



Universidad Internacional de La Rioja
Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología - ESIT

Máster Universitario en Industria 4.0

Cultivo hidropónico de lechuga *Green salad bowl* habilitado por *IoT* en Tungurahua (Ecuador)

Trabajo fin de estudio presentado por:	Francisco Paúl Velasteguí Silva
Tipo de trabajo:	Planteamiento de un proyecto de Industria 4.0
Director:	Dr. Fernández García Jesús Mariano
Fecha:	15-sep-2021

Resumen

El presente trabajo tiene la finalidad de determinar si existe una mejora en la producción de lechuga *Green salad bowl* bajo el método de Hidroponía frente al método de Hidroponía automatizado con el uso de *IoT* en lugar donde las condiciones agroclimáticas son favorables para el crecimiento de hortalizas. Para la consecución del objetivo se construyó dos prototipos de sistema hidropónico. Uno de los prototipos de Hidroponía se encuentra automatizado con *IoT* mientras que el otro solo tiene automatizado la circulación del agua con nutrientes.

Cuando los sistemas de Hidroponía estaban listos, se realizó un cultivo piloto, el cual permitió la comparación de las hortalizas y, de esta manera, se pudo obtener las conclusiones que se mencionan en el presente documento.

Palabras clave: *IoT*, Cultivo de lechugas, Tungurahua, Hidroponía, Ecuador.

Abstract

The present memory has the goal to determinate whether there is an improvement in the production of green salad bowl lettuce using Hydroponic method versus Hydroponic method which was automatized with IoT in a location which has good condition for growing vegetables. In order to get the goal, two prototypes of hydroponic system were built. One of the Hydroponics prototypes is automated with IoT while the other prototype only has automated the circulation of water with nutrients. When the Hydroponics systems were ready, a pilot crop was carried out which allowed the comparison of the vegetables and in this way to obtain the conclusions mentioned in this document.

Keywords: IoT, lettuce crop, Tungurahua, Hydroponic, Ecuador.

Índice de contenidos

1. Introducción	9
2. Contexto y Estado del arte	12
2.1. Contexto sobre la Hidroponía y su estado del arte	12
2.1.1. Elementos de un cultivo hidropónico.....	13
2.1.2. Estructuras de un sistema hidropónico	15
2.1.3. Parámetros relevantes para controlar el sistema de Hidroponía	18
2.1.4. Instrumentos y sensores para medir las variables relevantes en Hidroponía ...	20
2.2. Estado del arte de <i>IoT</i>	26
2.2.1. Arquitecturas IoT	27
2.2.2. El internet de las cosas (<i>IoT</i>) en la agricultura.....	27
2.2.3. Sistemas embebidos orientados al <i>IoT</i>	31
2.3. Contexto de Variedades de lechugas en Ecuador	33
2.4. Conclusiones del estado del arte	34
3. Descripción general de la contribución del TFM.....	36
3.1. Objetivos	36
3.1.1. Objetivo general	36
3.1.2. Objetivos específicos	36
3.2. Alcance	36
3.3. Limitaciones	36
3.4. Metodología del trabajo	37
4. Desarrollo de la solución del sistema hidropónico habilitado por <i>IoT</i> en Tungurahua, Ecuador	38
4.1. Germinación de semillas de lechuga <i>green salad bowl</i>	39

4.2. Diseño del sistema <i>NFT</i>	40
4.2.1. Condiciones para el funcionamiento del sistema hidropónico moderno	42
4.3. Arquitectura del sistema hidropónico moderno	42
4.3.1. Capa de sensores y procesamiento	43
4.3.2. Capa de comunicaciones	50
4.3.3. Capa de plataforma	51
4.3.4. Capa de aplicación	52
4.4. Trasplante de las plántulas al sistema hidropónico.....	52
4.5. Análisis de criterios para la comparación del producto en el sistema automatizado y tradicional	54
4.6. análisis de costes.....	60
4.6.1. Retorno de inversión	63
5. Conclusiones y trabajos futuros	64
6. Referencias	67
Anexo A. Código implementado en el dispositivo 1.....	76
Anexo B. Código implementado en el dispositivo 2	80
Anexo C. Formato en el que se almacenan los datos de las variables críticas	83
Anexo D. Fotografías del consumo de corriente en los diferentes estados del sistema hidropónico moderno.....	84

Índice de figuras

Figura 1. Sustrato de fibra de coco. Tomada de Hidrocultiva (s.f.)	14
Figura 2. Sustrato de perlita. Tomada de Hidrocultiva (s.f.)	14
Figura 3. Sustrato lana de roca. Tomada de Mercado libre (s.f.)	14
Figura 4. Sistema de mecha. <i>Adaptada de Sharma et al. (2019)</i>	15
Figura 5. Técnica de mecha o pabilo aplicado a una planta. Adaptado de Verdegen (2017) ..	16
Figura 6. Sistema de flujo y reflujo. Tomada de Verdegen (2017)	16
Figura 7. Sistema de raíz flotante. Tomada de Goho (s.f.)	17
Figura 8. Método NFT. Adaptada de Verdegen (2017)	17
Figura 9. Soluciones tampón. Tomado de Alibaba (s.f.)	21
Figura 10. Sensor para placa electrónica. Tomada de Shopee (s.f.)	21
Figura 11. Medidor de PH para laboratorio HQ440D. Tomada de Hach (s.f.)	22
Figura 12. Sensor de TDS. Tomada de ebay (s.f.)	22
Figura 13. TDS de bolsillo Tomada de BASTERRECHEA (s.f.)	22
Figura 14. Sensor DHT11. Tomado de Alibaba (s.f.)	23
Figura 15. Sensor DS18B20. Tomada de <i>Geek Factory</i> (s.f.)	23
Figura 16. Luxómetro. Tomada de Ecured (2019)	24
Figura 17. Sensor BH1750. Tomado de La Red de Electrónicas (s.f.)	24
Figura 18. Arduino connect rp2040. Tomada de Arduino (s.f.).....	31
Figura 19. Raspberry pi 4 modelo b. Adaptada de Raspberry (s.f.).....	32
Figura 20. Módulo ESP8266. Tomada de Hardzone (2019).	32
Figura 21. Frasco de semillas con portada de lechuga dancing. Tomada de Alabama (s.f.)	33
Figura 22. Lechuga romana. Tomada de Amazon (s.f.)	33
Figura 23. Lechuga seda. Tomada de Perushop (s.f.)	33
Figura 24. Lechuga crespa. Tomada de Serenidad ec (s.f.)	34

Figura 25. Lechuga <i>green salad bowl</i> . Tomada de Countrycottage seeds (s.f.).....	34
Figura 26. Cronograma de actividades.....	38
Figura 27. Semillas de lechuga <i>Green Salad Bowl</i> germinadas	40
Figura 28. Diseño del sistema NFT. Adaptado de Ruiz (2018).....	41
Figura 29. Estructura del sistema hidropónico.....	41
Figura 30. Arquitectura del sistema hidropónico moderno.....	43
Figura 31. Circuito esquemático.....	46
Figura 33. Circuito impreso.	47
Figura 34. Diagrama de flujo del primer dispositivo	48
Figura 35. Diagrama de flujo del segundo dispositivo	49
Figura 36. Configuración de la comunicación del dispositivo a la plataforma <i>Ubidots</i>	50
Figura 37. Panel de claves de acceso.....	51
Figura 38. Variables críticas asociadas en el cuadro de mando	51
Figura 39. Visualización de variables críticas en la aplicación móvil	52
Figura 40. Canasta para realizar el trasplante	53
Figura 41. Sistema hidropónico en funcionamiento en el día y la noche	53
Figura 42. Lechugas <i>Green salad bowl</i> listas para ser cosechadas.....	54
Figura 43. Peso y precio de lechugas hidropónicas en Ecuador.....	55
Figura 44. Proceso de toma del peso de las lechugas	55
Figura 45. Medición del largo de la hoja de lechuga	56
Figura 46. Forma correcta de medir el área foliar con una cámara. Adaptado de Rincón Guerrero et al. (2012)	58
Figura 47. Medición del área conocida de un objeto (triángulo rectángulo)	58
Figura 48. Medición del área de una hoja de lechuga	59

Índice de tablas

Tabla 1. Relación de variables críticas con instrumentos y sensores.....	25
Tabla 2. Relación de variables críticas con sensores	25
Tabla 3. Arquitecturas <i>IoT</i>	27
Tabla 4. Resumen de trabajos de inspiración orientados a la agricultura de precisión	30
Tabla 5. Análisis de entradas para el microcontrolador (salidas del sensor).....	44
Tabla 6. Análisis de salidas para el microcontrolador	45
Tabla 7. Arduino nano <i>IoT</i> contra ESP8266 NodeMCU (Amica)	45
Tabla 8. Peso de lechugas de sistema hidropónico tradicional contra sistema hidropónico moderno.	56
Tabla 9. Promedio de largo de hojas de lechuga del sistema hidropónico tradicional contra el sistema hidropónico moderno	57
Tabla 10. Resumen del promedio del área foliar de lechugas del sistema hidropónico tradicional contra el sistema hidropónico tradicional	59
Tabla 11. Cantidad de hojas de lechuga del sistema hidropónico tradicional contra el sistema hidropónico moderno.....	60
Tabla 12. Costes para la germinación de semillas.....	61
Tabla 13. Materiales para ensamblar el sistema hidropónico tradicional	61
Tabla 14. Materiales para automatizar el sistema hidropónico tradicional	62
Tabla 15. Consumo de energía eléctrica del sistema hidropónico moderno por día	63

1. Introducción

Los sistemas hidropónicos alcanzaron popularidad a partir de los años 50. Esto se debe a que las empresas vieron varias ventajas en las plantas cultivadas bajo este método, entre ellas se menciona: maximizar la superficie (mayor densidad de plantas), eliminar la maleza y por ende la competencia de absorción de nutrientes y disminuir el estrés hídrico (debido a disponibilidad permanente de agua) (Torres y Leris, 2020).

En Ecuador, el cultivo de hortalizas se realiza de manera tradicional a campo abierto. El 84,5% de la explotación agrícola está a cargo de la agricultura familiar campesina (AFC) y pequeños productores (Pertierra Lazo y Quispe Gonzabay, 2020). El sector agrícola era una de las principales fuentes de ingreso en el año de 1960 con un PIB (Producto interno bruto) del 33,65%. Desde el auge de la exportación petrolera en los años 70, el PIB correspondiente al sector agrícola registra un descenso, alcanzando un valor de 8,99% para el año 2019 (Banco Mundial, s.f.), debido a que el petróleo es una fuente no renovable el gobierno ha considerado volver a impulsar la agricultura, por esta razón ha tomado acciones como empezar a dignificar el trabajo en el campo y generar alternativas de empleo con el uso de la tecnología (Ministerio de Agricultura y Ganadería [MAG], 2019). Es aquí en donde la Hidroponía toma un papel muy relevante para el país. El autor del presente documento considera que los sistemas hidropónicos ayudarán a mejorar la explotación de hortalizas en la región y el uso asistido de la tecnología será un soporte para las familias campesinas que cuentan con escasos conocimientos técnicos de sistemas de cultivo no tradicional. Además, para Aguilera Peña (2020) la Hidroponía ofrece una oportunidad de negocio formando empresas pequeñas y medianas que son capaces de conquistar mercados exigentes.

Actualmente, existe un concepto llamado Agricultura de Precisión (AP) para Arley Orozco y Llano Ramírez (2015) la AP surge en Estados Unidos como consecuencia de una revisión anual de los efectos relacionados con la aplicación de insumos en función de necesidades específicas de los terrenos. Con el paso del tiempo se empezó a incorporar el uso de las TIC (Tecnologías de la Información y Comunicación) para mejorar el manejo de cultivos y suelos. La agricultura de precisión se define como un conjunto de procedimientos y métodos que tienen la finalidad de optimizar espacial y temporalmente el ciclo de vida de diferentes cultivos con el uso asistido de la tecnología (Arley Orozco y Llano Ramírez, 2015). Con estos antecedentes

expuestos, en el presente trabajo se propone realizar dos sistemas hidropónicos. El primero cuenta con la automatización solo de la circulación del agua con nutrientes, mientras que el segundo está habilitado por *IoT*, de aquí en adelante para diferenciar los sistemas se los denominará Hidroponía tradicional e Hidroponía moderna respectivamente.

La provincia de Tungurahua localizada en la sierra central del país es considerada como una de las más importantes en la producción de frutas y hortalizas, esto se debe a que cuenta con condiciones agroclimáticas que son idóneas para el crecimiento de las hortalizas (Moreno Miranda et al., 2018).

El presente trabajo se lleva a cabo en la ciudad de Baños de Agua santa, Tungurahua, Ecuador que cuenta con temperaturas promedio mínimo y máxima de 14,3 °C y 23,2°C respectivamente (Red Hidrometeorológica de Tungurahua, 2021).

Con el desarrollo de este proyecto se plantea una alternativa al cultivo hidropónico tradicional, asistiendo con tecnología para determinar si existe una diferencia considerable cultivando hortalizas en este caso lechuga *Green salad bowl* en un cultivo hidropónico moderno respecto a un cultivo hidropónico tradicional con las condiciones que ofrece el lugar de estudio. Así como también, descubrir si es rentable la inversión de automatización en la provincia que cuenta con buenas condiciones de crecimiento para las hortalizas y de esta manera generar un aporte para estudios agrícolas llevados en Ecuador y ofrecer nuevas tecnologías de cultivo para aumentar la producción de hortalizas que pueden tener condiciones para ser exportadas.

Es importante aclarar que en Ecuador la Hidroponía es un tema incipiente y pocas universidades y empresas privadas están dedicadas a la investigación de métodos hidropónicos para cultivar hortalizas (Moreno et al., 2019, p. 3). Motivo por el cual el autor considera que será un aporte importante para el país. Además, de acuerdo con el Ministerio de Agricultura y Ganadería [MAG] (2019), en Ecuador no existen registros agrícolas desde hace 20 años atrás, razón por la cual la agricultura tiene un retraso considerable respecto a otros países.

La motivación para realizar el presente proyecto es profundizar conocimientos relacionados con la tecnología y la agricultura para brindar mejores condiciones de trabajo a las familias agricultoras. La familia del autor del presente trabajo vive de la agricultura y ha sido testigo

de varias injusticias relacionados al pago por los productos cultivados en el suelo. Además, cree que de alguna manera el estudio de nuevas alternativas podría mejorar las condiciones económicas de sus familiares.

En esta sección se realiza un preámbulo de los siguientes capítulos a tratar.

La memoria tiene cuatro capítulos más que se conforman por: Contexto y estado del arte, Descripción general de la contribución del TFM, Desarrollo de la solución del sistema hidropónico habilitado por *IoT* en Tungurahua, Ecuador y finalmente Conclusiones.

En el segundo capítulo se repasa una breve historia de la Hidroponía, los tipos de cultivos que se pueden realizar con esta técnica, los diferentes sistemas hidropónicos que existen, la relación que tiene la agricultura con el internet de las cosas y casos de aplicaciones similares que sirven de referencia e inspiración.

