» en, *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, vol. 24, n.º No 5, págs. 793-800, 2018.
- [10] T. Adelmann, *What is the Hydroponic Nutrient-Film-Technique (NFT)*, en, ene. de 2023. dirección: <https://hydroplanner.com/blog/hydroponic-nutrient-film-technique-nft>.
- [11] C. Marulanda y J. Izquierdo, «LA HUERTA HIDROPONICA POPULAR,» es, 2003.
- [12] A. Scientific, *Nutrient Solution For Hydroponics - The Ultimate Guide*, en-US, ago. de 2023. dirección: <https://atlas-scientific.com/blog/nutrient-solution-for-hydroponics/>.
- [13] LetPot, *How to grow cilantro hydroponically indoors: A Beginner's Guide*, en. dirección: <https://letpot.com/blogs/hydroponic-plant-growing-knowledge-and-tips/how-to-grow-cilantro-hydroponically-indoors-a-beginner-s-guide>.
- [14] W. Voogt y B. Bar-Yosef, «Chapter 10 - Water and Nutrient Management and Crops Response to Nutrient Solution Recycling in Soilless Growing Systems in Greenhouses,» en *Soilless Culture (Second Edition)*, M. Raviv, J. H. Lieth y A. Bar-Tal, eds., Boston: Elsevier, ene. de 2019, págs. 425-507, ISBN: 978-0-444-63696-6. DOI: [10.1016/B978-0-444-63696-6.00010-4](https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63696-6.00010-4). dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444636966000104>.
- [15] C. Currey, K. Walters y N. Flax, «Nutrient Solution Strength Does Not Interact with the Daily Light Integral to Affect Hydroponic Cilantro, Dill, and Parsley Growth and Tissue Mineral Nutrient Concentrations,» *Agronomy*, vol. 9, pág. 389, jul. de 2019. DOI: [10.3390/agronomy9070389](https://doi.org/10.3390/agronomy9070389).
- [16] A. Scientific, *What Is EC In Hydroponics?* en-US, mayo de 2023. dirección: <https://atlas-scientific.com/blog/what-is-ec-in-hydroponics/>.
- [17] S. Mondol y A. Das, «Use of Low Cost Hydroponics Technique for Growing Coriander at Laboratory Conditions,» *Ecology, Environment and Conservation*, vol. 29, págs. 589-595, ene. de 2023. DOI: [10.53550/EEC.2023.v29i02.009](https://doi.org/10.53550/EEC.2023.v29i02.009).
- [18] A. Volder y M. van Iersel, «Chapter 2 - Root Growth, Physiology, and Potential Impact of Soilless Culture on Their Functioning,» en *Soilless Culture (Second Edition)*, M. Raviv, J. H. Lieth y A. Bar-Tal, eds., Boston: Elsevier, ene. de 2019, págs. 15-32, ISBN: 978-0-444-63696-6. DOI: [10.1016/B978-0-444-63696-6.00002-5](https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63696-6.00002-5). dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444636966000025>.
- [19] H. R. Roosta, «The responses of pepper plants to nitrogen form and dissolved oxygen concentration of nutrient solution in hydroponics,» en, *BMC Plant Biology*, vol. 24, n.º 1, pág. 281, abr. de 2024, ISSN: 1471-2229. DOI: [10.1186/s12870-024-04943-7](https://doi.org/10.1186/s12870-024-04943-7). dirección: <https://doi.org/10.1186/s12870-024-04943-7>.

- [20] DFRobot, *Gravity Analog Dissolved Oxygen Sensor: SEN0237-DFRobot*. dirección: [https://wiki.dfrobot.com/Gravity\\_\\_Analog\\_Dissolved\\_Oxygen\\_Sensor\\_SKU\\_SEN0237#top](https://wiki.dfrobot.com/Gravity__Analog_Dissolved_Oxygen_Sensor_SKU_SEN0237#top).
- [21] DFRobot, *Gravity Analog Electrical Conductivity Sensor Meter V2 K=1 DFR0300-DFRobot*. dirección: [https://wiki.dfrobot.com/Gravity\\_\\_Analog\\_Electrical\\_Conductivity\\_Sensor\\_\\_Meter\\_V2\\_\\_K=1\\_\\_SKU\\_DFR0300](https://wiki.dfrobot.com/Gravity__Analog_Electrical_Conductivity_Sensor__Meter_V2__K=1__SKU_DFR0300).
- [22] R. Chang y K. A. Goldsby, «Química,» Español, en *Química*, México D.F.: Mc. Graw-Hill/Interamericana Editores, S.A. De C. V., 1995.
- [23] T. Wada, «Chapter 1.1 - Theory and Technology to Control the Nutrient Solution of Hydroponics,» en M. Anpo, H. Fukuda y T. Wada, eds., Elsevier, ene. de 2019, págs. 5-14, ISBN: 978-0-12-813973-8. DOI: [10.1016/B978-0-12-813973-8.00001-4](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813973-8.00001-4). dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128139738000014>.
- [24] MHI, *Common Myths about pH*, en-US, feb. de 2023. dirección: <https://molecularhydrogeninstitute.org/ph/>.
- [25] A. Scientific, *Surveyor™ Analog pH Kit*, en-US, dic. de 2019. dirección: <https://atlas-scientific.com/kits/surveyor-analog-ph-kit/>.
