

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**

Protocolo de trabajo de graduación presentado por Luis Genaro Álvarez
Sulecio, estudiante de Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

2024

Resumen

La hidroponía es un método de crecimiento de plantas sin la dependencia del suelo para suministrar los nutrientes requeridos para el desarrollo de los cultivos. Esto se logra al utilizar una solución de nutrientes disueltos en agua los cuales son suministrados constantemente a las raíces de las plantas. Existe una gran variedad de implementaciones de cultivos hidropónicos los cuales se caracterizan por su bajo consumo de agua, independencia del suelo y su eficiencia en el uso de espacio.

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 elevados para realizar las mediciones y los 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. Para lograr esto se realizará una implementación a escala de un sistema para cultivos hidropónicos urbanos, que sea capaz de asegurar el crecimiento de una planta de cilantro en condiciones controladas. Adicionalmente, se implementará una interfaz gráfica demostrativa para que el sistema pueda ser monitoreado y controlado de manera remota desde un dispositivo móvil aprovechando el contexto de la red de las cosas.

Antecedentes

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.

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 las oportunidades 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 analizaron factores como la ubicación, espacio requerido, variedades de sistemas hidropónicos existentes, la segmentación del mercado, entre otros. Adicionalmente, se realizó un diseño preliminar de un sistema hidropónico utilizando la metodología NFT (Nutrient Film Technique) 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.

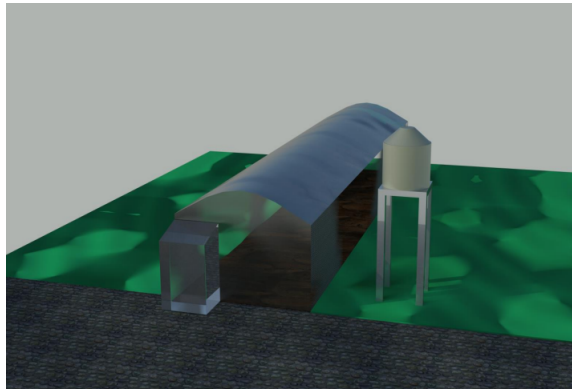


Figura 1: Modelo 3D de invernadero propuesto en estudio de factibilidad de cultivos hidropónicos.

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 encontró 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 detallaron 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 al permitir su implementación en entornos urbanos, en especial, al considerar la tendencia actual de urbanización. Se presentaron 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 detalló 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. Se realizó una recopilación respecto a la importancia de diferentes medios de crecimiento sólidos y nutrientes en el desarrollo de las plantas en entornos hidropónicos. Finalmente, los autores hacen énfasis en el valor de esta nueva tecnología para la producción local de alimentos en áreas urbanas. “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)

Uso de *Fuzzy Logic* para el control de sistemas hidropónicos

Los sistemas hidropónicos manejan una gran cantidad de variables las cuales deben ser controladas de tal manera que se mantengan en rangos preestablecidos. Debido a la gran variedad de plantas que se pueden cultivar en un sistema hidropónico se requieren controladores con rangos que se puedan adaptar, según el cultivo seleccionado. Los controladores que emplean *fuzzy logic* son capaces de alterar sus rangos de control de manera dinámica y con facilidad. Dichos controladores permiten definir rangos de entrada los cuales pueden ser mapeados a rangos de salida. Al momento de evaluar el estado del sistema, se utilizan funciones específicas para realizar una linealización aproximada de las variables medidas. En base a estas linealizaciones se determina la compensación que debe realizar el controlador para mantener los niveles deseados. Esto permite una fácil integración con sistemas IoT (*Internet of Things*) puesto que los rangos pueden ser variados por el usuario según los requisitos del sistema.

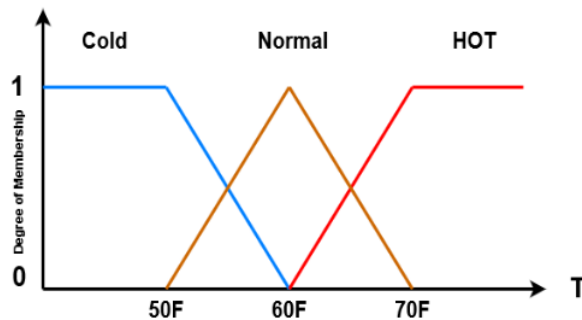


Figura 3: Función de membresía de entradas de temperatura para *fuzzy logic*. [4]

En el estudio de Thazin y colaboradores [4], se implementó un controlador utilizando *fuzzy logic* para regular la temperatura y humedad de un sistema hidropónico mediante cambios al flujo de aire en el entorno. Se realizaron cálculos de los ventiladores DC requeridos para alterar los parámetros deseados, los cuales se instalaron en posiciones estratégicas dentro del entorno de crecimiento diseñado para mejorar el flujo de aire. Se utilizó un Arduino Nano junto con un sensor DHT22 para realizar las mediciones de temperatura y controlar la velocidad de los ventiladores. Adicionalmente, se incluyó una pantalla LCD como display para las mediciones de temperatura y velocidad de los ventiladores. Con el controlador propuesto se logró un control adecuado de la velocidad de los ventiladores en función del rango de temperatura ambiente en el área de crecimiento. Se demostró que el sistema fue capaz de variar la velocidad angular de los ventiladores utilizados según la temperatura mediante la realización de 10 pruebas a temperaturas entre los 45 y 87 °F. Adicionalmente, se logró subir los resultados a la plataforma *Thing Speak* para monitorear valores de temperatura, humedad e intensidad de luz. Dicha plataforma cuenta con un servidor al cual se pueden subir datos mediante protocolos WiFi para que estos sean desplegados en gráficas en función del tiempo transcurrido.

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 [5] buscó desarrollar un sistema de monitoreo y control automático de parámetros de calidad de agua y condiciones ambientales para un cultivo hidropónico en invernadero. Adicionalmente, se definió como objetivo lograr que este aprovechara tecnologías IoT para la transferencia y el análisis de datos. Se definieron requerimientos para el sistema como parámetros a monitorear, períodos de muestreo y acciones o alarmas según los diferentes eventos. Luego de la selección de los sensores que se utilizarían, en función de los parámetros que se irán a monitorear y considerando una baja frecuencia de re-calibración, se implementó una red de nodos sensoriales. 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 el campo al instalar el sistema en un invernadero para simular condiciones reales. Se desplegaron los datos recolectados en la plataforma Ubidots y se realizaron pruebas de factibilidad del sistema. 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.