En el tercer capítulo se presenta el objetivo general y tres objetivos específicos, los cuales están orientados a la creación de un prototipo de Hidroponía con soporte *IoT* para determinar si existe mejora del producto final en comparación con un sistema hidropónico tradicional en un lugar en donde las condiciones agroclimáticas favorecen al desarrollo de la hortaliza.

En el cuarto capítulo se muestra el procedimiento que se siguió para construir el sistema hidropónico, los elementos que se utilizaron, la arquitectura *IoT* que se siguió para implementar el sistema, los diagramas de flujo de los microcontroladores que intervienen. Así como también, se hace un análisis de costes en el sistema ya automatizado respecto al sistema hidropónico tradicional.

En el quinto y último capítulo se hace la discusión de resultados del producto final tomando en cuenta ciertos parámetros para medir la calidad de la hortaliza entre los dos sistemas mencionados. En este capítulo también se valida el cumplimiento de los objetivos planteados y se realiza un resumen de las aportaciones que el presente TFM propone para tecnificar la agricultura en Tungurahua, Ecuador.

2. Contexto y Estado del arte

2.1. Contexto sobre la Hidroponía y su estado del arte

La Hidroponía es una técnica de cultivo que consiste en aportar nutrientes a los cultivos a través de agua dotada con una solución nutritiva que se encuentra en circulación, este concepto tuvo sus orígenes en el siglo XIX consecuencia de investigaciones realizadas por el fisiólogo John Woodward acerca de la absorción de nutrientes por las plantas (López Elías, 2018). En 1920 el Dr. William Frederick fisiólogo de la universidad Berkeley de California realiza adaptaciones de técnicas de laboratorio para una producción comercial y sin el uso del suelo, desde entonces William Frederick es considerado el padre de la Hidroponía (López Elías, 2018).

Según Mafla Tapia (2015, p. 7), la Hidroponía tiene las siguientes ventajas:

- El control es más preciso en la nutrición de la planta.
- Maximiza el contacto de las raíces con la solución nutritiva, esto ocasiona que el crecimiento de los productos se acelere, permitiendo tener más cosechas en un año.
- Genera facilidad de cosecha de las plantas debido a que al ser un sistema vertical disminuye el tiempo que el agricultor debe estar agachado mientras recolecta las hortalizas.

También se dice que los sistemas hidropónicos consumen menor cantidad de agua que un cultivo en tierra, esto se debe a que el 80% de agua regada en el suelo se infiltra a las capas más internas de la tierra y otro porcentaje se evapora (Beltrano y Gimenez, 2015).

A estas ventajas se agrega otras más mencionadas por Sharma et al. (2018):

- El ciclo de vida de la lechuga hidropónica es muy corto en comparación con el ciclo de vida de un cultivo tradicional, la lechuga hidropónica puede cosecharse desde los 35 a 40 días después del trasplante de la plántula al sistema hidropónico
- El desperdicio de agua en el riego es reducido en un rango de 70% a 90%

Es importante mencionar que la Hidroponía es un cultivo libre de parásitos, bacterias, hongos y contaminación (Beltrano y Gimenez, 2015, p. 18), razón por la cual no se usa pesticidas para controlar plagas, permitiendo que el producto cosechado bajo el sistema hidropónico sea considerado como orgánico.

De acuerdo con Mafla Tapia (2015), la principal desventaja de la Hidroponía es la alta inversión inicial, debido a que, además del terreno o espacio físico se necesita invertir en el sistema de tuberías e infraestructura para que soporte el mismo.

En el año de 1936 Gericke y J.R. Travenniti realizan publicaciones acerca de experimentos de cultivos de tomate con soluciones nutritivas, este acontecimiento llamó la atención de agrónomos, científicos y empresas comerciales, desde ese momento se empezó a desarrollar unidades hidropónicas a gran escala, tendencia que se fue extendiendo por Estados Unidos, Europa, Israel, Japón, India, México (Beltrano y Gimenez, 2015).

La práctica de la Hidroponía se extendió por todo mundo a partir de 1950 y en la actualidad es uno de los sistemas más empleados en países del primer mundo. Los productos hidropónicos son aceptados en Europa por ser 100% orgánicos debido a que esta técnica no altera ni ataca el medio ambiente. Además, con este método se pueden cultivar plantas medicinales, flores comestibles, flores ornamentales, verduras, frutas, plantas aromáticas de excelente calidad y en espacios reducidos (Beltrano y Gimenez, 2015, p. 24).

2.1.1. Elementos de un cultivo hidropónico

Son tres los elementos principales de un cultivo hidropónico: las semillas, el sustrato y la solución nutritiva. La semilla se encuentra generalmente en el interior de un fruto, es considerada como parte de las plantas con flores. Bajo condiciones favorables puede dar origen a una nueva planta (Ecología verde, s.f.).

Las semillas utilizadas para el cultivo hidropónico son aquellas que cumplen con la característica de tener un desarrollo superficial (raíces pequeñas), citando algunos ejemplos: lechuga, melón, pepino, tomate, flores (Garbi y Puerta, 2021, p. 32).

El segundo elemento es el sustrato que puede ser orgánico o inorgánico, entre sus funciones está almacenar agua y nutrientes, así como también, servir de soporte para las plantas. Los sustratos más utilizados para los cultivos hidropónicos son: fibra de coco, perlita y lana de roca (Garbi y Puerta, 2021).

El sustrato fibra de coco es obtenido de la fruta de coco, la capa exterior de esta fruta es sometida a un tratamiento para separar las capas de su parte fibrosa. (Hidrocultiva, s.f.).

De acuerdo con Hidrocultiva, la retención de agua del sustrato de fibra de coco es de 3 a 4 veces su peso, antes de su uso debe ser lavada debido a la cantidad de sales que tiene la fruta.



Figura 1. Sustrato de fibra de coco. Tomada de Hidrocultiva (s.f.)

El sustrato de perlita es un material volcánico que se encuentra presente en la naturaleza con un aspecto vidrioso, entre sus propiedades está ser permeable al aire y tener la capacidad de retener agua, este sustrato es utilizado para germinar semillas debido a que facilita el trasplante de la plántula a contenedores finales de crecimiento (Hidroenviroment, s.f.).



Figura 2. Sustrato de perlita. Tomada de Hidrocultiva (s.f.).

El sustrato lana de roca es adquirido de roca volcánica entre sus características están retener el aire relativamente inmóvil en su interior, su estructura fibrosa permite la expansión de las raíces de la planta, este sustrato es utilizado tanto para germinar semillas, así como también para la etapa de crecimiento final, la porosidad que tiene favorece a la retención de agua y nutrientes necesarios para la planta. (Hidroenviroment, s.f.)



Figura 3. Sustrato lana de roca. Tomada de Mercado libre (s.f.)

El tercer elemento principal de un cultivo hidropónico es la solución nutritiva. Para De la Rosa Rodriguez et al. (2018) la solución nutritiva es una mezcla de agua con nutrientos en forma

iónica (cationes y aniones) en cantidades óptimas para que las plantas puedan absorberlos y de esta manera desarrollarse.

Según Lara Herrera (1999), los aspectos más relevantes en una solución nutritiva son: relación mutua entre los cationes, relación mutua entre los aniones y la concentración de los nutrientes (la concentración se expresa mediante conductividad eléctrica).

2.1.2. Estructuras de un sistema hidropónico

Las plantas después de germinar deben ser trasplantadas a contenedores finales de crecimiento que bien pueden ser: el suelo o sistemas de Hidroponía. Los sistemas de Hidroponía pueden ser personalizados de acuerdo a la forma de usar el agua, recirculación de nutrientes y medios de soporte (Sharma et al., 2018).

En esta sección se realiza una revisión de los sistemas de Hidroponía los cuales son: sistema de mecha o pabilo, sistema hidropónico de flujo y reflujo (“*Ebb and flow system*”), sistema hidropónico de raíz flotante y sistema de película nutritiva (*NFT*).

El sistema de mecha o pabilo es el más simple que existe, no requiere del uso de bombas eléctricas para transportar el agua con nutrientes. Para contrarrestar esto las plantas reciben la solución nutritiva mediante el uso de mechas o pabilos. (Sharma et al., 2018). Su principal desventaja es que solo puede ser usado con plantas que necesitan poca agua para crecer y su ventaja es que no necesita bombas de agua.

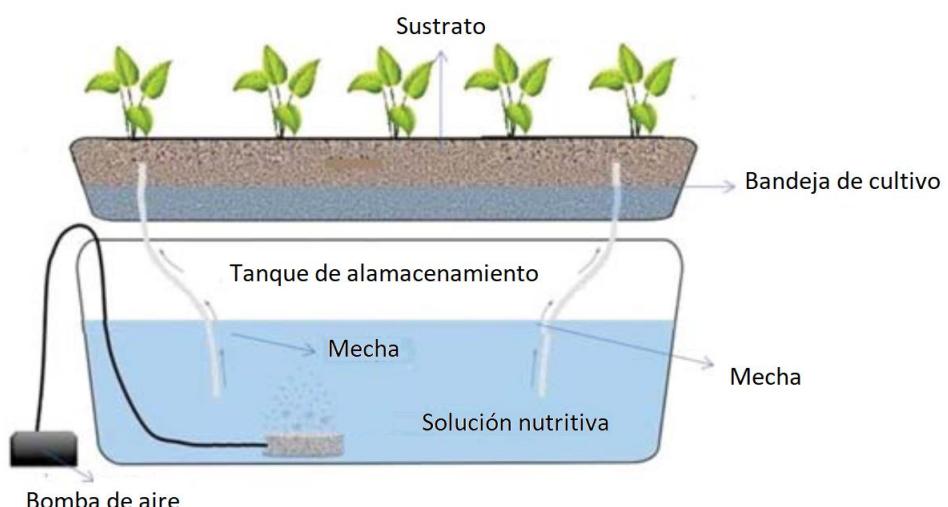


Figura 4. Sistema de mecha. *Adaptada de Sharma et al. (2019)*



Figura 5. Técnica de mecha o pabilo aplicado a una planta. Adaptado de Verdegen (2017)

En el sistema hidropónico de flujo y reflujo (*Ebb and flow system*) se envía un flujo de agua con nutrientes a través de una bomba de agua este proceso se realiza durante un tiempo determinado y luego el agua es drenada, el proceso de flujo y drenado es controlado por un temporizador (Sharma et al., 2018).

Una de las principales ventajas con este método es que se puede usar cualquier tipo de sustrato y su desventaja es que necesita de un buen control del temporizador, esto se debe a que, al drenar el agua nutritiva, la planta se queda suspendida en el aire, si el temporizador funciona mal podría producir la muerte de la hortaliza. (Verdegen, 2017).



Figura 6. Sistema de flujo y reflujo. Tomada de Verdegen (2017)

El sistema hidropónico de raíz flotante consiste en mantener las raíces sumergidas en una solución nutritiva, para que la planta logre este objetivo se colocan sobre una lámina o balsa que se encuentra flotando en la solución nutritiva, además es importante mantener el agua con una bomba de aire para que se oxigene la solución. La ventaja de este método es que es barato y es utilizado en salones de clase para explicar el tema de la Hidroponía. Sin embargo, su principal desventaja es que las plantas no se desarrollan adecuadamente (Verdegen, 2017).



Figura 7. Sistema de raíz flotante. Tomada de Goho (s.f.)

Finalmente, se tiene el sistema de película nutritiva (*NFT*), esta técnica viene de sus siglas en inglés “*Nutrient Field Technique*” que traducido al español significa técnica de una lámina de nutrientes, esta técnica consiste en transportar nutrientes a través del agua nutrida con los minerales que necesita la lechuga para crecer, las plantas son ubicadas en un tubo con una ligera inclinación de forma que una parte de las raíces se encuentren sumergidas en el agua con nutrientes y otra parte tenga contacto con el aire, este sistema es el más utilizado para la producción de lechuga (Sharma et al., 2018). Su principal ventaja es la inclinación que permite la fácil circulación del agua con nutrientes, las raíces de las plantas siempre se encuentran sumergidas en la solución y la circulación del agua cada cierto periodo de tiempo permite que la solución nutritiva se oxigene, finalmente esta técnica optimiza el uso de espacio físico debido a que se puede ubicar los tubos por niveles uno encima de otro (Cevallos Mendoza, 2020).

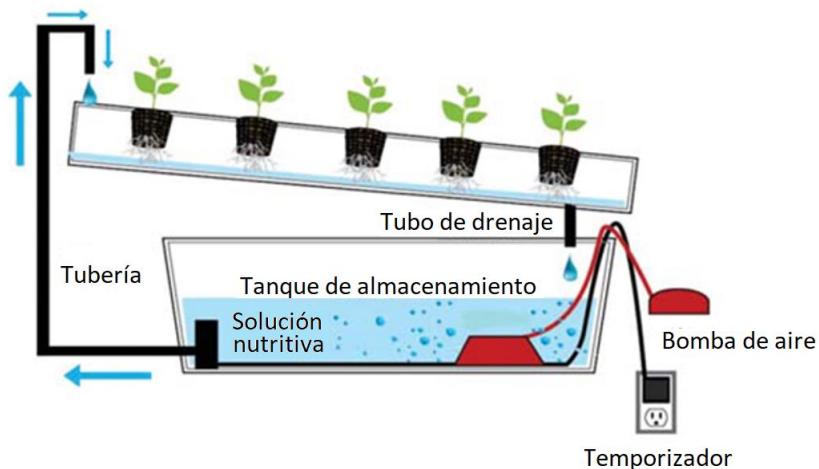


Figura 8. Método NFT. Adaptada de Verdegen (2017)

2.1.3. Parámetros relevantes para controlar el sistema de Hidroponía

En un sistema hidropónico es crítico tener seis variables controladas las cuales son: conductividad eléctrica de la solución nutritiva, PH de la solución nutritiva, iluminación, temperatura de la solución nutritiva, temperatura del ambiente y humedad relativa.

En esta sección se muestra la función que cumple cada variable y la razón de su importancia.

La conductividad eléctrica (CE) del agua nutritiva es usada para regular las condiciones de salinidad y a través de la CE controlar la salud de una planta u hortaliza (Euyong et al., 2018). Según Fraile Robayo et al. (2017) se recomienda mantener la CE en el rango de 1.5 a 3.0 mS/cm equivalente a 750 a 1500 ppm para casi todo tipo de hortalizas.

De acuerdo con Hidroenviroment (s.f.), la CE tiene relación con la absorción de los nutrientes para las plantas, es importante mantener esta variable en el rango anteriormente mencionado ya que una medida por abajo del rango presenta déficit de nutrientes y una medida arriba del rango resulta en valores fitotóxicos (valores tóxicos para la planta).

Existe otra unidad que se relaciona con la conductividad eléctrica, esta unidad es conocida como cantidad de sólidos disueltos en el agua (TDS), se mide en partes por millón (ppm) y se relaciona mediante un factor de conversión. Para aclarar este factor se propone el siguiente ejemplo: El límite máximo de conductividad eléctrica es 3.0 mS/cm, para pasar este valor a ppm, la unidad de CE debe ser transformada a microsiemens por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$) obteniendo el valor de 3000($\mu\text{S}/\text{cm}$). Ahora, este valor se divide para dos y como resultado tenemos 1500ppm. Por esta razón se puede encontrar especificaciones para saber si el agua es apropiada para el cultivo de una hortaliza en ppm o mS/cm (Chacón Chaquea, 2017).