- [26] L. Electrónica, *Sensor de temperatura tipo sonda DS18B20*, es. dirección: <https://laelectronica.com.gt/sensor-de-temperatura-tipo-sonda-ds18b20>.
- [27] S. Y. Chia y M. W. Lim, «A critical review on the influence of humidity for plant growth forecasting,» en, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1257, n.º 1, pág. 012 001, oct. de 2022, Publisher: IOP Publishing, ISSN: 1757-899X. DOI: [10.1088/1757-899X/1257/1/012001](https://doi.org/10.1088/1757-899X/1257/1/012001). dirección: <https://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/1257/1/012001>.
- [28] T. Rusu, R. J. Cowden, P. I. Moraru, M. A. Maxim y B. B. Ghaley, «Overview of Multiple Applications of Basil Species and Cultivars and the Effects of Production Environmental Parameters on Yields and Secondary Metabolites in Hydroponic Systems,» en, *Sustainability*, vol. 13, n.º 20, pág. 11 332, ene. de 2021, Number: 20 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, ISSN: 2071-1050. DOI: [10.3390/su132011332](https://doi.org/10.3390/su132011332). dirección: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/20/11332>.
- [29] C. Bitá y T. Gerats, «Plant tolerance to high temperature in a changing environment: scientific fundamentals and production of heat stress-tolerant crops,» English, *Frontiers in Plant Science*, vol. 4, jul. de 2013, Publisher: Frontiers, ISSN: 1664-462X. DOI: [10.3389/fpls.2013.00273](https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00273). dirección: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2013.00273/full>.
- [30] Adafruit, *DHT11 basic temperature-humidity sensor + extras*, en-US. dirección: <https://www.adafruit.com/product/386>.
- [31] Tettsa, *SENSOR DE TEMPERATURA Y HUMEDAD DHT11 | Tettsa - Tienda*, es. dirección: <https://tienda.tettsa.gt/producto/sensor-de-temperatura-y-humedad-dht11/>.
- [32] L. Electrónica, *Módulo reloj RTC DS3231*, es. dirección: <https://laelectronica.com.gt/modulo-de-reloj-rtc-ds3231>.
- [33] Worldsemi, *WS2812: Intelligent control LED integrated light source*. dirección: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/WS2812.pdf>.

- [34] A. Industries, *Adafruit NeoPixel Digital RGB LED Strip - White 60 LED*, en-US. dirección: <https://www.adafruit.com/product/1138>.
- [35] Tetsa, *VENTILADOR 110 - 220VAC 80X80X25MM | Tetsa - Tienda*, es. dirección: <https://tienda.tetsa.gt/producto/ventilador-110-220vac-80x80x25mm/>.
- [36] E. Wings, *Introduction to ESP32 | ESP32*, en. dirección: <https://www.electronicwings.com/esp32/introduction-to-esp32>.
- [37] RedHat, *What is IoT?* en, 2019. dirección: <https://www.redhat.com/en/topics/internet-of-things/what-is-iot>.
- [38] A. Grizhnevich, *IoT Architecture Explained: Building Blocks and How They Work*, en, Section: Internet of Things, abr. de 2018. dirección: <https://www.scnsoft.com/blog/iot-architecture-in-a-nutshell-and-how-it-works>.
- [39] M. D. W. Docs, *Evolution of HTTP - HTTP | MDN*, en-US, mayo de 2024. dirección: [https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/HTTP/Basics\\_of\\_HTTP/Evolution\\_of\\_HTTP](https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/HTTP/Basics_of_HTTP/Evolution_of_HTTP).
- [40] R. Fielding, J. Gettys, J. C. Mogul et al., *Hypertext Transfer Protocol - HTTP/1.1*, jun. de 1999. dirección: <https://www.w3.org/Protocols/HTTP/1.1/rfc2616.pdf>.
- [41] M. D. W. Docs, *An overview of HTTP - HTTP | MDN*, en-US, jun. de 2024. dirección: <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/HTTP/Overview>.
- [42] M. D. W. Docs, *HTTP response status codes - HTTP | MDN*, en-US, oct. de 2024. dirección: <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/HTTP/Status>.
- [43] Dweet, *dweet.io - Share your thing- like it ain't no thang*. dirección: <https://dweet.io/faq>.
- [44] MatWeb, *Aluminum 6061-T6; 6061-T651*, EN. dirección: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=b8d536e0b9b54bd7b69e4124d8f1d20a&ckck=1>.
- [45] A. C. Technology, *Linear vs. Switching Power Supplies: Key Differences*, en-US, oct. de 2022. dirección: <https://www.actpower.com/blog/linear-vs-switching-power-supplies/>.
- [46] W. Storr, *Switch Mode Power Supply basics and Switching Regulators*, en, ago. de 2021. dirección: <https://www.electronics-tutorials.ws/power/switch-mode-power-supply.html>.
- [47] Worldsemi, *WS2812: Intelligent control LED integrated light source*. dirección: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/WS2812.pdf>.
- [48] N. Smith, *ANSI PCB Track Width Calculator*, mayo de 2024. dirección: <https://nick.desmith.net/Electronics/TraceWidth.html>.