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 [6], realizado en la Unión Europea en el año 2019, se analizaron las tendencias tecnológicas junto con los retos a los que se enfrenta la agricultura moderna en el contexto de la globalización y el calentamiento global. Adicionalmente, se

analizaron los retos a los que se enfrentan las tecnologías de granjas inteligentes en desarrollo. Se destacaron factores como costos elevados de 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 el crecimiento en popularidad en años recientes, esta 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.

Justificación

La hidroponía ofrece grandes beneficios entre ellos, el ahorro significativo de agua, espacio de crecimiento y un control más robusto de las características de crecimiento del cultivo deseado. Ahora bien, estos sistemas requiere de cuidados específicos y diferentes a los de la agricultura tradicional, como el monitoreo de acidez o alcalinidad de la solución 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 una plataforma que pueda ser utilizada para analizar la viabilidad de sistemas hidropónicos automáticos para 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. Esta tecnología será validada mediante un prototipo del sistema 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 de bajo consumo eléctrico con costos reducidos, se buscará también optimizar la productividad del sistema. Adicionalmente, establecerá una línea base para futuras investigaciones que deseen aprovechar el control autónomo 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 atraktividad 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 pérdidas por cambios en condiciones climáticas.

Objetivos

Objetivo General

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

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.

Marco teórico

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 una técnicas 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 [7]. 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 [7].

Nutrient Film Technique (NFT)

La hidroponía cuenta con una gran variedad de métodos ideados 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 (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 0.3 % y 2 % [8]. 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 [9]. 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 [10]. 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.

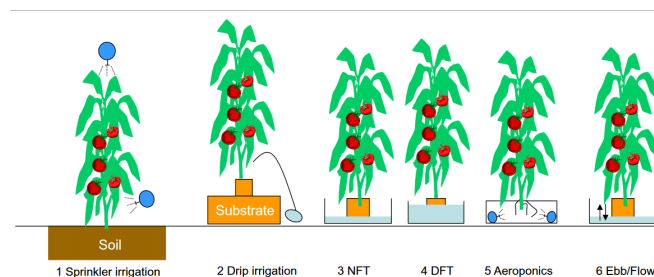


Figura 5: Variedad de métodos de irrigación para cultivos [8].

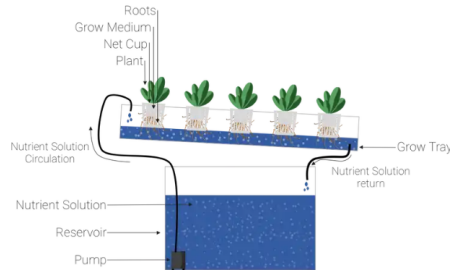


Figura 6: Diagrama simplificado de metodología NFT para cultivos hidropónicos [11].

Solución de nutrientes

Acceso constante a luz solar, agua, oxígeno y dióxido de carbono es esencial para la supervivencia de las plantas. 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 [12]. 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. En este grupo se encuentran el Nitrato requerido para el desarrollo de hojas y tallos; el Fósforo, requerido para el desarrollo de raíces, la formación de semillas y la maduración de frutos; y el Potasio, requerido para el desarrollo de frutos y la acumulación de nutrientes en la planta [12].

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. Entre estos se encuentra el Calcio, el cual activa la formación de raíces, especialmente en las primeras etapas de desarrollo y neutraliza las sustancias tóxicas producidas por la planta. También se encuentra el Azufre, el cual es esencial en la producción de proteínas, mejora el crecimiento de la planta y facilita el desarrollo de semillas. Adicionalmente, en este grupo se cuenta con el Magnesio, el cual es fundamental para las plantas porque es requerido para la creación de clorofila y las azúcares que requieren para vivir, adicionalmente es utilizado para regular los nutrientes dentro de la planta y fomenta la creación de aceites y grasas [12]. 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 [13]:

- 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 amoníaco.

- **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 [12]. 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 [12].

Características de la solución nutritiva del cilantro

El cilantro es una hierba bastante versátil la cual requiere de una baja cantidad de nutrientes con tal de presentar 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 [14]. Este control de macro-nutrientes va de la mano con una regulación cuidadosa de la temperatura del agua. Esto pues, en diferentes rangos de temperatura varía la necesidad de nutrientes así como su facilidad de absorción [15].

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

[14]. 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 [16]. A continuación se detallan los parámetros del agua requeridos para el correcto desarrollo del cilantro en un sistema hidropónico:

Características de la solución nutritiva	
Concentración de nutrientes:	1.2 a 1.8 mS/cm
Potencia de hidrógeno (pH):	5.5 a 6.7
Temperatura del agua:	15 a 20 °C
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 1: Parámetros esenciales para el crecimiento de Cilantro en sistemas hidropónicos [17] [14].

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.

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 afecta la absorción de Nitrógeno ya sea que se encuentre en la forma de sales de nitratos o amoníacos[18]. 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 [19].

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 mantienen 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 [19].

A continuación, se detallan las características del sensor:

Sonda del sensor de oxígeno disuelto	
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
Placa de conversión de señales del sensor	
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 2: Características de funcionamiento del sensor SEN0237 de *DFRobot*.



Figura 7: Sensor analógico de oxígeno disuelto [19].

Sensor de electro conductividad (EC)

Las soluciones de nutrientes requeridas para el crecimiento de las plantas cuentan con compuestos en la forma de sales, las cuales afectan la conductividad eléctrica del agua. Estas variaciones permiten utilizar los sensores de electro conductividad para determinar de manera aproximada la concentración de solución nutritiva en el agua de riego. La conductividad, medida en mS/cm (mili sievers por centímetro), es una propiedad de los materiales la cual se define como el inverso de la resistencia. 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 [20]. 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:	$\pm 5\%$ F.S.
Cable de conexión:	BNC
Conector de señal:	Interfaz PH2.0 - 3 pin
Dimensiones:	42mm \times 32mm (1.65in \times 1.26in)

Cuadro 3: Características de funcionamiento del sensor DFR0300 de *DFRobot*.