La segunda variable importante es el nivel de PH en el agua con nutrientes, esta variable influye en la solubilidad de los iones, según Fertilab, el agua nutritiva con un valor de PH mayor a 7 puede generar condiciones de insolubilidad, ocasionando una mala nutrición en la planta y valores de PH menores a 5 pueden destruir micronutrientes de la solución nutritiva.

En concordancia con Fraile Robayo et al. (2017) el rango de valores de nivel de PH sugerido para lechugas es de 5.5 a 6.5.

Cuando el nivel de PH está en un rango de 5.0 a 6.5 es considerado ácido y esto indica que la solución tiene hierro y fósforo en grandes cantidades solubles, situación conveniente para las lechugas (Campocyl, 2016).

La tercera variable relevante para la Hidroponía es la iluminación aquí se destaca la cantidad de horas de exposición, la intensidad de luz y la longitud de onda. La iluminación es importante para la estimulación del desarrollo de la planta. Para Melgarejo et al. (2002) las plantas se pueden clasificar de acuerdo a la respuesta de su fotoperiodo teniendo así plantas de días cortos, largos e indiferentes.

Se considera plantas de días cortos a aquellas que se encuentran en la zona ecuatorial, tropical y subtropical, en donde se ha estimado la duración del día en el rango de 10 a 13 horas. Las plantas de días largos se localizan en latitudes extratropicales, en consecuencia de insuficiencia de temperatura la floración la realizan en los días de primavera y verano, se considera un día largo a aquel que tiene una duración de más de 14 horas (Melgarejo et al., 2002).

Finalmente, las plantas de fotoperiodo indiferente son las que se muestran insensibles a la duración de la iluminación.

De acuerdo con Hidroenviroment (s.f.) las lechugas pertenecen a la categoría de días largos y se sugiere una iluminación en el rango de 12.000lx a 30.000lx de luz natural.

Las frecuencias de onda de luz que necesitan las plantas están en el rango de 400nm a 700nm. Para Bures et al. (2018) las plantas captan principalmente la luz de color azul y de color rojo, también se menciona que existe una mejora en la eficiencia fotosintética con las longitudes de onda en el rango de 440nm y 660nm debido a que la luz en el rango mencionado estimula el crecimiento de la biomasa de la planta, un punto importante a resaltar es que los estudios se hicieron con una cantidad de luz de $(125 \frac{\mu mol}{m^2} \cdot s)$, es decir aproximadamente 7200 lx y se menciona como dato adicional que se puede observar una reducción en el ciclo de vida de una planta en cantidades de luz de $200 \frac{\mu mol}{m^2} \cdot s$ aproximadamente 11600 lx de luz artificial.

La luz artificial de crecimiento es aquella que se diseña con la finalidad de proveer iluminación en los rangos de onda que necesitan las plantas. Este tipo de luz es utilizada en lugares en donde existe poca iluminación o a su vez no existe la misma, otra razón para iluminar artificialmente es aumentar la duración del día (fotoperiodo de la planta).

La cuarta variable crítica es la temperatura de la solución nutritiva. Según Castañares (2020), esta variable tiene efecto en la disponibilidad de nutrientes, en el oxígeno disuelto en el agua con nutrientes y la actividad radical (crecimiento de las raíces). El rango de temperatura de la

solución nutritiva recomendado es de (20-25) °C. La temperatura puede variar ligeramente entre el límite superior e inferior pero no debe haber una variación muy drástica. Las temperaturas bajas pueden producir estrés en las raíces de las plantas y precipitación de sales impidiendo la absorción de nutrientes además de evitar el crecimiento de las plantas.

La quinta variable crítica es la temperatura del medio ambiente. Para Flores et al. (2020) la temperatura del ambiente influye en el desarrollo de las plantas cuando la temperatura de la planta desciende de los 10°C las especies hortícolas sufren daños por frío y su desarrollo se detiene. Además, si la temperatura llega ser 0°C puede producir la muerte del cultivo por congelamiento.

La última variable crítica es la humedad relativa, para Quispe Tinta (2018) los valores de humedad recomendados para la lechuga están en el rango de 60% a 80%, para valores humedad por encima del límite superior existe la posibilidad que se desarrollen enfermedades en la planta. Por otro lado, el crecimiento de la lechuga se limita en caso de que exista valores menores del rango mencionado.

2.1.4. Instrumentos y sensores para medir las variables relevantes en Hidroponía

Para saber si el rango de las variables está en los valores sugeridos, se necesita de instrumentos o sensores que ayuden a proveer un dato, el cual es procesado para que la información sea entendible para las personas.

En esta sección se hace un recorrido por los dispositivos usados para obtener esos datos y se hace una breve explicación de cómo funcionan los instrumentos o sensores.

El primer instrumento a revisar es el medidor de PH que sirve para medir si una sustancia es ácida o alcalina en base a la actividad del ion hidrógeno. Para medir esta actividad se utilizan dos electrodos, uno de PH y otro de referencia que se encuentran internamente en el medidor. Esta actividad genera una diferencia de potencial que está relacionada con la acidez, a mayor acides mayor actividad de los iones.

La técnica para crear los electrodos se ha mantenido durante los últimos 60 años en la cual se sopla el vidrio hasta tener las características deseadas en el vidrio en conjunto con químicos que son utilizados para tener una referencia del comportamiento del hidrógeno y de esta manera poder medir el PH (Cingada, 2004).

Con el tiempo de uso del medidor de PH los electrodos se van desgastando produciendo valores de medida erróneos, pero se pueden ir calibrando mientras aún tengan tiempo de vida útil. Para calibrar estos instrumentos se utiliza unos químicos llamados tampones. Los tampones son soluciones con un valor constante de PH y resistentes al cambio de temperatura. Estas soluciones también se utilizan cuando el instrumento es nuevo y se desea comprobar que esté bien calibrado. En la figura 9 se observa los sobres que son más comunes comercialmente utilizados para calibrar un medidor de PH.



Figura 9. Soluciones tampón. Tomado de Alibaba (s.f.)

Otra opción para medir la variable PH son los sensores en este caso se presenta al Sensor PH-E201-C: este dispositivo es uno de los más comerciales dispone de un conector BNC y una placa electrónica con una comunicación i2C para transmitir la información de las lecturas realizadas.



Figura 10. Sensor para placa electrónica. Tomada de Shopee (s.f.)

Cuando se requiere una medida más exacta del PH se puede recurrir a un instrumento de laboratorio en la figura 11 se presenta al medidor de PH HQ440D este medidor es un

dispositivo electrónico que cuentan con un electrodo para la medición del PH y una pantalla, también existen versiones portátiles.



Figura 11. Medidor de PH para laboratorio HQ440D. Tomada de Hach (s.f.)

La segunda clase de instrumentos que se revisa son los medidores de conductividad eléctrica. Al igual que los medidores de PH existen sensores e instrumentos de medición para la CE. En la figura 12 se muestra un sensor de TDS que sirve para medir la conductividad eléctrica y total de sólidos disueltos en el agua.



Figura 12. Sensor de TDS. Tomada de ebay (s.f.)

También existen medidores portátiles para realizar medidas manuales como el medidor TDS HI98301 mostrado en la figura 13. Este medidor entrega conductividad eléctrica y cantidad de sólidos disueltos.



Figura 13. TDS de bolsillo Tomada de BASTERRECHEA (s.f.)

El tercer tipo de instrumentos o sensores que se muestra en el presente trabajo es el medidor de temperatura y humedad relativa. En la figura 14 se muestra el sensor DHT11: Estos

sensores tienen una salida digital (*single bus*) que es usada para enviar información de temperatura y humedad relativa, este tipo de dispositivo es considerado de bajo costo.

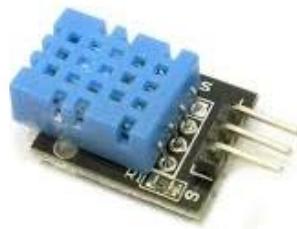


Figura 14. Sensor DHT11. Tomado de Alibaba (s.f.)

Existen varios sensores de temperatura entre ellos se tiene los siguientes: LM35, PT100, sensores infrarrojos y DS18B20 (para medios acuosos) cada uno tiene un principio físico diferente. En la figura 15 se puede apreciar el sensor DS18B20 generalmente usado para medir la temperatura del agua nutrida. El sensor cuenta con un protocolo de comunicación *one-wire*, internamente tiene un circuito de 12 bits para muestrear la información y luego ser enviada a través del protocolo mencionado. Además, el dispositivo tiene un rango de medición de -55°C a 125°C. Adicionalmente, el dispositivo tiene un encapsulado que permite introducirlo en el agua.



Figura 15. Sensor DS18B20. Tomada de *Geek Factory* (s.f.)

El cuarto tipo de instrumentos son los medidores de cantidad de luz. En la figura 16 se muestra un luxómetro. Este instrumento ayuda a medir de forma rápida y simple la luminosidad real. El dispositivo cuenta con una célula fotoeléctrica que reacciona a la luz y la convierte en pulsos eléctricos. La iluminancia es la cantidad de luz que llega a un espacio por unidad de área, la unidad de medida es el lux que es equivalente a un lumen por metro cuadrado (Materiales laboratorio, 2021).



Figura 16. Luxómetro. Tomada de Ecured (2019)

Al igual que las otras variables, la cantidad de luz también puede ser medida con un sensor.

En la figura 17 se muestra el sensor digital de luz BH1750 mide el flujo luminoso en LUX. El dispositivo electrónico tiene internamente un conversor de 16bits la información es transmitida a través de protocolo i2C tiene un rango de medición de 1 a 65535 lux.



Figura 17. Sensor BH1750. Tomado de La Red de Electrónicas (s.f.)

Para finalizar esta sección se muestra dos tablas: La tabla 1 relaciona las variables críticas de PH, conductividad eléctrica e iluminación con los instrumentos y sensores que miden estos parámetros y la tabla 2 relaciona los sensores que miden las variables críticas restantes mencionados en esta sección.

Tabla 1. Relación de variables críticas con instrumentos y sensores

Variable	Instrumento	Sensor
PH	 Medidor de PH para laboratorio HQ440D	 Sensor PH-E201-C
Conductividad eléctrica	 Medidor TDS HI98301	 Sensor de TDS
Iluminación	 Luxómetro	 Sensor BH1750

Tabla 2. Relación de variables críticas con sensores

Variable	Sensor
Temperatura y humedad relativa	 Sensor DHT11
Temperatura del agua nutritiva	 Sensor DS18b20

2.2. ESTADO DEL ARTE DE *IoT*

La definición general de *IoT* es tener varios dispositivos (cosas) conectados a una red de trabajo (Musa et al., 2019), con el objetivo de interconectarlos y compartir información. El uso del internet de las cosas ayuda a la reducción de cotes en procesos de producción, reducción de tiempo de desarrollo de un producto y permite conocer la demanda del consumidor de una manera más efectiva (De Silva, 2016).

Para gestionar los datos compartidos por los dispositivos es necesario hacer uso de una plataforma *IoT*, en términos generales una plataforma *IoT* es la encargada de recoger la información enviada por sensores inteligentes, así como también almacenar y/o analizar la información. Finalmente, la información debe ser representada de forma que el usuario pueda hacer uso de esta (Martinez Jacobson, 2017). A continuación, se muestra cuatro plataformas *IoT* de propósito general las cuales son: *AWS*, *IBM Watson*, *Ubidots* y *Google cloud*.

“*Amazon Web services*” es una plataforma muy completa en la nube que cuenta con más de 200 servicios integrales de centros de datos, esta plataforma ofrece los servicios a grandes organismos gubernamentales promoviendo la innovación, la reducción de costos y el incremento en la agilidad de innovación (Aws, s.f.).

La plataforma *IBM Watson* está diseñada con algoritmos de inteligencia artificial para predecir eventos con los datos administrados a la plataforma, ofrece respuesta rápida de procesamiento de datos, esta plataforma está orientada para negocios inteligentes (*BI*) (IBM, n.d.).

La plataforma *Ubidots* está especializada en el monitoreo y control de un proceso de forma automática, esta plataforma cuenta con más de 60.000 estudiantes creadores e investigadores. Para promover la investigación *Ubidots* ofrece el enlace de tres dispositivos inteligentes totalmente gratis con un límite de publicaciones diarias (Ubidots, s.f.).

Ubidots para extender sus servicios, también ofrece una aplicación móvil en la cual se puede observar una interfaz gráfica que permite visualizar los datos monitoreados por dispositivos *IoT* (Bakar et al., 2019).

Google cloud es una plataforma que permite la gestión de datos y ofrece varios servicios como inteligencia artificial, monitoreo de datos entre otros más. Esta plataforma está dedicada a empresas que se encuentran en la etapa de transición hacia la transformación digital

ofreciendo desarrollo de aplicaciones en menor tiempo y toma de decisiones empresariales más acertadas. (Google, s.f.).

2.2.1. Arquitecturas *IoT*

Para Saldarriaga Quiroz (2020) las arquitecturas *IoT* más comunes son cuatro: arquitectura de tres capas, cuatro capas, cinco capas *ITU e IoT*, *WSN* en conjunto con *machine learning*, estas capas se detallan en la tabla 3.

Tabla 3. Arquitecturas *IoT*

Arquitectura	Descripción
Tres capas	Capa 1: sensores inalámbricos, capa 2: redes de comunicaciones, capa 3: monitoreo de datos y central de análisis.
Cuatro capas	Capa 1: Capa de Sensores, capa 2: Capa de comunicaciones, capa 3: capa de servicios de administración, y, por último, capa 4: Capa de aplicación.
Cinco capas <i>ITU</i>	Capa 1: capa de sensores, capa 2: capa de acceso, capa 3: capa de red, capa 4: capa de mediación y capa 5: capa de aplicación.
<i>IoT</i> , <i>WSN</i> y Machine Learning	Arquitectura de red inalámbrica <i>WSN</i> (Wireless Sensor Network) usando dispositivos <i>Xbee</i> fabricados por la compañía <i>DIGI</i> . En esta solución se maneja una capa sensores inalámbricos que funcionan bajo el estándar 802.15.4. y/o <i>Zigbee</i> y una capa de servidores donde se realiza la analítica de datos emitiéndose alarmas a condiciones programadas.

Tomada de Saldarriaga Quiroz (2020)

2.2.2. El internet de las cosas (*IoT*) en la agricultura

En la actualidad existen empresas agrícolas que procesan una gran cantidad de datos tomados del suelo y de las propiedades de los cultivos. La recopilación de datos se realiza mediante sensores que se encargan de medir la heterogeneidad de un campo (Quiroga Montoya et al., 2016).

En concordancia con Anaya Isaza et al. (2017) el *IoT* puede ser aplicado en la agricultura creando la llamada agricultura de precisión, que consiste en aplicar herramientas tecnológicas

en conjunto con sensores y plataformas *cloud* administrando así las variables que son importantes en el desarrollo de los cultivos.

En esta sección se presentan cuatro proyectos de automatización de Hidroponía y dos proyectos orientados al estudio de la calidad de Hortalizas. Estos trabajos sirven de referencia y fuente de inspiración para el presente proyecto.

El primer proyecto se trata de un “Diseño de *IoT* para monitoreo de condiciones óptimas de un cultivo hidropónico con soporte *IoT* de flores de invernadero”. Para Briceño Jején y Cibides Porras (2020) el control de las variables críticas de crecimiento de las flores es muy importante para generar rosas con calidad de exportación. Además, se menciona que para Colombia es importante la exportación de rosas ya que esta actividad genera ingresos importantes para el país. En este proyecto se automatizó un invernadero mediante la técnica de Raíz flotante obteniendo un entorno totalmente controlado para el crecimiento de flores.

El segundo proyecto se trata de una “Propuesta de sistema de gestión inteligente basado en *IoT* para Hidroponía”. Para Gutierrez Leon et al. (2019) la agricultura en México es la tercera actividad económica del país, razón por la cual proponen un sistema de Hidroponía que es capaz de recolectar información de todo el proceso de crecimiento de un cultivo. El trabajo está enfocado en crear un sistema de bajo costo modular y semi-comercial. Adicionalmente, el enfoque de la recolección de información se realiza con miras a que, en un futuro los datos sean procesados en tiempo real con métodos de inteligencia artificial.

El tercer proyecto es un “Diseño de una arquitectura *IoT* para el control de sistemas hidropónicos”. Para Hinojosa Pinto (2019) la alimentación es un factor importante en la salud de una persona por esa razón ha propuesto un sistema hidropónico orientado para el hogar. El sistema de Hidroponía monitoriza los datos con la ayuda de una aplicación web desarrollada desde cero y se destaca que el proyecto es de bajo coste en comparación con otros sistemas comerciales.

El cuarto trabajo es un “Diseño y Construcción de un Sistema hidropónico con *IoT* adaptable a acuaponía.”. Para Ávila Guzmán (2018) el control de las variables críticas de un cultivo hidropónico es muy importante para la calidad del producto. Así también, manifiesta que la Hidroponía combinada con la piscicultura genera una nueva técnica llamada Acuaponía, la cual consiste en hacer circular nutrientes orgánicos generados por los desechos de peces que

se encuentran en un estanque con conexión al estanque de la Hidroponía. Finalmente, en el proyecto se analiza la calidad del producto con variables como: cantidad de hojas de lechuga, área foliar y la última variable que el autor analizó fue determinar si la planta se encontraba erguida.

El quinto trabajo es “Evaluación del cultivo de lechuga hidropónica (*Lactuca sativa* L.) en raíz flotante bajo diferentes soluciones nutritivas”. En concordancia con Ricardo Morales (2019), los factores importantes para determinar la calidad de una hortaliza son: el largo de las hojas de la planta, el área foliar, la cantidad de hojas, el peso de la hortaliza con raíz, el peso de la hortaliza sin raíz y la biomasa de la planta. En este trabajo se determinó la mejor solución nutritiva para las lechugas analizando los factores que determinan la calidad de la hortaliza. Para determinar la biomasa de la planta en el trabajo se sugiere deshidratar la lechuga con un horno a altas temperaturas y después obtener la relación del peso de la hortaliza respecto al peso de la hortaliza deshidratada. Una vez que los datos son procesados, se determina una mejor fórmula para una solución nutritiva.

El sexto y último trabajo tiene como título “Determinación del Área Foliar en Fotografías Tomadas con una Cámara Web, un Teléfono Celular o una Cámara Semiprofesional”. Para Rincón Guerrero et al. (2012) la determinación del área foliar se realiza con instrumentos de laboratorio. Sin embargo, la adquisición de este tipo de instrumentos es complicada debido al alto costo que representa, por esa razón en su trabajo ha propuesto realizar la medición del área foliar con dispositivos de bajo costo y fácil acceso como cámaras web o teléfonos inteligentes. Después de un estudio y comparación con equipos de laboratorio concluye que el área foliar obtenido con el análisis de una imagen de un teléfono inteligente o cámara web es muy similar al área obtenido con un instrumento de laboratorio de alta precisión.

En la tabla 4 se muestra un resumen de los proyectos relacionados con la agricultura de precisión respecto a: la importancia de la automatización, estructura del sistema de Hidroponía y Arquitectura *IoT* implementada.

Tabla 4. Resumen de trabajos de inspiración orientados a la agricultura de precisión

Título	Descripción	Estructura del sistema de Hidroponía	Arquitectura IoT
Diseño de una solución IoT para monitoreo de las condiciones óptimas de un cultivo hidropónico de flores en invernadero	Se destaca la importancia del mercado de las flores y las condiciones de las variables críticas que se deben mantener para que las flores se desarrollen.	Se utiliza una estructura de raíz flotante para aprovechar el espacio en donde crecen las flores.	De acuerdo con el autor, se utiliza una arquitectura de cuatro capas las cuales son: física, comunicación, servicios, aplicación.
Propuesta de sistema de gestión inteligente basado en IoT para Hidroponía	<p>Se destaca la importancia de mantener los datos monitoreados y la visualización de los mismos.</p> <p>Se hace énfasis en el procesamiento en tiempo real</p>	No especificado	<p>De acuerdo con el autor, se utiliza una arquitectura de cuatro capas.</p> <p>Las capas mencionadas son: capa de percepción, capa de red, capa de procesamiento de datos y capa de aplicación</p>
Diseño de una arquitectura IoT para el control de sistemas hidropónicos	Se hace énfasis en la importancia que han dado las empresas a los sistemas de Hidroponía.	La estructura utilizada es NFT, se menciona que es una de las arquitecturas más populares en las hortalizas	No especificada
Diseño y Construcción de un Sistema hidropónico con IoT adaptable a acuaponía.	Se hace referencia a un sistema de Hidroponía adaptable para la acuaponía (una extensión de la Hidroponía). Se menciona las ventajas del sistema <i>NFT</i> tales como: menor peso respecto a otras estructuras, por ejemplo: raíz flotante. Transporta menor cantidad de agua (suficiente para las hortalizas) y oxigena el agua solo por el movimiento de la misma (un efecto de la constante circulación)	En la propuesta de diseño el autor trabaja con un sistema NFT	No especificada

2.2.3. Sistemas embebidos orientados al *IoT*

Los sistemas embebidos tienen un rol importante en el internet de las cosas, estos son los encargados de recolectar la información entregada por los sensores y a su vez enviar los datos a las plataformas *cloud* para su respectivo análisis. A continuación, se menciona tres sistemas embebidos más comunes en el mercado y de bajo costo los cuales son: Arduino, Raspberry y ESP8266.

Arduino es una plataforma electrónica de código abierto basado hardware y software, fue desarrollada con la finalidad de que sea de fácil uso, las tarjetas de esta empresa son capaces de leer un sinnúmero de señales. En los últimos años Arduino ha sido el cerebro de miles de proyectos y una herramienta usada por científicos para el desarrollo de sus investigaciones (Arduino, 2021).

Arduino nació en “Ivrea Interaction Design Institute” como una herramienta de fácil prototipado, y se ha mantenido en constante evolución y adaptación acorde a las nuevas necesidades y retos del mundo, la versatilidad de estas tarjetas ha permitido su uso en aplicaciones *IoT*, *wearables* (prendas de vestir con tecnología por ejemplo un reloj inteligente), impresión 3D y ambientes que usan sistemas embebidos (Arduino, 2021). En la figura 18 se muestra uno de sus últimos diseños orientado al *IoT*, la placa *Arduino connect rp2040* que usa un microcontrolador desarrollado por otra popular empresa en el ámbito de sistemas embebidos llamada Raspberry.

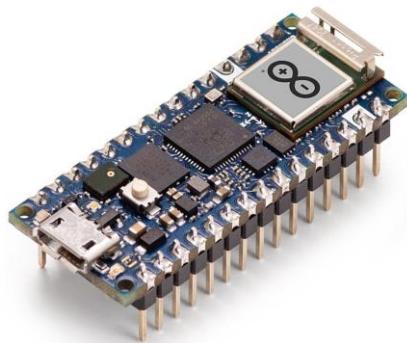


Figura 18. Arduino connect rp2040. Tomada de Arduino (s.f.)

El segundo dispositivo considerado de bajo coste es la Raspberry Pi. Raspberry es una Fundación benéfica con sede en Reino Unido, su principal objetivo es poner al alcance de todo

el mundo la tecnología computacional y digital para poder resolver problemas de una forma creativa (Raspberry, s.f.).

Raspberry ofrece tanto software como hardware, entre sus últimos diseños se destaca en la figura 19 la tarjeta Raspberry Pi 4 modelo b, es un ordenador de bajo costo con buenas características de funcionamiento, en consideración a su rendimiento y costo.

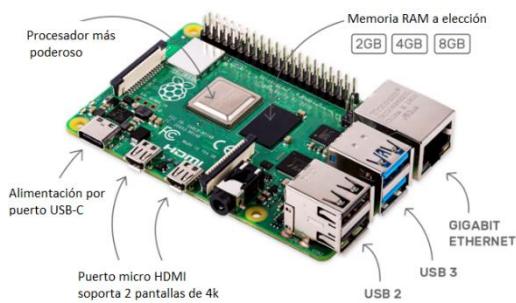


Figura 19. Raspberry pi 4 modelo b. Adaptada de Raspberry (s.f.)

Estos ordenadores son utilizados para desarrollo de proyectos de visión artificial, robótica, *IoT* y proyectos de ambiente embebidos debido a la versatilidad del ordenador, permitiendo instalar una variedad de sistemas operativos entre ellos: Windows, Linux, Raspbian, ROS facilitando el desarrollo de prototipos con fines de investigación (Raspberry, s.f.).

El tercer dispositivo de bajo costo es la tarjeta ESP8266. De acuerdo con Ceja et al. (2017), esta tarjeta fue desarrollada por la empresa Espressif Systems localizada en Shanghai, China, en el 2014 se mencionó que este chip sería una excelente solución autómata que utiliza tecnología wifi razón por la cual varias empresas construyen circuitos impresos para adaptar el chip en forma de módulo como se aprecia en la figura 20 y de esta manera hacer más sencillo su uso.



Figura 20. Módulo ESP8266. Tomada de Hardzone (2019).

2.3. CONTEXTO DE VARIEDADES DE LECHUGAS EN ECUADOR

De acuerdo con Cajo Curay (2016) en Ecuador se cultiva las siguientes variedades de lechuga:

- **Dancing:** Es una lechuga utilizada para decoración de características rizada y pequeña sus hojas son las más resistentes.



Figura 21. Frasco de semillas con portada de lechuga dancing. Tomada de Alabama (s.f.)

- **Romana:** Las hojas de esta variedad son grandes alargadas y sin repollo son usadas en decoración de platos especiales tienen un color verde intenso y soportan una gran manipulación.



Figura 22. Lechuga romana. Tomada de Amazon (s.f.)

- **Seda:** es una variedad pequeña y delicada con una coloración verde y amarilla



Figura 23. Lechuga seda. Tomada de Perushop (s.f.)

- **Crespa:** es de color verde claro con hojas encrespadas grandes, el ciclo de vida de esta lechuga es de 86 días



Figura 24. Lechuga crespa. Tomada de Serenidad ec (s.f.)

- *Green Salad Bowl*: es una lechuga parecida a la crespa compacta con una altura de 20 a 25 cm, tiene un ciclo de vida de 90 días germinan a una temperatura de 18-20 °C el Ph sugerido para esta lechuga es de 5.2 a 5.8.



Figura 25. Lechuga *green salad bowl*. Tomada de Countrycottageseeds (s.f.)

2.4. CONCLUSIONES DEL ESTADO DEL ARTE

La Hidroponía es una técnica antigua. Sin embargo, se popularizó en los años 50 cuando se demostró los grandes beneficios que tenía respecto a un proceso de cosecha en suelo. Entre los beneficios se destaca que la técnica es amigable con el medio ambiente debido a que no se desperdicia agua en comparación con el cultivo en el suelo. También, se hace énfasis en la calidad del producto debido a que se considera orgánico, este hecho es bastante acogido por las personas en la actualidad, ya que actualmente existe una tendencia de la gente por alimentarse más sano. De acuerdo con la revisión del estado del arte, el proceso de siembra y cosecha se acelera permitiendo tener más cosechas en un año y con productos de buena calidad con condiciones de exportación.

En la Hidroponía existen varias técnicas, cada técnica tiene ventajas y desventajas que obligan a un agricultor a utilizar el método que más se adapte a sus necesidades en relación con el espacio físico, precio de inversión inicial o a las hortalizas que se quiera cosechar.

En la revisión del estado del arte también se observó que existen varios instrumentos que se pueden utilizar para medir los parámetros críticos de la Hidroponía y cada instrumento se puede escoger de acuerdo con el precio, precisión de datos o tipo de trabajo que se realice. Por ejemplo, trabajo de investigación (instrumentos de laboratorio) o trabajo de siembra y cosecha para consumo local y exportación (instrumentos portátiles y de buena resolución). También se observó que existen sensores que pueden ser utilizados para adquirir datos de las variables críticas de Hidroponía y los sensores que existen en el mercado son de bajo coste y buena resolución.

Se pudo apreciar que existe una técnica llamada Agricultura de precisión que consiste en aplicar métodos de las TICs en la agricultura con el fin de tecnificar el proceso de siembra y cosecha de las plantas. En la agricultura de precisión también se hace uso de dispositivos inteligentes para recolectar datos procesarlos y obtener información de un cultivo. Para la recolección de datos y visualización de los mismos es común usar plataformas *IoT* que ofrecen servicios de visualización de información y de acuerdo a la exigencia del agricultor puede hacer uso de módulos de análisis de datos con inteligencia artificial.

Además, se observó que existen dispositivos inteligentes de bajo coste ofrecidos por varias empresas, cada dispositivo inteligente tiene sus características y para ser elegido por los agricultores dependerá de las características que deseen dar a su cultivo o del dinero que deseen invertir para tecnificar la siembra y cosecha de las hortalizas.

Para finalizar, se puede concluir que en Ecuador existe una gran variedad de lechugas que se cultivan bajo un proceso de siembra tradicional en el suelo y que el tema de la Hidroponía es incipiente. Sin embargo, existen pocas empresas y universidades que aprovechan las ventajas que ofrecen los sistemas hidropónicos.

3. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA CONTRIBUCIÓN DEL TFM

3.1. Objetivos

3.1.1. Objetivo general

Construir un prototipo de cultivo con soporte de arquitectura *IoT* para determinar si existe una mejora considerable en el producto final Lechuga *green salad bowl* con un sistema hidropónico automatizado respecto a un sistema hidropónico tradicional en un sector en donde las condiciones agroclimáticas son favorables para el crecimiento de la lechuga.

3.1.2. Objetivos específicos

- Medir los parámetros de calidad de la hortaliza para determinar la mejora de producción en las lechugas *Green salad bowl* en el sistema hidropónico moderno respecto al sistema hidropónico tradicional.
- Estimar el precio de inversión inicial para trasladar un sistema de Hidroponía tradicional a uno moderno
- Determinar la rentabilidad del sistema hidropónico moderno con relación al sistema hidropónico tradicional.

3.2. Alcance

El presente trabajo tiene la finalidad de desarrollar un prototipo de sistema hidropónico habilitado por *IoT* en Tungurahua, Ecuador para comparar la calidad del producto final entre un sistema hidropónico automatizado y un sistema hidropónico tradicional.