Figura 8: Sensor analógico de electro conductividad [20].

Potencia de hidrógeno (pH)

El pH o potencia de hidrógeno se conoce como la facilidad con la que una sustancia en disolución libera protones de hidrógeno o iones de oxidrilo. Según esta definición, una sustancia ácida se caracteriza por una sustancia que libera protones de hidrógeno (H^+) mientras que una sustancia básica es aquella que entrega iones de oxidrilo (OH^-). La escala de pH es una función logarítmica 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 [21]. 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 presipitación 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 [22]. 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.

Sensor de pH *SEN0161 PH Meter* de *DFRobot*

Este sensor cuenta con una construcción sencilla la cual hace de este sensor 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 [23]. A continuación se detallan las características del sensor:

Sonda del sensor de pH	
Rango de detección:	0 a 14 pH
Rango de temperatura:	0 a 60 °C
Tiempo de respuesta:	Menor o igual a 1 minuto
Placa de conversión de señales del sensor	
Voltaje de alimentación:	5.0 VDC
Cable de conexión	BNC
Conector de señal:	Interfaz PH2.0 - 3 pin
Certeza de medición:	$\pm 0.1\text{pH}$ a 25 °C.
Dimensiones:	42 mm \times 32 mm (1.65 in \times 1.26 in)
Potenciómetro de ajuste de ganancia	Sí
Indicador de potencia:	LED
Largo del cable:	660mm

Cuadro 4: Características de funcionamiento del sensor SEN0161 de *DFRobot*.



Figura 9: Sensor analógico de potencia de hidrógeno (pH) [23].

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 [15]. 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 [24]:

Sonda del sensor de pH	
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 5: Características de funcionamiento del sensor DS18B20.



Figura 10: Sensor tipo sonda de temperatura del agua [24].

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 [25]. Los autores describen como 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 [25].

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 [26]. 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 bloqueos [27].

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. [28] 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.

Sensor DHT11	
Rango de medición de temperatura:	0 a 50 °C
Precisión de temperatura:	$\pm 2^{\circ}$ 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 6: Características de funcionamiento del sensor DHT11 [28].



Figura 11: Sensor de temperatura y humedad DHT11 [29].

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* [30]:

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 7: 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 asynchrhonous receiver/transmitter</i>)
SPI (<i>Serial Peripheral Interface</i>)
PWM (<i>Pulse Width Modulated</i>)

Cuadro 8: Protocolos de comunicación y otros periféricos disponibles en el *ESP-WROOM-32*.

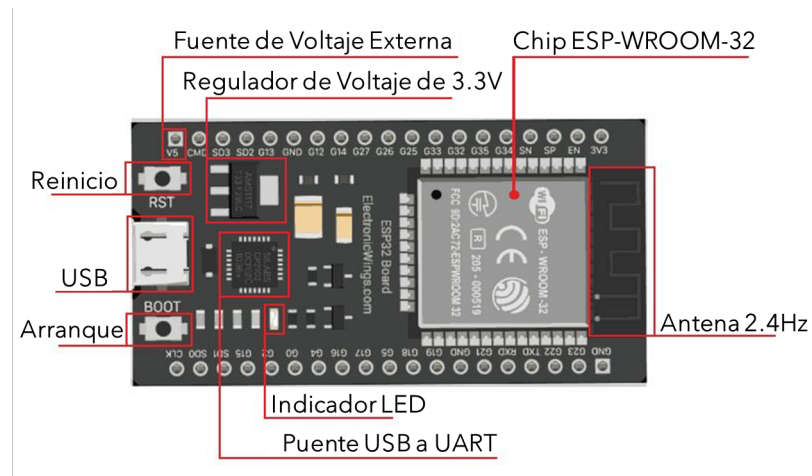


Figura 12: Componentes de la placa de desarrollo *ESP-WROOM-32* [30].

Sistemas de control y conectividad con la nube

El internet de las cosas (IoT)

El internet de las cosas se refiere a la capacidad de conectar objetos 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 y actuadores o 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. [31]

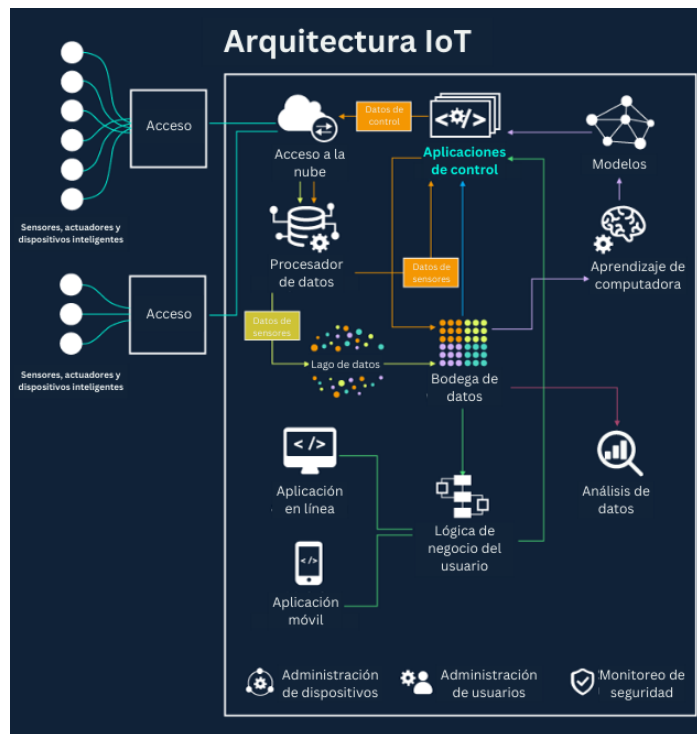


Figura 13: Diagrama de la arquitectura IoT generalizada [32].

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 [33]. 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 [34]. 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 14. 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 [35].



Figura 14: Estructura de una solicitud para retirar datos en el protocolo HTTP/1.1 [35].

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 [35].

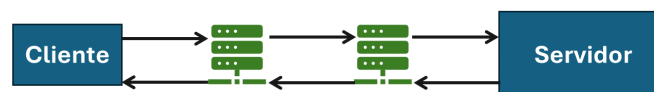


Figura 15: Diagrama de la comunicación entre cliente y servidor mediante el protocolo HTTP [35].

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 [36]. 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.

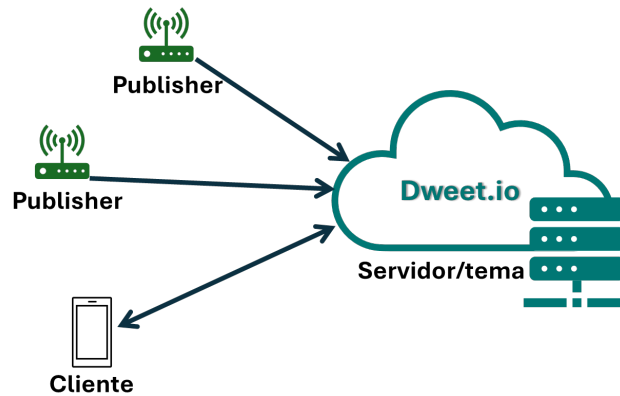


Figura 16: Diagrama de la comunicación entre cliente y servidor de *Dweet.io*.

Controladores de Fuzzy Logic

En el área de control de sistemas, existen casos en donde el sistema a controlar presenta una gran cantidad de entradas y salidas así como una alta complejidad matemática en las variables de estado que lo definen, en la forma de no linealidades. En estos casos, el desarrollo de un modelo matemático que sea capaz de describir adecuadamente todas las relaciones entre variables llega a ser demasiado complejo, por lo cual se buscan alternativas para el control. Uno de los métodos diseñados para el control de estos sistemas se basa en la teoría de *Fuzzy Sets* el cual busca establecer rangos de funcionamiento lineales para las variables de control del sistema así como relaciones lineales entre los diferentes parámetros que estas controlan. Estos se logra mediante procesos matemáticos para obtener rangos que permitan un control adecuado del sistema, sin la realización de un modelo matemático que describa todas las dinámicas del sistema [37].

Metodología

Definición de línea base de crecimiento del cilantro

Es importante cultivar una muestra de cilantro empleando una técnica de crecimiento tradicional con sustrato nutritivo con tal de comparar el rendimiento del cilantro hidropónico cultivado en el sistema propuesto. El cultivo de control o de línea base se realizará utilizando un sustrato definido en un período de tiempo preestablecido. Al finalizar el período de crecimiento del cultivo, se realizará una cosecha del cilantro durante la cual se realizarán mediciones de sus características físicas. Entre estas se incluirá el peso húmedo de la planta (esencialmente el peso de la planta incluyendo raíces y tallo principal), la cantidad de hojas presentes, y su altura total desde la base del tallo principal. Estos parámetros se registrarán para realizar una comparación cuantitativa y cualitativa del cilantro hidropónico versus el cilantro cultivado en sustrato nutritivo.

Tanto el cultivo de cilantro en sustrato nutritivo como en el sistema hidropónico se iniciarán desde la semilla en un sustrato de germinación. Se utilizarán semillas de la tienda Hidroponía Guatemala, las cuales se germinarán en una toalla de papel húmeda resguardada en una bolsa *zip-lock*. En el caso del sustrato nutritivo, se iniciarán 10 semillas, de las cuales se seleccionarán 5 brotes para ser cultivados en un área designada. Luego de un período de una semana, se revisarán las semillas para seleccionar las que hayan germinado y trasplantarlas a un sustrato de incubación. Este consistirá en una mezcla de compost orgánico, perlita, y fibra de coco fina. Adicionalmente, se agregará canela en polvo a la mezcla para reducir la probabilidad de crecimiento de hongos o moho en las semillas o raíces. Una vez que los retoños hayan alcanzado una altura aproximada de cinco centímetros, se revisarán las raíces para determinar si estas se han desarrollado lo suficiente para ser trasplantadas. En caso de que el crecimiento sea satisfactorio, se trasplantarán a un área de cultivo con un espacio entre plantas de 150 mm.

El sustrato de cultivo consistirá de una mezcla de arena de río, tierra negra, abono orgánico y fibra de coco. Al igual que en el sustrato de crecimiento, se agregará canela en polvo para reducir la probabilidad del desarrollo de hongos o moho en las raíces. Se realizará un monitoreo diario de las plantas con un riego del sustrato cada segundo día de ser necesario. Se definirá un período de crecimiento de 55 días, durante el cual se tomarán medidas preventivas para evitar plagas como el uso de pesticidas orgánicos. Al finalizar dicho período, se realizará la cosecha del cilantro, retirando el mismo de raíz. Antes de realizar el pesado se lavarán cuidadosamente las plantas, particularmente las raíces, para eliminar restos de sustrato o piedras.

Se registrará el peso del cilantro cosechado incluyendo las raíces con tal de obtener el peso húmedo de la cosecha. Este peso se obtendrá mediante escalas de precisión para considerar leves variaciones en el peso entre plantas. Adicionalmente, se registrará la longitud de las raíces, la altura total del cilantro desde la base del tallo principal, y se realizará un recuento de las hojas para determinar su densidad. Este proceso se realizará para cada una de las cinco plantas sembradas y se almacenarán los datos para ser comparados luego de obtener los resultados de las pruebas con el sistema hidropónico automático.

Construcción del sistema hidropónico

El sistema hidropónico consistirá en tres etapas o módulos los cuales serán integrados para obtener las condiciones de crecimiento deseadas y el control de parámetros. Estos módulos cumplen diferentes funcionalidades, desde proporcionar una estructura estable al sistema hasta realizar las mediciones y el control de parámetros. La construcción del sistema hidropónico requerirá de la integración de estos módulos para su funcionamiento adecuado.

Estructura física principal

Esta estructura consistirá en una estantería de metal con repisas fijadas a una distancia aproximada de 400 mm entre sí. Estas repisas cumplirán la función de proporcionar una base estable para colocar los canales de crecimiento y los sensores del sistema. Adicionalmente, las repisas proveerán una superficie en la cual se colocaran las luces de crecimiento. Con tal de facilitar el proceso de construcción, se utilizará una repisa prefabricada de metal y madera, la cual cuenta con alturas de repisas ajustables. El metal con protección ambiental reducirá los posibles daños por corrosión, y la madera provee una plataforma flexible sobre la cual se pueden montar los diferentes elementos del sistema. En la Figura ?? se puede apreciar la estructura principal.