El prototipo de Hidroponía tradicional tendrá automatizado solo la recirculación del agua con la sustancia nutrita, mientras que, el sistema hidropónico moderno dispondrá de sensores de: temperatura del medio ambiente, humedad relativa, cantidad de luz, nivel de PH, cantidad de sólidos disueltos (TDS) y temperatura del agua con nutrientes.

3.3. Limitaciones

Para el desarrollo del presente proyecto se tiene las siguientes limitaciones: la primera, el tiempo, debido a que el proceso de crecimiento de la hortaliza es en promedio de 70 días solo se puede realizar una cosecha esto limita el uso de la información recopilada para realizar un

análisis más profundo. Sin embargo, la información generada se almacenará para futuras investigaciones.

La segunda limitación es que existe un déficit económico debido a que para solventar la limitación anterior se podría construir más prototipos y de esta manera generar repetibilidad en las pruebas de estudio.

La tercera limitación concierne al estudio de los datos para determinar la calidad de la hortaliza. Lo más idóneo de acuerdo con el estado del arte es obtener los siguientes datos de la hortaliza: largo de la hoja, peso de la hortaliza con raíz, peso de la hortaliza sin raíz, área foliar y biomasa de la planta. Sin embargo, para obtener la biomasa de la planta se necesita de hornos de laboratorio para deshidratar la planta. El horno de laboratorio está fuera de alcance para el autor del presente trabajo, motivo por el cual esta variable queda fuera del estudio.

La cuarta y última limitación es el cálculo de retorno de inversión. El retorno de inversión está limitado a calcular el tiempo que se demora en recuperar el valor de la inversión de la construcción del sistema hidropónico moderno sin considerar obreros debido a que los egresos que puede generar un obrero varían de acuerdo con los tipos de contratos que existen en Ecuador, el área de trabajo que disponen para realizar sus actividades y el valor por hora que esté dispuesto a pagar un gerente de acuerdo con lo que le faculte la ley. Todos estos datos varían de acuerdo a la cantidad de producción de hortalizas.

3.4. METODOLOGÍA DEL TRABAJO

EL proyecto se divide en las siguientes etapas.

- Documentación: en esta etapa se realiza una búsqueda previa para profundizar el tema de la Hidroponía en conjunto con los microcontroladores, sensores y actuadores más usados.
- Una vez identificado los materiales que se necesitan para el proyecto se procede a la adquisición de los materiales para el cultivo además de los sensores y actuadores con las características que se encontró en la etapa anterior.
- Germinación de las semillas de lechuga.
- Diseño del sistema hidropónico

- Diseño de arquitectura *IoT*, implementación de la infraestructura y programación de dispositivos inteligentes.
- Trasplante de las plántulas germinadas al sistema hidropónico y monitoreo
- Discusión de los resultados y conclusiones

En la figura 26 se puede apreciar el cronograma para el desarrollo del presente proyecto.

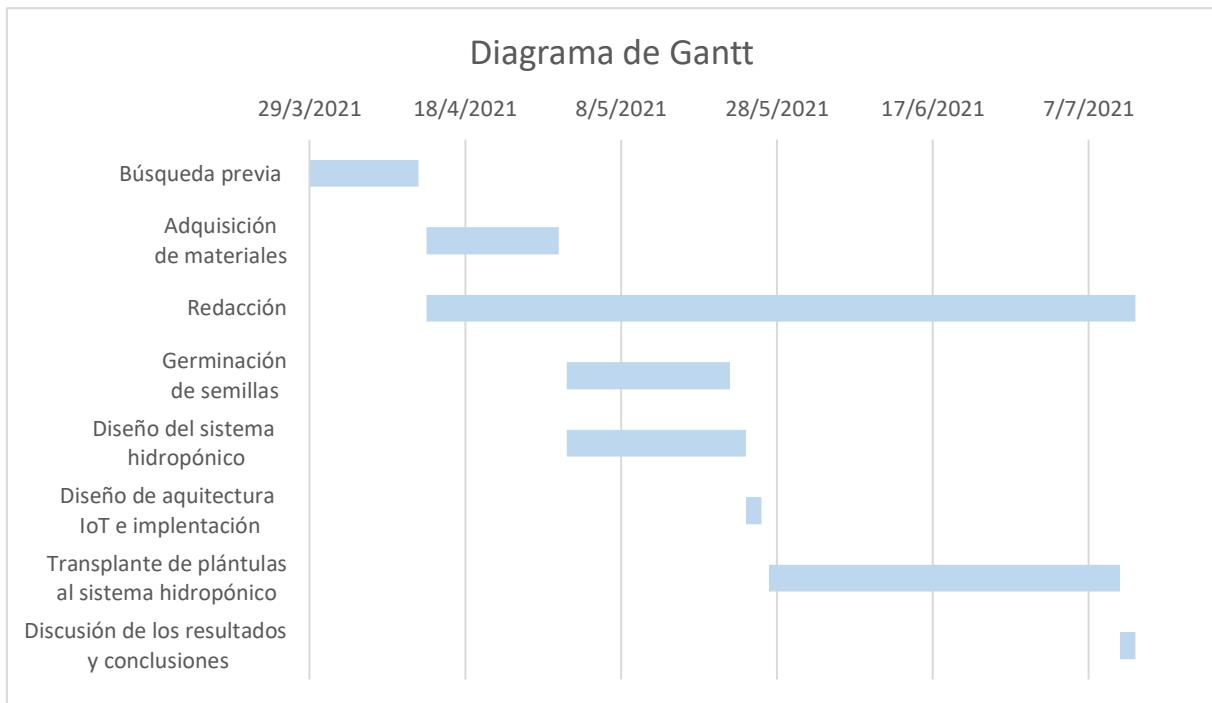


Figura 26. Cronograma de actividades.

4. DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN DEL SISTEMA HIDROPÓNICO HABILITADO POR *IoT* EN TUNHURAHUA, ECUADOR

Una vez concluido la revisión del estado de arte, se determina que existen criterios para construir un sistema de Hidroponía, en este capítulo se detalla el desarrollo de la solución empezando por la germinación de semillas de lechuga y fabricación de la estructura hidropónica, seguidamente se implementa una arquitectura para la solución *IoT*, se muestra el desarrollo del hardware y firmware con sus respectivos diagramas y finalmente se realiza la discusión de resultados.

4.1. GERMINACIÓN DE SEMILLAS DE LECHUGA *GREEN SALAD BOWL*

En esta sección se muestra el procedimiento seguido para germinar las semillas de lechuga *Green Salad Bowl* en el sustrato y la razón del uso de esta clase de semilla. Se ha escogido usar la clase de lechuga *green salad bowl* debido a que esta semilla es de fácil acceso en el mercado ecuatoriano. Para germinar las semillas se escoge el sustrato lana de roca, que de acuerdo a la revisión del estado del arte, se considera el mejor sustrato para las lechugas. La lana de roca tiene propiedades físicas que no permiten la circulación interna del aire evitando que se pierda humedad en el sustrato. La humedad es importante para germinar las semillas. Así como también es importante comprimir el sustrato para sacar el aire que pudiera existir internamente en el mismo (Echeverry Buitrago y Acosta, 2018).

En un recipiente de cinco litros se colocó agua potable hasta llenarlo por completo. Seguidamente, se colocó la solución nutritiva al 50% de la concentración utilizada normalmente en el cultivo (recomendación realizada por el proveedor de la solución nutritiva). Después, se midió el valor del PH en el agua y se reguló con ácido nítrico hasta tener un valor de 5.5 de PH.

Una vez preparado el agua con nutrientes se procede a trabajar con el sustrato. En Ecuador, debido a que el tema de la Hidroponía es incipiente fue complicado conseguir algunos elementos por esta razón se trabajó con materia prima no preparada como el caso del sustrato de lana de roca. En otros países se puede conseguir la lana de roca en diferentes tamaños y preparados solo para humedecerlos y colocar la semilla quedando listos para que empiece el proceso de germinación. Para el presente trabajo se consiguió la lana de roca en planchas de 1,20x0,60x0,05 metros. Por esta razón, se procede a cortar la plancha en cubos de 5 cm de lado y después se realizó una perforación en el cubo para colocar la semilla.

Con los cubos de lana de roca preparados se procede a sumergirlos uno por uno en el agua con nutrientes y comprimirlos una vez sumergidos con la finalidad de sacar el aire interno que se encuentra en el interior del sustrato. Cuando todos los cubos estaban totalmente humedecidos, se colocó las semillas de lechuga en cada cubo y se trasladó a una bandeja en donde reposan hasta que germinen las semillas. Un punto importante para resaltar es que no se necesitó un lugar específico como cámaras de germinación ya que las condiciones ambientales del lugar de estudio son óptimas para el crecimiento y germinación de las

lechugas. Por este motivo, se colocó las bandejas en un cuarto con las ventanas abiertas hasta que germinen las plantas como se observa en la figura 27.



Figura 27. Semillas de lechuga *Green Salad Bowl* germinadas

4.2. DISEÑO DEL SISTEMA NFT

Mientras se esperaba que las semillas germinen se procedió a diseñar la estructura del sistema hidropónico. Se ha escogido el sistema *NFT* debido a que es el sistema más común para hortalizas y el mejor para lechugas (Sharma et al., 2018). Otra razón para la elección de este sistema de Hidroponía es que: en el trabajo de Hinojosa Pinto (2019) mencionado en los trabajos de inspiración, se indica que es una buena técnica para aplicar en lugares en donde existe poco espacio. En el lugar de estudio para el presente proyecto se dispone de un espacio de 2m x 1,8m inclinando la balanza hacia el sistema *NFT*.

Una vez escogido el sistema para la estructura se procede a cortar los tubos PVC con un largo de 1,5m y se realizaron perforaciones en la tubería con las consideraciones de Cajo Curay (2016), en donde se manifiesta que la distancia entre plantas debe ser de 15 a 30cm la longitud máxima del canal deber ser 20m y la tubería debe tener una pendiente entre 1.5% a 2%.

La pendiente de los tubos PVC fue ajustada a 1,5% y la distancia entre plantas del sistema desarrollado es de 25cm.

Para aprovechar el espacio se realizó el cultivo en vertical, es decir: se colocó un tubo PVC encima de otro con una altura de 0,4m quedando el diseño como se observa en la figura 27 y figura 28

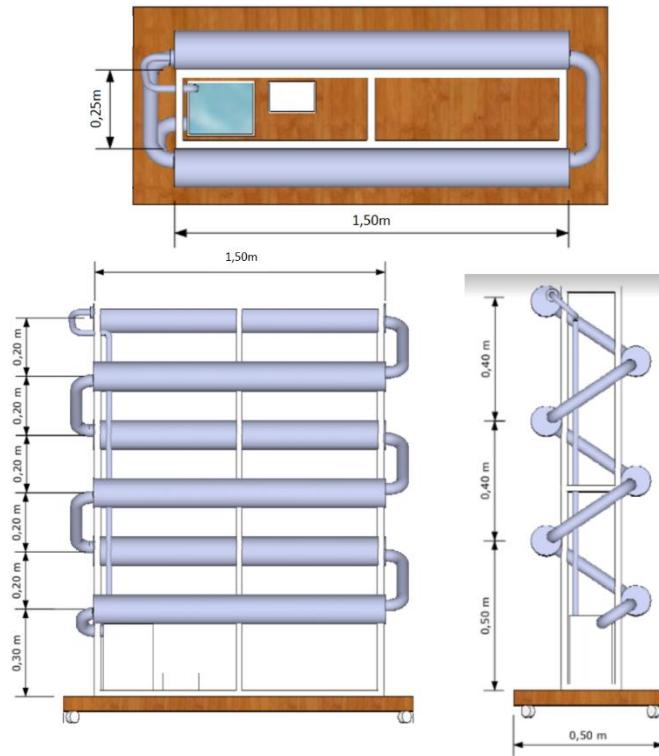


Figura 28. Diseño del sistema NFT. Adaptado de Ruiz (2018)



Figura 29. Estructura del sistema hidropónico.

Hasta aquí se ha redactado la construcción del sistema hidropónico tradicional. Ahora, para el sistema de Hidroponía moderno se instalan sensores de PH, conductividad eléctrica, luminosidad, humedad relativa, temperatura de ambiente y temperatura del agua nutritiva. Estos sensores tienen la finalidad de monitorear los valores críticos para el cultivo hidropónico, enviar la información recopilada por los sensores cada media hora a una plataforma *cloud* que se detalla más adelante en la sección de “Arquitectura del sistema hidropónico moderno” y finalmente los sensores sirven para controlar que los parámetros críticos estén en los rangos deseados caso contrario se procede a rectificar los valores a través

de actuadores. Debido a la acción de los actuadores de manera automática aparece ventajas como: prescindir de una persona que esté controlado las variables críticas y mantener las variables críticas siempre en rangos óptimos para el crecimiento de las hortalizas.

4.2.1. Condiciones para el funcionamiento del sistema hidropónico moderno

El prototipo debe contar con luces artificiales para aumentar el tiempo de exposición de luz debido a que la lechuga es una hortaliza de días largos y necesita idealmente una exposición de luz mayor a 13 horas. Además, el prototipo automatizado debe tener sensores para medir TDS y compensar las sales disueltas en el agua mediante la aplicación de solución nutritiva cuando sea necesario, también el sistema hidropónico debe tener un sensor de PH para mantener los parámetros de PH en el nivel deseado. Finalmente, se debe hacer circular el agua con nutrientes cada cierto periodo de tiempo para que la misma sea oxigenada.

Los datos generados son publicados en una plataforma *IoT* y visualizados en forma de gráficos en la misma plataforma, la publicación de los datos se realiza todos los días cada media hora durante el tiempo que dure el proceso de crecimiento de la lechuga, los datos publicados son: temperatura del ambiente, humedad relativa, nivel de PH, TDS, temperatura de la sustancia nutritiva y cantidad de luz.

4.3. ARQUITECTURA DEL SISTEMA HIDROPÓNICO MODERNO

Para solventar las condiciones con las que se desea que funcione el sistema de Hidroponía moderno es necesario proponer una arquitectura *IoT*. En los trabajos de referencia e inspiración la mayoría de los autores solucionan sus problemas con una arquitectura de cuatro capas y se considera que para el presente trabajo también son suficientes debido a que no se realiza un análisis con inteligencia artificial y el alcance del presente proyecto está orientado al monitoreo, recolección de datos y tomar de acciones de corrección a través de actuadores, motivo por el cual se propone una arquitectura *IoT* de cuatro capas las cuales son: capa de sensores y procesamiento, capa de comunicaciones, capa de plataforma y capa de aplicación.

Estas capas se pueden apreciar en la figura 30

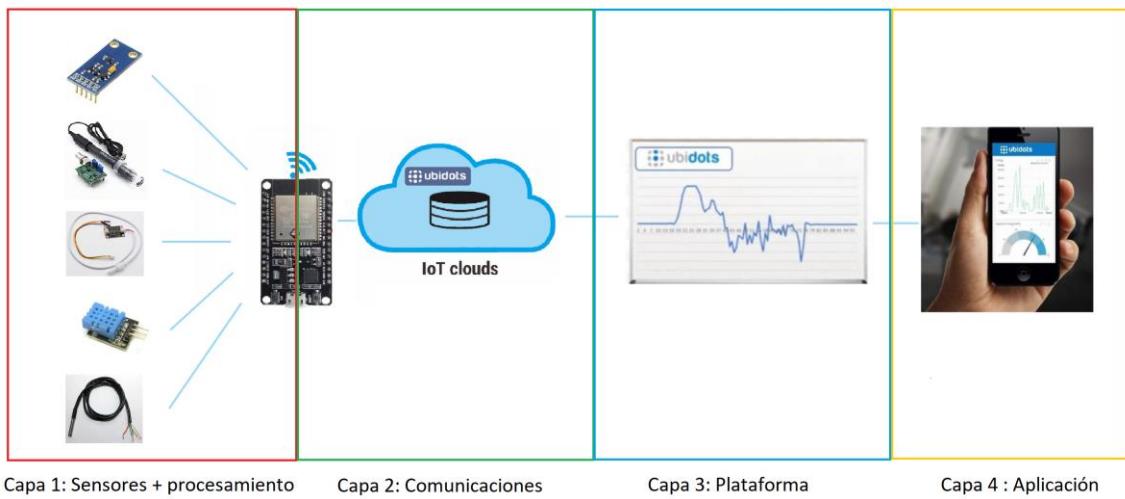


Figura 30. Arquitectura del sistema hidropónico moderno.

4.3.1. Capa de sensores y procesamiento

En esta capa se colocan los sensores que sirven para controlar variables críticas que se determinaron en la revisión del estado del arte. El factor determinante para escoger los sensores y actuadores fue el precio, motivo por el cual se ha seleccionado los siguientes sensores:

- Sensor de cantidad de luz: BH1750 (salida I2C)
- Sensor de PH: E-201-C (Salida analógica)
- Sensor de total de sólidos disueltos: TDS meter v1.0 (Salida analógica)
- Sensor de temperatura ambiental y humedad relativa: DHT11 (Salida digital)
- Sensor de temperatura de agua nutritiva: DS18b20 (Salida digital)

Los sensores utilizados no son dispositivos inteligentes razón por la cual, se añade una etapa de procesamiento, en esta etapa se recopila la información que entregan los dispositivos y se programa el microcontrolador para que recolecte la información cada media hora y a través de la puerta de enlace (*gateway*) los datos pasen a la siguiente capa.

4.3.1.1. Diseño de hardware

En esta sección se realiza un circuito esquemático en donde se selecciona la cantidad de microcontroladores de acuerdo con el tipo de entradas y salidas que demandan los sensores y actuadores. En la tabla 5 se presenta el análisis del tipo de entradas requeridas.

Tabla 5. Análisis de entradas para el microcontrolador (salidas del sensor)

Sensor	Tipo de salida	Cantidad de pines
PH	analógica	1
TDS	analógica	1
DHT11	Digital	1
Bh1750	I2c	1
DS18b20	digital	1

Después del análisis de entradas se concluye que se necesita dos entradas analógicas dos entradas digitales y un puerto para comunicación I2C. Ahora, se realiza el análisis de tipos de salidas que necesita el microcontrolador. De acuerdo con las condiciones de funcionamiento se debe compensar los nutrientes, para realizar esa acción se necesita de bombas peristálticas que funcionan con corriente directa.

Las soluciones nutritivas se consiguen en frascos separados debido a que etiquetan cada frasco como solución A, solución B y solución C estos tipos de nutrientes se mezclan A+B+C para formar la solución final que debe ser colocada en el tanque con agua potable que tiene el sistema hidropónico. Por lo tanto, es necesario utilizar tres bombas peristálticas una para cada tipo de nutriente. Adicionalmente, se necesita regular el PH del agua nutritiva con ácido nítrico, razón por la cual se adiciona una bomba peristáltica a las anteriores mencionadas.

Otra condición de funcionamiento es alargar el fotoperiodo de la lechuga. Para conseguir aumentar el fotoperiodo de la planta es necesario activar una lámpara de luz de crecimiento artificial, estas lámparas funcionan con corriente alterna, motivo por el cual se debe utilizar un relé que se activa con una entrada digital. Finalmente, la última condición es hacer circular el agua con nutrientes cada cierto periodo de tiempo, para realizar esta acción se necesita una bomba de agua que funciona con corriente alterna motivo por el cual se añade otro relé que se activa con una entrada digital. El resumen de las salidas se muestra en la tabla 6.

Tabla 6. Análisis de salidas para el microcontrolador

Actuador	Tipo de salida	Cantidad de pines
Bombas peristálticas	PWM	4
Relé para lámpara de crecimiento	digital	1
Relé para bomba de agua	digital	1

Una vez claro el número de entradas y salidas que se necesita, se procede a analizar los dispositivos que cumplen los requerimientos de acuerdo con los dispositivos revisados en el estado del arte.

El dispositivo conocido como Raspberry pi es descartado debido a que solo cuenta con puertos digitales y para el presente proyecto se necesita tanto de entradas analógicas como digitales.

Ahora se analiza el dispositivo Arduino nano *IoT* contra el dispositivo Módulo ESP8266 para lo cual se elabora la tabla 7.

Tabla 7. Arduino nano *IoT* contra ESP8266 NodeMCU (Amica)

Arduino nano <i>IoT</i>		ESP8266 NodeMCU v2 (Amica)	
Voltaje de alimentación	3.3 VDC	Voltaje de alimentación	5 VDC
Voltaje de Entradas/Salidas	3.3 VDC	Voltaje de Entradas/Salidas	3.3 VDC
Pines de Entrada/Salida digitales	14	Pines de Entrada/Salida digitales	17
Entradas analógicas	8	Entradas analógicas	1
Pines PWM	11	Pines PWM	4
UART	1	UART	2
SPI	1	SPI	1
I2C	1	I2C	1
Salidas analógicas	1	Salidas analógicas	No dispone
Precio en Ecuador	35 USD	Precio en Ecuador	7 USD

Después de analizar las entradas y salidas de los dispositivos se determinó que, el Arduino nano *IoT* cumple con los requerimientos mientras que al dispositivo ESP8266 le falta una entrada analógica. Sin embargo, para cubrir la entrada analógica faltante por parte del dispositivo ESP8266 se puede utilizar dos microcontroladores. El factor determinante es el precio, a pesar de utilizar dos dispositivos ESP8266 el precio sería de 14 USD en comparación con el precio del Arduino nano *IoT* que tendría un valor de 35 USD. Por lo tanto, se decide utilizar el microcontrolador más económico.

Con los sensores y dispositivos inteligentes escogidos procede a realizar el diagrama esquemático de la figura 31.

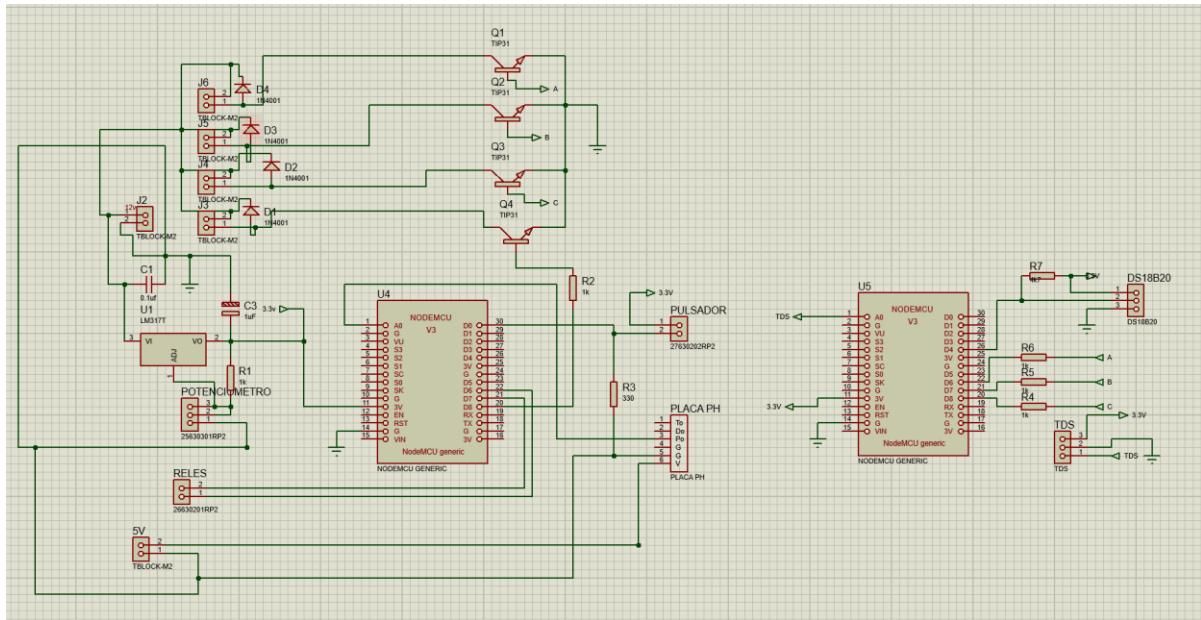


Figura 31.Circuito esquemático.

El diagrama esquemático dispone de cuatro transistores que son: Q1, Q2, Q3 y Q4. Estos transistores son los encargados de activar las bombas dosificadoras (Bombas peristálticas). Cada transistor está conectado a borneras (J3, J4, J5 Y J6) que se utilizan para una instalación más fácil de las bombas dosificadoras y a cada bornera se encuentra conectado un diodo (D1, D2, D3 Y D4) utilizado para protección de corriente.

En el circuito esquemático también se ha colocado borneras en donde se ubican los sensores. Cada bornera (salida de sensores) está conectado a módulos ESP8266 en los puertos

respectivos: analógicos, digitales o comunicación según sea el caso. Una vez realizado las conexiones se creó una visualización en 3D como se aprecia en la figura 32.



Figura 32. Visualización 3D de la placa.

Finalmente, una vez que se decidió la ubicación de los elementos en la placa se procedió a realizar el circuito impreso que se observa en la figura 33.



Figura 33. Circuito impreso.

4.3.1.2. Lógica de programación del microcontrolador (*firmware*)

Para elaborar la lógica que debe seguir el microcontrolador se siguió las siguientes condiciones:

- Medir las variables críticas cada media hora
- Verificar que las variables se encuentren en los rangos deseados
- Subir los datos medidos a la plataforma *cloud*
- Si las variables no se encuentran en el rango deseados aplicar acciones de control

Para cumplir con las condiciones se realizó un diagrama de flujo para cada microcontrolador. En la figura 34 se observa el diagrama de flujo que se utilizó para el

dispositivo que maneja los sensores de: TDS, cantidad de luz, humedad relativa y temperatura de ambiente. Así como también, realiza la activación de las bombas dosificadores de solución nutritiva. El código implementado se puede observar en el anexo A.

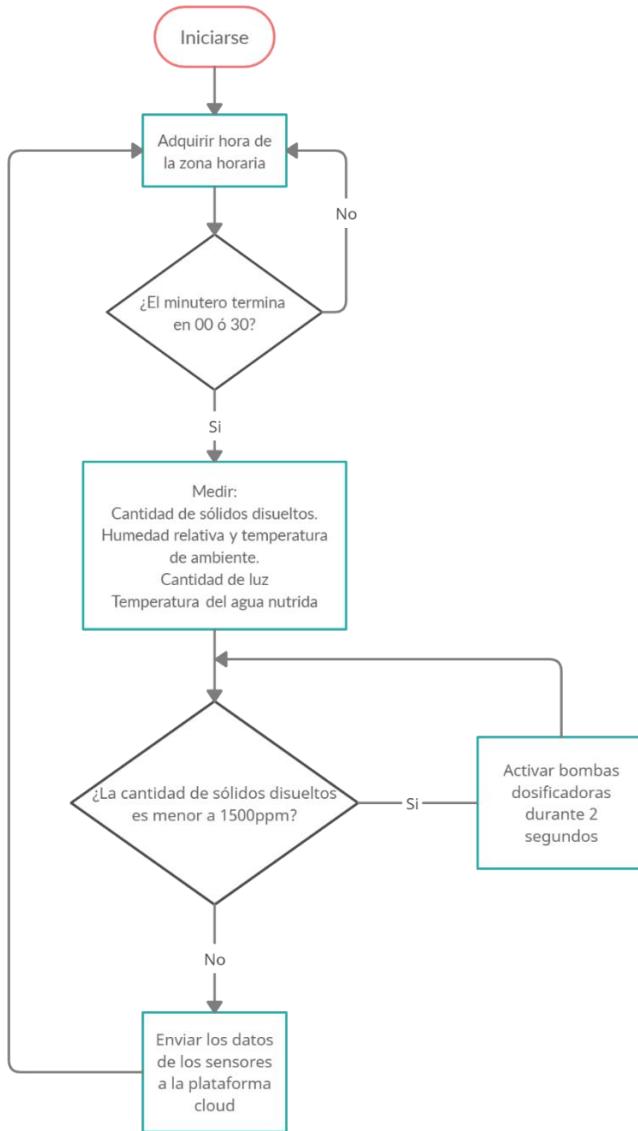


Figura 34. Diagrama de flujo del primer dispositivo

El segundo dispositivo es el encargado de activar las bombas de agua. De acuerdo con De la Rosa Rodriguez et al. (2018), se recomienda activar las bombas de agua dos veces al día en un rango de 20-30 minutos, este periodo de tiempo es suficiente para oxigenar el agua con nutrientes y evitar enfermedades radicales. Por este motivo, se decide activar la bomba de agua dos veces al día durante media hora. La primera activación es desde las 7:00 hasta las 7:30 horas y la segunda activación es a las 19:00 hasta las 19:30 horas.

Otra condición es aumentar el fotoperiodo de la lechuga, conociendo que la lechuga es una planta considerada de fotoperiodo largo y que necesita una exposición de luz mayor a 13 horas, se decide activar una lámpara de luz artificial para crecimiento de plantas. Esta decisión se toma debido a que en Ecuador los días son regulares y con de 12 horas de luz solar, razón por la cual, se agrega una lámpara de luz artificial de crecimiento que se activará todos los días desde las 18:00 hasta las 22:00.