Si bien basta con la estantería para soportar el sistema hidropónico vertical, esta deberá ser cubierta con tal de permitir un control más cercano de los niveles de luz en el sistema así como de la temperatura ambiente y humedad. Se utilizará un nailon negro en pliegos para recubrir la estructura, utilizando acoples para tensar el material y lograr una cobertura adecuada. Adicionalmente, se agregarán dos agujeros para incluir ventiladores en la estructura, los cuales proveerán una circulación de aire y serán empleados para controlar la temperatura y humedad interna.

Distribución de solución nutritiva

El sistema de distribución de nutrientes consistirá en una serie de tuberías de PVC las cuales distribuirán la solución nutritiva desde un depósito en la base del sistema hacia todas las repisas de crecimiento. Se utilizarán tuberías de PCV con un diámetro de 3 pulgadas colocados a 150 mm entre centros. Estas almacenarán las plantas, por lo que tendrán un agujero de 2 pulgadas de diámetro en el cual se colocarán las canastas de crecimiento. Adicionalmente, estas estarán inclinadas a un ángulo adecuado para facilitar la caída del agua de una repisa hacia otra. Esta inclinación se logrará mediante soportes impresos con filamento de impresión 3D para asegurar que las tuberías se mantengan fijas en la inclinación deseada.

Los canales de crecimiento serán alimentados con solución nutritiva mediante un sistema de tuberías de PVC de 1/4 de pulgada. Se utilizará una tubería principal a la cual se conectará una bomba de agua sumergible, y llevará la solución nutritiva hacia la repisa superior del sistema. Luego, se realizarán conexiones entre repisas utilizando tuberías del mismo diámetro para asegurar un flujo constante. Finalmente, la solución regresará al depósito inicial, el cual consistirá en una caja plástica. En esta se almacenará la solución nutritiva junto con

los diferentes sensores y actuadores para controlar los parámetros de la solución nutritiva. Es importante mencionar que se permitirá una caída de por lo menos 150 mm para la solución que regresa al depósito, esto con tal de fomentar la agitación y oxigenación de la solución.

Estructura de monitoreo y control

Dentro del sistema hidropónico se estarán realizando mediciones de nivel de pH del agua, conductividad eléctrica de la solución, su temperatura, y la humedad y temperatura ambiente. La información de estos sensores será recolectada por un microcontrolador *ESP WROOM32* el cual contendrá las funciones necesarias para la lógica de control y el accionamiento de los actuadores. Adicionalmente, permitirá la conectividad del sistema con la red inalámbrica para el monitoreo externo de parámetros desde una aplicación móvil. Estos sensores y el microcontrolador requerirán de un espacio en donde se puedan resguardar del agua y la humedad inherentes del sistema. Si bien, los sensores que se encontrarán en contacto directo con el agua están diseñados para ello, los demás componentes como la fuente de poder las placas de control no están diseñadas para resistir altos niveles de humedad. Por esta razón, se diseñará un contenedor dedicado y hermético para resguardar los componentes eléctricos de importancia.

El contenedor deberá ser capaz de almacenar una fuente de alimentación conmutada, la cual será utilizada para suministrar el voltaje requerido por los componentes del sistema. Adicionalmente, deberá admitir una conexión eléctrica general de 120VAC, la cual será el suministro de energía eléctrica para el sistema. Con tal de facilitar el diseño y la construcción del sistema, se evaluará el uso de un contenedor plástico prefabricado el cual cuente con un cierre hermético o sea fácil de sellar. Se utilizará silicona resistente al agua para rellenar cualquier abertura requerida para cables, y empaques en donde sea necesario. Adicionalmente, contará con un toma corrientes estándar para el suministro de energía eléctrica al sistema. Es importante mencionar que se deberán realizar cálculos de voltaje para asegurar que los cables utilizados en las etapas de potencia sean del calibre adecuado según las cargas esperadas. Finalmente, se diseñarán enganches requeridos para fijar los diferentes sensores en las ubicaciones deseadas alrededor del sistema hidropónico, los cuales serán impresos en 3D para reducir costos y tiempos de producción.

Programación del sistema embebido

Tanto el control de los actuadores como la lectura de los sensores requerirá del uso de un microcontrolador. Considerando que se estará empleando el *ESP WROOM32*, este se programará utilizando la plataforma de desarrollo de *Arduino*. La programación del sistema embebido se dividirá en múltiples fases las cuales abarcan la programación de la comunicación inalámbrica para el envío y la recepción de datos de la nube, la lectura de sensores, los cálculos de control requeridos para estabilizar niveles deseados, y la programación de los actuadores. Cada una de estas etapas contará con pruebas a realizar, las cuales incluyen pruebas de conectividad y del funcionamiento correcto de sensores y actuadores.

Conectividad a *Dweet.io* mediante HTTP

La ventaja de utilizar el sistema de *Dweet.io* es que permite el uso de solicitudes mediante el protocolo HTTP. Esto aumenta la velocidad de la transmisión de datos al reducir la necesidad de establecer la conexión a un servidor predeterminado. Por otro lado, esto permite el desarrollo de dos funciones de comunicación dedicadas a solicitar y publicar información al servidor de *Dweet.io*. Es importante establecer que una transferencia adecuada de datos se definirá como una transferencia sin pérdida de información, y que mantenga el orden estructural de los datos para facilitar su recuperación.

La función utilizada para solicitar información deberá realizar diferentes operaciones al ser llamada. Primero, tendrá que generar la solicitud utilizando un paquete de texto predeterminado que incluya los componentes necesarios para solicitar los datos más actualizados almacenados en el servidor. La respuesta enviada por el servidor contará con una serie de datos los cuales deberán ser filtrados y organizados para obtener la información requerida. Por esta razón, la segunda operación que deberá realizar la función será separar el encabezado de la respuesta, y extraer los valores requeridos del paquete de texto. Finalmente, una vez se tengan los datos en el formato correcto, se deberán retornar estos para que puedan ser utilizados por el microprocesador en las operaciones de control.

De manera similar, la función utilizada para publicar información deberá realizar diferentes operaciones al ser llamada para asegurar que los datos sean transferidos adecuadamente. Primero, los valores ingresados a la función deberán ser organizados en un paquete de texto con el formato y la estructura establecida para almacenamiento en el servidor. Una vez formateados los datos, se realizará la publicación al servidor de *Dweet.io* asegurando que se encuentre activa la conexión de internet necesaria. Luego, se deberán leer los encabezados enviados por el servidor como respuesta para asegurar que el paquete haya sido recibido correctamente, regresando un mensaje de éxito en el caso de que se haya ejecutado correctamente la transmisión. En caso de que la publicación de datos falle, se establecerá un tiempo de espera antes de realizar una segunda prueba. Si luego de el segundo intento se encuentra con un error, se devolverá un mensaje de error indicando que la información del servidor de *Dweet.io* no pudo ser actualizada.

Lectura y calibración de sensores

El monitoreo de parámetros del sistema se realizará mediante una serie de sensores analógicos los cuales deberán ser integrados con el microcontrolador mediante puertos ADC (Convertidor Analógico a Digital). Adicionalmente, se cuenta con cinco sensores los cuales utilizan un protocolo conocido como *onewire*, el cual utiliza un único cable para transmitir información del sensor a un microcontrolador. Una vez conectados todos los sensores, se podrán realizar pruebas de funcionamiento así como calibraciones cuando estas sean necesarias. En el caso de los sensores con comunicación *onewire*, estos no requerirán de una calibración detallada. Por otro lado, los sensores analógicos como el sensor de pH y electro conductividad sí requieren de un proceso de calibración utilizando una solución especializada.

El proceso de calibración para los sensores analógicos requerirá del desarrollo de funciones específicas que sean capaces de almacenar los valores analógicos recibidos, y realizar la

regresión lineal necesaria. Para esto se realizará una comparación entre el valor analógico recibido para una concentración dada de solución y su valor teórico de pH o electro conductividad según sea el caso. Luego, se almacenarán los resultados de las pruebas con las soluciones de control, y se realizará una medición con la solución del sistema. Este procedimiento deberá ser repetido de manera periódica según el sensor, por lo que se deberá incluir un sistema de notificación al usuario para re-calibrar los sensores luego de el tiempo definido de uso.

Control de actuadores

El control de la concentración de solución nutritiva y pH se realizará mediante el accionamiento de válvulas reguladoras de flujo. Ahora bien, con tal de reducir el costo de producción, estas válvulas se controlarán mediante servo motores, los cuales deberán ser acoplados las válvulas y configurados para lograr el rango de giro apropiado. Adicionalmente, se utilizarán servo motores para introducir el sensor de electro conductividad en la solución cada vez que se desee realizar una medición. Esto se debe a que es uno de los sensores más susceptibles al agua, por lo que es importante que se mantenga fuera de esta mientras que no se estén realizando mediciones.

Los servo motores se controlarán utilizando el *ESP WROOM 32*, al igual que los sensores, por lo que será necesario configurar los puertos PWM (*Pulse Width Modulated*). Estos permitirán el control preciso del ángulo de giro de cada uno de los servo motores, asegurando así que se definan posiciones angulares para cada solución de manera individual. La integración de estos sistemas junto con el algoritmo de control permitirá variar los parámetros del agua con nutrientes que será distribuido hacia las plantas.

Si bien los servo motores juegan un papel crucial en el control de la concentración de nutrientes y los niveles de pH de la solución, no son los únicos actuadores presentes en el sistema. Con tal de variar la temperatura ambiente en el entorno de crecimiento, así como los niveles de humedad en el aire, se agregarán ventiladores los cuales permitirán un flujo de aire constante alrededor de las plantas. Estos ventiladores se controlarán utilizando relés los cuales deberán ser accionados por el microcontrolador seleccionado. Debido a esto, únicamente se contará con dos estados para los ventiladores, encendido y apagado, por lo que se deberá analizar el impacto del flujo máximo de aire entregado por los mismos en un período dado de tiempo. En base a este impacto, se deberán desarrollar funciones para accionar los ventiladores a manera de mantener un ambiente constante en los niveles deseados de humedad y temperatura ambiental.

Finalmente, se contará con varias series de luces led controlables de la marca *Adafruit*. Estas tiras de luces se utilizarán para generar ciclos de crecimiento y regular el consumo de nutrientes de las plantas. El microcontrolador deberá regular la luminosidad de las tiras, así como el color individual de cada una para asegurar que la frecuencia de luz entregada sea la óptima para el crecimiento del cultivo.

Diseño y evaluación del sistema de control

El sistema hidropónico automático cuenta con una gran cantidad de variables que deben ser monitoreadas cuidadosamente. Por esta razón, se optó por considerar a cada uno de los sub-sistemas individuales para desarrollar e implementar los sistemas de control. En base a esto se definen tres sub-sistemas a controlar, los cuales regularán los niveles de nutrientes en el agua, el nivel de pH y la temperatura junto con la humedad ambiental respectivamente.

El proceso de control para cada uno de los parámetros consistirá en la definición de un período de muestreo general. Este se utilizará para determinar cambios en los parámetros a lo largo del día con una frecuencia relativamente baja. Luego, en el caso de que uno de los parámetros se encuentre fuera del rango aceptable definido, se aumentará el período de muestreo para determinar con mayor exactitud la el efecto de las variables de control sobre el parámetro a variar. Una vez logre estabilizar el sistema al rango preestablecido, se regresará al período de muestreo general. Esto se realizará con tal de reducir el consumo eléctrico del sistema, y alargar la vida útil de los sensores con mayor grado de degradación en agua.

Una vez definido el período de muestreo de los sensores, se desarrollarán las funciones de control para cada uno de los sub-sistemas definidos. Debido a la complejidad matemática del modelado de cada sub-sistema para el ajuste de parámetros, se utilizarán controladores *Fuzzy Logic*. Como primer paso, se deberán definir los rangos aceptables para cada uno de los parámetros a monitorear. Estos rangos permiten establecer las reglas de control y las relaciones entre sensores y actuadores.