La última condición es que, el dispositivo debe medir el nivel de PH del agua con nutrientes y en caso de ser necesario deberá ajustar el valor activando una bomba dosificadora que pone ácido nítrico en el tanque que contiene la solución nutritiva con el agua. Este proceso se observa en el diagrama de flujo de la figura 35. El código implementado se puede observar en el Anexo B

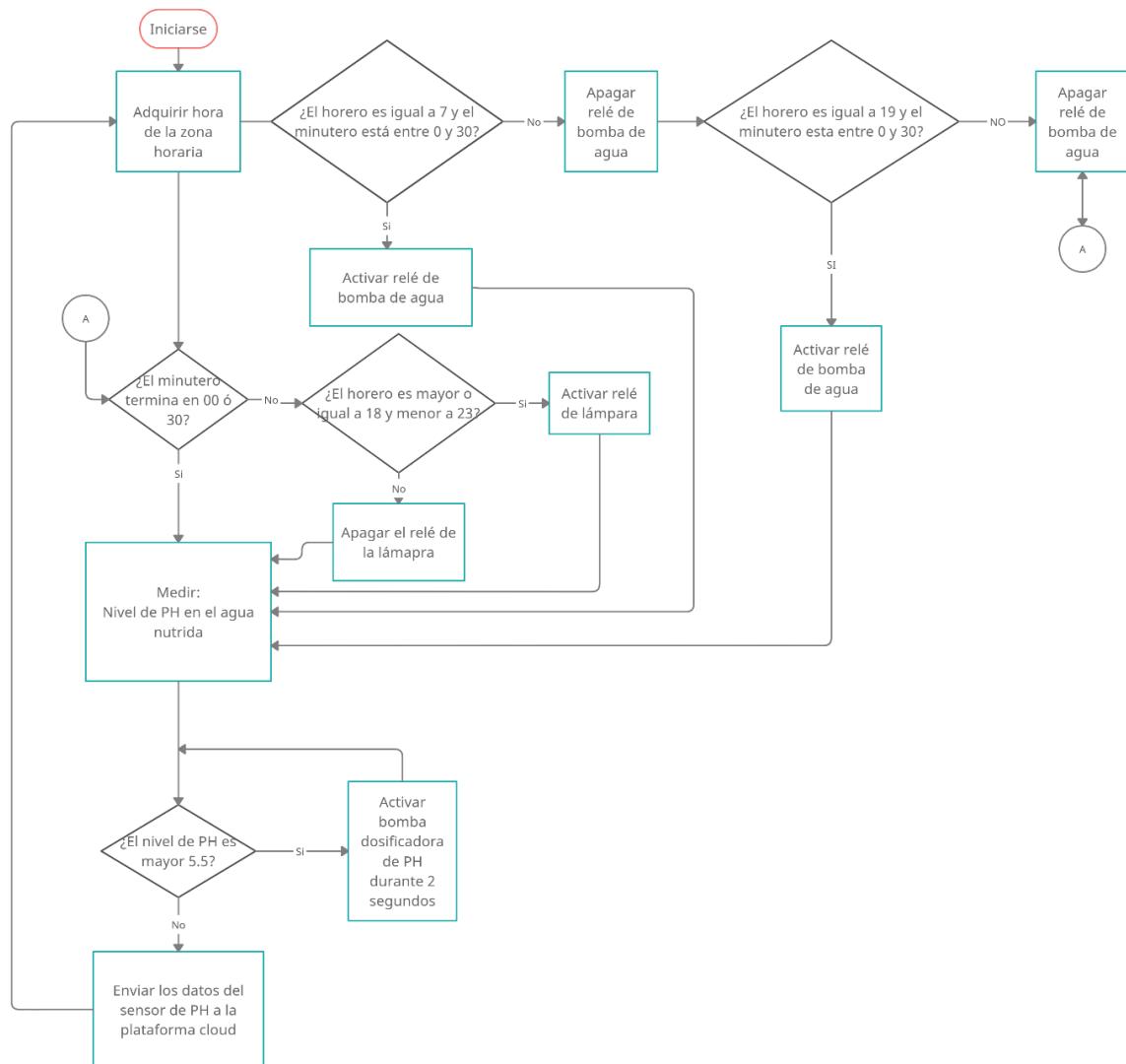


Figura 35. Diagrama de flujo del segundo dispositivo

4.3.2. Capa de comunicaciones

En la comunicación de los dispositivos con una plataforma *cloud* se determinó que la plataforma más conveniente para el desarrollo del presente proyecto es *Ubidots* debido a que esta plataforma ofrece la conexión de tres dispositivos totalmente gratis. *Ubidots* ofrece visualización, almacenamiento de datos y conexión a través de protocolos como HTTP, MQTT, TCP, UDP o Parse (protocolo personalizado). Además, la plataforma de *Ubidots* es compatible con otras plataformas de software libre como Arduino ofreciendo librerías para su fácil integración.

Se revisó la documentación oficial de *Ubidots* para la integración de Arduino con *Ubidots* y se procedió a configurar los dispositivos con conexión http con el uso de la librería “*Ubidots.h*” como se observa en la figura 36.



```
ESP_PH Arduino 1.8.13
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda

ESP_PH

#include "Ubidots.h"
#define D0 16 //GPIO16 - WAKE UP
#define D1 5 //GPIO5
#define D2 4 //GPIO4
#define D3 0 //GPIO0
#define D4 2 //GPIO2 - TXD1
#define D5 14 //GPIO14 - HSCLK
#define D6 12 //GPIO12 - HMISO
#define D7 13 //GPIO13 - HMOXI - RXD2
#define D8 15 //GPIO15 - HCS - TXD2
#define RX 3 //GPIO3 - RXD0
#define TX 1 //GPIO1 - TXD0
#define DEVICE "ph" // Put here your Ubidots device label
#define ID_PH "valor_ph"
#define TOKEN " " // Put here your Ubidots TOKEN
#define WIFISSID " " // Put here your Wi-Fi SSID
#define PASSWORD " " // Put here your Wi-Fi password
```

Figura 36. Configuración de la comunicación del dispositivo a la plataforma *Ubidots*.

En la primera línea se hace el llamado de la librería de *Ubidots*, la cual necesita de parámetros como el nombre del dispositivo, un identificador de la variable que se desea enviar, un acceso por token entregado por *Ubidots* cuando el usuario se registra, el nombre de la red donde el dispositivo inteligente se conecta y la contraseña de la red para que el dispositivo pueda acceder a la misma.

4.3.3. Capa de plataforma

La plataforma *Ubidots* recibe los datos de los dispositivos a través de un identificador único (Token). En la figura 37 se observa la pantalla en donde se adquiere las claves de acceso

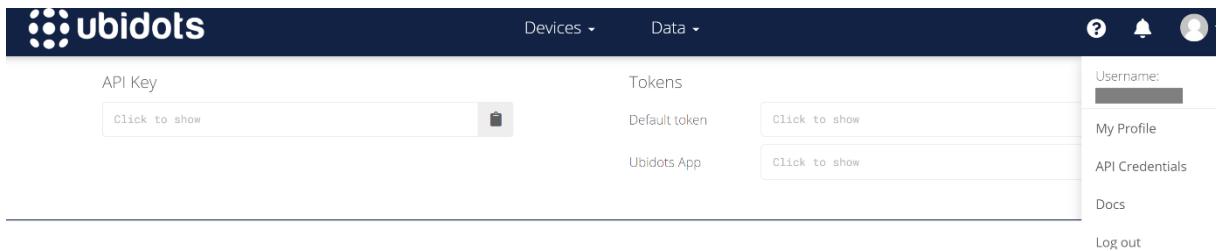


Figura 37. Panel de claves de acceso

Con las claves de acceso ingresadas en los dispositivos inteligentes y con el identificador de la variable que se envía desde el dispositivo inteligente se configura la plataforma para recibir los datos y crear un cuadro de mando (*dashboard*).

El cuadro de mando creado para el presente trabajo se llama “Hidroponia” (se ha omitido la tilde para evitar problemas con la programación).

Dentro del cuadro de mando hay que asociar las variables a los dispositivos una por una, de esta manera los datos enviados por cada sensor son almacenados en la plataforma *cloud*. En la figura 38 se aprecia todas las variables asociadas en el cuadro de mando y en el anexo C se muestra el formato en el cual se almacenan los datos.



Figura 38. Variables críticas asociadas en el cuadro de mando

Con estas configuraciones el sistema de Hidroponía moderno ya está listo para trabajar y enviar los datos generados cada media hora a la plataforma *Ubidots*.

4.3.4. Capa de aplicación

En esta sección se muestra la aplicación móvil que sirve para la visualización de los datos del usuario final.

Ubidots ofrece por defecto una aplicación móvil, la cual se puede encontrar en la *Play Store* (tienda oficial de Google). La APP se puede descargar de manera gratuita y para visualizar los datos solo se debe ingresar las credenciales de usuario y contraseña (datos que fueron usados para configurar el *dashboard*). En la APP se visualiza la información de las variables críticas como se aprecia en la figura 39.

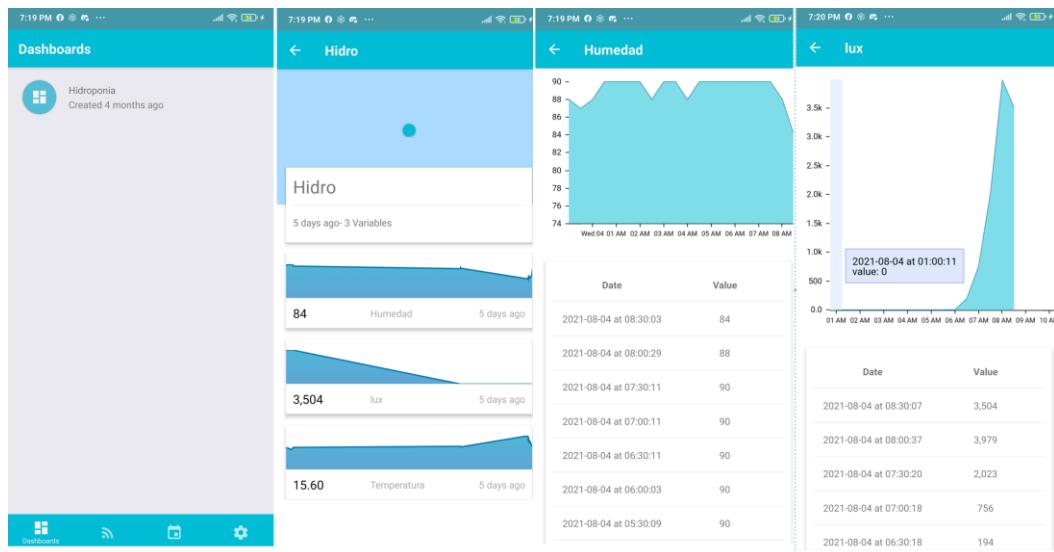


Figura 39. Visualización de variables críticas en la aplicación móvil

4.4. TRASPLANTE DE LAS PLÁNTULAS AL SISTEMA HIDROPÓNICO

En la sección de germinación de semillas de lechuga *Green salad bowl*, las semillas se encontraban en el sustrato humedecido esperando que el proceso de germinación transcurra. Después de ocho días, las raíces de las semillas de la lechuga traspasaron el sustrato quedando listas para realizar el trasplante. El trasplante consiste en migrar las plantas de un lugar a otro, en este caso se migró desde las bandejas de germinación hacia el contenedor final de crecimiento (sistema hidropónico). Para realizar el trasplante y dar mayor soporte a la planta se coloca la planta con el sustrato en una canasta la cual se aprecia en la figura 40.



Figura 40. Canasta para realizar el trasplante

La planta con la canasta es ubicada en los tubos PVC y de esta manera la lechuga ha llegado a su contenedor final de crecimiento. En la figura 41 se puede apreciar los sistemas hidropónicos en funcionamiento: el lado de la izquierda “a” en el día y el lado de la derecha “b” en la noche.



Figura 41. Sistema hidropónico en funcionamiento en el día y la noche

Después de 54 días desde el trasplante las lechugas están listas para ser cosechadas. En la figura 42 se observa el producto final, el cual será cosechado y medido para obtener datos y realizar una comparación.



Figura 42. Lechugas *Green salad bowl* listas para ser cosechadas

4.5. ANÁLISIS DE CRITERIOS PARA LA COMPARACIÓN DEL PRODUCTO EN EL SISTEMA AUTOMATIZADO Y TRADICIONAL

Los criterios tomados para saber la calidad del producto en el presente proyecto son cinco: peso de la lechuga con raíz, peso de la lechuga sin raíz, el área foliar, el largo de la hoja y el número de hojas. De acuerdo con Pertierra Lazo y Quispe Gonzabay (2020), la venta de lechugas en mercados nacionales en Colombia está regulada y exige como mínimo una lechuga de 150g de peso incluida las raíces. No obstante, en el mismo documento manifiesta que en Ecuador no existe regulación en ese aspecto, pero se vende lechugas en el mercado ecuatoriano con un peso desde 100 g a 200 g sin raíz. Con estos datos se acudió a un centro comercial más cercano y se pudo observar los datos que se aprecian en la figura 43. Las lechugas se ofertan desde los 150g hasta los 250g con un precio que oscila desde 0,89 USD hasta 0,98 USD.



Figura 43. Peso y precio de lechugas hidropónicas en Ecuador

Una vez conocido los datos del peso de las lechugas aceptado en el mercado nacional e internacional en este caso Colombia se procede a pesar las lechugas de cada sistema utilizando una balanza de cocina como se observa en la figura 44.



Figura 44. Proceso de toma del peso de las lechugas

En la sección “a” de la figura 43 se observa un recipiente que se utilizó para pesar la lechuga. Primero se colocó el recipiente y se enceró la balanza, después en la sección “b” se pesó la lechuga con raíces y finalmente en la sección “c” se pesó de nuevo la lechuga, pero esta vez sin raíces. Este proceso se realizó con 10 lechugas de cada sistema (tradicional y moderno) tomadas aleatoriamente teniendo los resultados mostrados en la tabla 8.

Tabla 8. Peso de lechugas de sistema hidropónico tradicional contra sistema hidropónico moderno.

Sistema hidropónico tradicional		Sistema hidropónico moderno	
Peso con raíz (g)	Peso sin raíz (g)	Peso con raíz (g)	Peso sin raíz (g)
220	136	332	208
270	158	323	240
393	275	350	241
374	293	495	305
260	180	310	208
249	165	306	201
235	175	290	198
236	160	500	344
490	392	365	263
290	198	396	301
Promedio		301,7	213,2
		366,7	250,9

Otros parámetros importantes para medir la calidad de la lechuga según Morales (2019) son: el largo de la hoja, número de hojas y el área foliar. Es así que se procedió a medir el largo de cada una de las hojas de las 10 lechugas de cada sistema hidropónico (tradicional y moderno). En la medición del largo de las hojas se utilizó una regla métrica y se midió desde la base de la hoja hasta el ápice de la misma como se observa en la figura 45.



Figura 45. Medición del largo de la hoja de lechuga

El proceso de medición del largo de las hojas se repitió con las 20 lechugas (10 de cada sistema) hasta obtener la tabla 9 en donde se muestra los promedios del largo de las hojas de lechuga en cada sistema de Hidroponía.

Tabla 9. Promedio de largo de hojas de lechuga del sistema hidropónico tradicional contra el sistema hidropónico moderno

Sistema hidropónico tradicional	Sistema hidropónico moderno
Promedio del largo de hojas por lechuga en cm	Promedio del largo de hojas por lechuga en cm
19,88	18,05
19,86	22,07
19,68	18,02
19,31	20,50
20,29	17,08
19,79	22,05
18,69	19,47
20,78	20,50
22,98	18,75
19,70	23,22

Mientras se realizaba la medición del largo de la hoja también se midió el área foliar. Para la medición del área foliar se siguió el método sugerido por Rincón Guerrero et al. (2012) en donde se indica una buena eficiencia de la medición del área foliar con una cámara web o cámara de teléfono inteligente en comparación con un equipo profesional.