Finalmente, se realizará una evaluación del sistema de control realizando pruebas de regulación de parámetros. Para esto se iniciará un cronómetro en el momento en que los sensores realicen la lectura del parámetro a evaluar con tal de determinar el tiempo de estabilización del controlador. Adicionalmente, se evaluará la cercanía del valor de estado estable a los rangos deseados con tal de determinar si este se encuentra próximo a los límites, tanto inferior como superior.

Pruebas de rendimiento del sistema hidropónico

Las pruebas de rendimiento del sistema hidropónico se realizarán una vez todas las etapas anteriores hayan sido completadas. Durante este período se buscará determinar la calidad producida de cilantro, y comparar esta con los resultados obtenidos de las pruebas realizadas con sustrato tradicional. Se empleara el siguiente procedimiento para realizar las pruebas controladas del sistema hidropónico completado.

El sistema hidropónico será cargado con solución nutritiva, reguladores de pH y agua. Con estos materiales se realizará un ciclo de cebado, tanto para asegurar los niveles de presión necesarios en las tuberías para el flujo de solución, como para estabilizar los parámetros iniciales en el sistema. Es importante considerar que los niveles de pH del agua utilizada dependerán de la ubicación y el tipo de tratamiento que reciba el agua disponible. Por esta razón, se prestará atención especial a nivelar estos valores antes de introducir las mezclas de nutrientes y las plantas para el proceso de crecimiento.

Al igual que las pruebas para la línea base del rendimiento del sustrato tradicional, se

realizará un proceso de germinación. Para este se utilizará la misma mezcla de sustrato junto con la misma cantidad de semillas. Una vez germinadas, se esperará a que los retoños alcancen una altura de aproximadamente cinco centímetros. Una vez alcanzada dicha altura, se retirarán las plantas del sustrato y se limpiarán las raíces cuidadosamente utilizando agua para remover partículas de sustrato. Luego de esto, se colocarán en canastas de crecimiento hidropónico con perlita, la cual será utilizada como sustrato de anclaje para mantener fijas las plantas.

Los retoños de cilantro se mantendrán en el sistema hidropónico por 55 días, durante los cuales se realizarán observaciones periódicas de la salud del follaje así como la presencia de plagas. Junto a esto, se añadirá agua al sistema según sea necesario, considerando pérdidas por evaporación y absorción por parte de las plantas. Adicionalmente, se mantendrá un registro de los parámetros ambientales y de agua, los cuales serán almacenados en una base de datos local. Luego del período de crecimiento, se extraerán las plantas del sistema cuidadosamente, retirando primero las canastas, y luego separando las raíces de la perlita. Las plantas limpias y sin residuos de sustrato en sus raíces serán pesadas y medidas utilizando la misma metodología que en las pruebas de la línea base. Una vez se tengan estos resultados, se realizará una comparación entre los valores promedio encontrados para cada uno de los métodos de crecimiento.

Desarrollo de aplicación móvil

Si bien la aplicación móvil contará con la habilidad de controlar, de manera remota, los parámetros del sistema hidropónico como la concentración de nutrientes y el nivel de pH, esta será utilizada principalmente para monitorear el sistema. Para lograr esto se utilizará el programa de *Android Studio* en el cual se programará la conectividad al internet, junto con los ciclos de solicitud de datos al servidor de *Dweet.io* utilizado en el proyecto. Se configurarán como mínimo dos pantallas para la aplicación, una donde se contará con la información en tiempo real del sistema hidropónico, y otra en donde se podrán alterar los niveles deseados para cada uno de los parámetros disponibles. La finalidad de esta aplicación consistirá en permitir al usuario indagar en el estado de sus cultivos sin la necesidad de realizar una visita o mediciones manuales. El desarrollo de la aplicación se dividirá en las siguientes secciones.

Conectividad al internet y prueba de comunicación con *Dweet.io*

Las habilidades de monitoreo y control de parámetros requerirán de una conexión estable al internet, por lo cual se utilizarán los sistemas nativos de *Android Studio* para detectar si el dispositivo se encuentra conectado a una red de internet activa. Luego de esto, se activará la conexión de la aplicación a la red de internet, y se realizará una prueba de conectividad. Esta consistirá en la solicitud de la información almacenada en el servidor de *Dweet.io*. En el caso de que no se cuente con una conexión activa al internet, o en caso de que no se logre recibir información adecuada del servidor de *Dweet.io* se lanzará un mensaje de error en la aplicación.

Pantalla de monitoreo

Una vez se haya logrado la conexión al internet, y se estén recibiendo datos del servidor de Dweet.io, se habilitará la pantalla de monitoreo. En esta se encontrará la temperatura del agua en tanto el depósito como los canales de crecimiento, la concentración de nutrientes actual en mS/cm^2 , el nivel de pH, la temperatura ambiental y la humedad en el sistema. Adicionalmente, se contará con un indicador del estado de las luces de crecimiento, mostrando si estas se encuentran encendidas o apagadas, así como la intensidad a la que se encuentran configuradas. Mientras que se encuentre activa esta pantalla, se realizará una solicitud de los parámetros mencionados con una frecuencia similar a la utilizada por el sistema para el monitoreo de parámetros.

Pantalla de control de rangos aceptables

Diferentes cultivos requieren de un control diferente de parámetros como nivel de pH en la solución o temperatura de la misma. Así mismo, es posible que a lo largo del período de crecimiento, sea necesario realizar modificaciones a los rangos en los cuales se desea mantener cada uno de los parámetros, en base a la respuesta de las plantas a su entorno. La segunda pantalla contará con un espacio en donde se podrán ingresar nuevos valores máximos y mínimos para cada uno de los parámetros. Estos rangos serán enviados a un servidor diferente de *Dweet.io* y serán leídos por el microcontrolador para actualizar el sistema de control.

Cronograma de actividades

Actividad	Junio				Julio					Agosto				Septiembre			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Finalización de diseños de prototipo																	
Prueba de crecimiento de cilantro en tierra																	
Adquisición de materiales																	
Construcción de estructura principal del prototipo																	
Programación de microcontrolador para lecturas																	
Conexión del microcontrolador a la nube																	
Calibración de sensores y pruebas de rangos de medición																	
Definición de sistema de control a utilizar																	
Programación de sistema de control en microcontrolador																	
Pruebas iniciales de sistema hidropónico con sensores y actuadores																	
Prueba de crecimiento de cilantro en sistema hidropónico																	
Desarrollo de aplicación móvil																	
Redacción del contenido de la tesis																	

Figura 17: Cronograma de actividades para segundo ciclo.

Índice preliminar

Prefacio

Lista de figuras

Lista de cuadros

Resumen

Abstract

1. Introducción

2. Antecedentes

- a)* La hidroponía en Guatemala
- b)* Tendencias actuales en la producción sostenible de hortalizas
- c)* Uso de *Fuzzy Logic* para el control de sistemas hidropónicos
- d)* Monitoreo y control de cultivos hidropónicos utilizando tecnología IoT
- e)* La digitación de la agricultura

3. Justificación

4. Objetivos

- a)* Objetivo general
- b)* Objetivos específicos

5. Alcance

6. Marco Teórico

- a)* Cultivos hidropónicos
- b)* Nutrient Film Technique (NFT)
- c)* Solución de nutrientes
- d)* Características de la solución nutritiva del cilantro
- e)* Monitoreo de parámetros para el crecimiento de plantas
- f)* Placa de desarrollo ESP32
- g)* Sistemas de control y conectividad con la nube
 - El internet de las cosas (IoT)
 - Protocolo de comunicación HTTP
 - Comunicación WiFi con *Dweet.io*
 - Controladores de *Fuzzy Logic*

7. Análisis del crecimiento y rendimiento del cilantro en agricultura tradicional

8. Elaboración de sistema hidropónico

- a)* Diseño y construcción de la estructura
- b)* Programación de sistemas embebidos

- c) Recolección de datos y calibración de sensores
- d) Diseño y programación de los sistemas de control
- e) Pruebas de crecimiento en el sistema hidropónico

9. Programación de aplicación móvil

- a) Conectividad a *Dweet.io* mediante WiFi
- b) Pantalla de monitoreo
- c) Pantalla de control de parámetros

10. Sistema Final

11. Conclusiones

12. Recomendaciones

13. Bibliografía

Referencias

- [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,” *Bioinformation*, vol. 19, n.º 9, págs. 925-938, sep. de 2023, ISSN: 0973-8894. DOI: 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] T. Thazin, Z. Aung y T. T. Win, *IoT based Hydroponic Temperature and Humidity Control System using Fuzzy Logic*. mar. de 2019.
- [5] 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. dirección: <https://www.mdpi.com/2227-7080/10/1/26>.
- [6] 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. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590005619300098>.
- [7] 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. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444636966000013>.

- [8] 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. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978044463696600013X>.
- [9] 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. dirección: <https://www.mdpi.com/2311-7524/7/8/225>.
- [10] 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.
- [11] T. Adelmann, *What is the Hydroponic Nutrient-Film-Technique (NFT)*, en, ene. de 2023. dirección: <https://hydroplanner.com/blog/hydroponic-nutrient-film-technique-nft>.
- [12] C. Marulanda y J. Izquierdo, "LA HUERTA HIDROPONICA POPULAR," es, 2003.
- [13] A. Scientific, *Nutrient Solution For Hydroponics - The Ultimate Guide*, en-US, ago. de 2023. dirección: <https://atlas-scientific.com/blog/nutrient-solution-for-hydroponics/>.
- [14] 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>.
- [15] 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. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444636966000104>.
- [16] 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.
- [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.
- [18] 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. dirección: <https://doi.org/10.1186/s12870-024-04943-7>.
- [19] DFRobot, *Gravity Analog Dissolved Oxygen Sensor: SEN0237-DFRobot*. dirección: https://wiki.dfrobot.com/Gravity__Analog_Dissolved_Oxygen_Sensor_SKU_SEN0237#top.

- [20] 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.
- [21] R. Chang y K. A. Goldsby, "Química," Español, en *Química*, México D.F.: Mc. Graw-Hill/Interamericana Editores, S.A. De C. V., 1995.
- [22] 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. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128139738000014>.
- [23] DFRobot, *PH_meter_SKU__SEN0161_-DFRobot*. dirección: https://wiki.dfrobot.com/PH_meter_SKU__SEN0161_.
- [24] L. Electrónica, *Sensor de temperatura tipo sonda DS18B20*, es. dirección: <https://laelectronica.com.gt/sensor-de-temperatura-tipo-sonda-ds18b20>.
- [25] 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. 012001, oct. de 2022, Publisher: IOP Publishing, ISSN: 1757-899X. DOI: 10.1088/1757-899X/1257/1/012001. dirección: <https://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/1257/1/012001>.
- [26] 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. 11332, ene. de 2021, Number: 20 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, ISSN: 2071-1050. DOI: 10.3390/su132011332. dirección: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/20/11332>.
- [27] 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. dirección: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2013.00273/full>.
- [28] Adafruit, *DHT11 basic temperature-humidity sensor + extras*, en-US. dirección: <https://www.adafruit.com/product/386>.
- [29] Tettsa, *SENSOR DE TEMPERATURA Y HUMEDAD DHT11 | Tettsa - Tienda*, es. dirección: <https://tienda.tettsa.gt/producto/sensor-de-temperatura-y-humedad-dht11/>.
- [30] E. Wings, *Introduction to ESP32 | ESP32*, en. dirección: <https://www.electronicwings.com/esp32/introduction-to-esp32>.
- [31] RedHat, *What is IoT?* en, 2019. dirección: <https://www.redhat.com/en/topics/internet-of-things/what-is-iot>.
- [32] 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>.
- [33] 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.

- [34] 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>.
- [35] 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>.
- [36] Dweet, *dweet.io - Share your thing- like it ain't no thang*. dirección: <https://dweet.io/faq>.
- [37] H. B. Verbruggen y R. Babu?ka, *Fuzzy Logic Control: Advances in Applications*, en. World Scientific, 1999, Google-Books-ID: 5vRmd_VIFFQC, ISBN: 978-981-02-3825-4.