Para realizar la medición del área foliar se utilizó una aplicación, la cual pedía de referencia un cuadrado de color rojo de $4cm^2$ de área. El primer paso que se realizó fue comprobar que la aplicación sea confiable, para esto se utilizó una cartulina de color verde la cual se cortó dando una forma de un triángulo rectángulo de catetos 10cm y 5cm por lo tanto el triángulo tiene un área de $25cm^2$. El siguiente paso consistió en seguir las recomendaciones de Morales (2019) quien menciona que para medir con una cámara hay que asegurarse que los objetos de medición y cámara estén de forma paralela y que la hoja de la planta sea presionada con un vidrio como se observa en la figura 46.

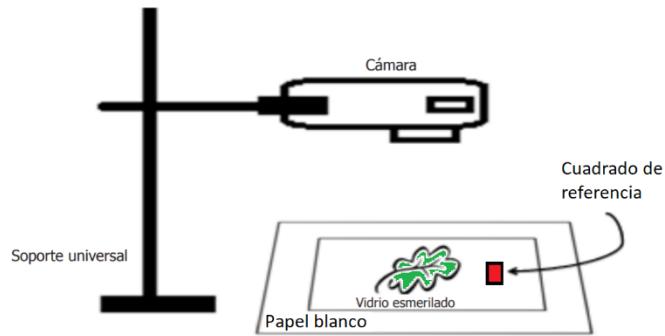


Figura 46. Forma correcta de medir el área foliar con una cámara. Adaptado de Rincón Guerrero et al. (2012)

Cuando todas las recomendaciones estaban cumplidas se midió el área del triángulo rectángulo obteniendo un área de $24,76\text{cm}^2$ como se observa en la figura 47.



Figura 47. Medición del área conocida de un objeto (triángulo rectángulo)

En la figura 46 se puede apreciar que el valor del área del triángulo rectángulo se aproxima bastante. Por lo tanto, se procedió a calcular el error de la medida con la siguiente fórmula

$$\text{error} = \frac{\text{valor real} - \text{valor medido}}{\text{valor real}} \times 100$$

$$\text{error} = \frac{25 - 24,76}{25} \times 100 = 0.96\%$$

Se considera que el error de 0,96% es aceptable, por lo tanto, se procedió a medir el área foliar de cada hoja de lechuga como se observa en la figura 48



Figura 48. Medición del área de una hoja de lechuga

Este proceso se repitió con cada hoja de lechuga de las 20 hortalizas (10 de cada sistema hidropónico) hasta poder obtener el resumen del promedio de área foliar de la tabla 10.

Tabla 10. Resumen del promedio del área foliar de lechugas del sistema hidropónico tradicional contra el sistema hidropónico tradicional

Sistema hidropónico tradicional	Sistema hidropónico moderno
Promedio del área foliar de cada lechuga en cm^2	Promedio del área foliar de cada lechuga en cm^2
139,41	143,38
164,22	145,49
180,99	151,45
119,95	152,35
169,22	127,81
144,74	174,63
141,84	162,11
145,51	155,17
189,89	163,34
166,85	192,60

Para finalizar, se contó el número de hojas de cada lechuga, el resumen de estos datos se muestra en la tabla 11.

Tabla 11. Cantidad de hojas de lechuga del sistema hidropónico tradicional contra el sistema hidropónico moderno

Sistema hidropónico tradicional	Sistema hidropónico moderno
Cantidad de hojas	Cantidad de hojas
17	21
18	32
19	23
23	32
22	20
22	21
20	19
17	34
32	20
20	23
Promedio	
21	24,5

4.6. ANÁLISIS DE COSTES

En esta sección se muestra los precios de los materiales utilizados para la germinación de semillas. Así como el costo total del sistema hidropónico tradicional y el sistema hidropónico moderno. Se analiza los valores de energía eléctrica que consume el sistema hidropónico moderno para estimar el valor adicional a pagar en la factura de energía eléctrica y se estima el valor del retorno de la inversión por cada cosecha

Para el proceso de germinación de lechuga se utilizó sustrato de lana de roca obtenidos de la plancha del material antes mencionado que se consiguió en Ecuador, para obtener el precio unitario de cada cubo de lana de roca se calcula el número de cubos que se pueden obtener de la plancha de 1,2x0,6x0,05m de un valor de 14,00 USD. La cantidad de cubos que se pueden sacar son 288 por lo tanto el valor de cada sustrato sería de $\frac{14 \text{ USD}}{288 \text{ unidades}} \approx 0,05 \text{ USD/unidad}$ es decir: 5 centavos americanos por unidad. El sobre de lechugas *green salad bowl* tiene un valor de 4 USD y se vende en sobres de aproximadamente 5000 unidades de semilla de lechuga, para calcular el precio por unidad de semilla se divide los 4 USD por las 5000 unidades de semillas obteniendo el valor de 0,0008 USD. En la tabla 12 se presenta todos los elementos utilizados para la germinación de semillas con su precio unitario. Las cantidades se han

estimado para la producción de un sistema hidropónico con las dimensiones mostradas en la sección “Diseño del Sistema hidropónico moderno”

Tabla 12. Costes para la germinación de semillas

	cantidad	precio/unidad	Total
Cubo de lana de roca	36	0,05	1,8
Kit de solución nutritiva para 125 litros	1	2,5	2,5
Bandeja para germinar	2	1	2
Sobre de semillas de lechuga	36	0,0008	0,0288
Total			6,33

Para determinar el valor inicial de inversión se analiza también el coste de los materiales que se necesitan para construir el sistema de Hidroponía. En Ecuador los tubos PVC se venden con una longitud de 3 m, en los trabajos de inspiración se observó que el diámetro de los tubos para las hortalizas debe ser de 4 pulgadas. Para la estructura se utilizó tubos cuadrados galvanizados, en Ecuador esta clase de tubos se venden con una longitud de 6m. Para el ancho del tubo se consideró suficiente una pulgada con 2 mm de espesor debido a que no va a soportar cantidades de peso muy elevadas. Para las conexiones de los tubos se utilizó manguera de jardinero de media pulgada. Por último, para la circulación del agua se necesita una bomba de agua, la cual se buscó en páginas web de *e-commerce* y la única bomba que vendían en Ecuador con condiciones de Hidroponía tenía las características de ser sumergibles con una potencia de 16 vatios y un caudal de 1110 l/h. En la tabla 13 se observa los materiales utilizados para ensamblar el sistema hidropónico tradicional y la mano de obra.

Tabla 13. Materiales para ensamblar el sistema hidropónico tradicional

	Cantidad	Precio por unidad (USD)	Total (USD)
Tubos PVC	3	6,5	19,5
Tubos galvanizados	3	14	42
Manguera de jardinero de media pulgada	3 (metros)	0,5	1,5
Tanque de almacenamiento de 20 litros	1	3	3
Bomba de agua	1	15	15
Mano de obra	1	80	80
Total			161

Los costos analizados hasta el momento son los mismos tanto para el sistema hidropónico tradicional como con el sistema hidropónico moderno. Ahora, se analiza la inversión respecto a tecnología que se debe realizar para pasar del sistema tradicional hacia el sistema moderno.

En la tabla 14 se muestra la cantidad de materiales electrónicos y precio unitario de cada uno.

Tabla 14. Materiales para automatizar el sistema hidropónico tradicional

	Cantidad	Precio unitario	Total
ESP8266 (Amica)	2	7	14
Transistor TIP31	4	0,25	1
Borneras de conexión	7	0,25	1,75
Placa de cobre	1	2	2
Sensor de luz BH1750	1	4	4
Sensor DHT11	1	3,5	3,5
Sensor DS18b20	1	3,5	3,5
Bomba peristáltica	4	20	80
Sensor de PH	1	45	45
Módulo relé	1	5	5
Sensor de TDS	1	40	40
Lámpara para iluminación artificial	1	30	30
Cable UTP Categoría 5	1m	0,5	0,5
Total			230,25

Ahora, se estima el consumo de energía eléctrica del sistema hidropónico moderno. Para realizar esta actividad se midió el consumo de energía con un amperímetro y con el valor obtenido se ha calculado la potencia de consumo (considerando el voltaje estándar en Ecuador: 120V) en el estado que trabaja más tiempo el sistema hidropónico moderno, es decir cuando se encuentra recolectando datos. Seguidamente se midió el consumo cuando se activa la bomba de agua además del consumo cuando está la luz artificial de crecimiento activada en conjunto con la bomba de agua y se midió cuando solo está activa la luz artificial de crecimiento teniendo los valores de consumo eléctrico por día en la tabla 15 y en el anexo D se puede observar las fotografías de los valores medidos.

Tabla 15. Consumo de energía eléctrica del sistema hidropónico moderno por día

Condiciones de consumo	Amperios	Potencia consumida (Vatios)	Cantidad de horas que trabaja en la condición en un día	Consumo en Kilovatio/hora (en un día)
Recolección de datos	0,3	36	19,5	0,702
Bomba de agua más Recolección de datos	0,6	72	0,5	0,036
Luz artificial de crecimiento activada en conjunto con la bomba de agua	1	120	0,5	0,06
Luz artificial de crecimiento activada	0,8	96	3,5	0,336
Total				1,134

4.6.1. Retorno de inversión

Como fue mencionado en el alcance, en este apartado se analizará el retorno de inversión sin considerar obreros debido a que el gasto que puede generar un obrero depende de varios factores como: tipo de contrato y/o área de trabajo del obrero.

En esta sección se calcula el *ROI* (retorno de inversión) según los ingresos y gastos que se generan en la comparación del sistema hidropónico moderno contra el sistema hidropónico tradicional.

De acuerdo con la tabla 14 se necesita una inversión inicial de 230,25 USD para automatizar un sistema de Hidroponía tradicional, siendo este el valor diferencial del costo entre los dos sistemas (moderno y tradicional).

Para calcular el retorno de inversión se necesita conocer dos variables: ingreso y gasto, para determinar el gasto se considera el valor de consumo de energía eléctrica que produce el sistema hidropónico moderno. Mientras que, para calcular el ingreso del sistema hidropónico moderno se considera la diferencia del precio de la lechuga del sistema hidropónico moderno con un valor de 1,20 USD menos el precio de la lechuga del sistema hidropónico tradicional que es de 0,98 USD. El autor ha fijado el precio de la lechuga hidropónica moderna en base a la mejora que se consigue con la presente propuesta. Mientras que, el precio de la lechuga del sistema hidropónico tradicional se analizó en la sección 4.5.

La diferencia del precio de venta de las lechugas (1,20-0,98) USD es multiplicado por la cantidad total de producción del sistema. El sistema de Hidroponía moderno tiene una capacidad de generar 36 lechugas dando un valor de ingresos de 7,92 USD. Mientras que, el gasto por cosecha del sistema hidropónico moderno respecto al sistema tradicional está dado por el consumo eléctrico y para obtener el valor del consumo eléctrico se procede a multiplicar el consumo diario (en Kilovatios/hora) por los 54 días que estuvieron las lechugas en el sistema hidropónico moderno generando un consumo de 61,24 kv/h , esta cantidad se multiplica por 0,10 USD que es la tarifa en Ecuador por el consumo de kilovatio hora , obteniendo el valor en dólares americanos de 6,12. Con estos datos se procede a calcular el *ROI* con la siguiente fórmula:

$$ROI = \frac{\text{ingreso} - \text{gasto}}{\text{gasto}}$$

$$ROI = \frac{7,92 - 6,12}{6,12} = \frac{1,80}{6,12} = 0,29$$

Se obtuvo un valor de 0,29 que significa que por cada dólar americano invertido se recupera 0,29 USD. Por último, se estima el tiempo en el que la inversión se recuperará.

La ganancia por cada cosecha en el sistema hidropónico moderno respecto al tradicional es de 1,80 USD, por lo tanto: para determinar el número de cosechas se divide la inversión diferencial del costo entre los dos sistemas para la ganancia por cosecha generando el valor de: $\frac{230,25}{1,80} \cong 128$ cosechas. Debido a que cada cosecha se produce en 54 días se necesitará

6912 días para recuperar la inversión es decir aproximadamente 19 años.

5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

El presente proyecto se realizó con el objetivo de realizar la construcción de un prototipo de un sistema hidropónico con soporte *IoT* para determinar si existe mejora en la cosecha de lechugas *Green salad bowl* respecto a un sistema de Hidroponía tradicional en un lugar en donde las condiciones agroclimáticas favorecen el desarrollo de las hortalizas.

Después de haber construido el prototipo con soporte *IoT* y realizado una cosecha en los dos sistemas (tradicional y moderno), se concluye que: si existe una mejora en la calidad del producto del sistema hidropónico moderno respecto al sistema hidropónico tradicional. Esta conclusión se respalda en los objetivos específicos que se describen a continuación:

- El primer objetivo específico es medir los parámetros de calidad de la hortaliza para determinar la mejora de producción en las lechugas *Green salad bowl* en el sistema hidropónico moderno respecto al sistema hidropónico tradicional. Este objetivo se cumplió en la sección 4.5 análisis de criterios para la comparación del producto en el sistema automatizado y tradicional. En donde se puede concluir que el peso de las lechugas tiene una mejora que se observa en la tabla 8 y para obtener un porcentaje de mejora se ha dividido el peso promedio del sistema hidropónico moderno respecto al sistema hidropónico tradicional obteniendo los siguientes datos: el peso de la hortaliza con raíz aumentó en un 21,54% y el peso de la hortaliza sin raíz aumentó en un 17,68%. El largo de las hojas y el área foliar en los dos sistemas fueron similares esto se observa en las tablas 9 y 10 respectivamente y el número de hojas incrementó en 16,6% esto es obtenido al dividir el promedio de hojas de la tabla 11 del sistema hidropónico moderno respecto al sistema hidropónico tradicional.
- El segundo objetivo específico es estimar el precio de inversión inicial para trasladar un sistema de Hidroponía tradicional a uno moderno. Este objetivo se cumplió en la tabla 14 que se encuentra en la sección análisis de costes el valor de la inversión inicial para el presente proyecto fue de 230,25 USD. Cabe mencionar que este valor cambiará de acuerdo con el área del terreno que se disponga para realizar cosechas mediante el sistema de Hidroponía.
- El tercer objetivo específico es determinar la rentabilidad del sistema hidropónico moderno con relación al sistema hidropónico tradicional. Este objetivo se cumplió en la subsección retorno de inversión, en dicha subsección se concluye que por cada dólar americano invertido en un cultivo se tiene una ganancia de 0,29 USD, permitiendo recuperar la inversión en 19 años todo orientado al prototipo construido. Este retorno de inversión es bajo, pero es importante mencionar que, al disponer una mayor área para la cosecha el retorno de inversión podría mejorar.

Para los trabajos futuros en la misma línea se plantea las siguientes sugerencias:

- Construir la estructura del sistema hidropónico en forma de una letra “A”, esta sugerencia se realiza ya que la estructura del presente proyecto es rectangular y cuando la luz está perpendicular a la estructura las hortalizas que se encuentran cerca del suelo no reciben suficiente luz para su proceso de fotosíntesis. Además, se

recomienda ubicar la estructura en lugar abierto, esta recomendación se realiza debido a que en el presente proyecto las estructuras se encontraban cerca de una pared y en horas de la tarde perdían tiempo de exposición a la luz ya que cuando el sol se encontraba atrás de la pared la luz era limitada.

- Considerar en la arquitectura *IoT* un sistema de redundancia para cuando la conexión a internet se vea afectada por cualquier motivo los datos no se pierdan. Esta recomendación se realiza debido a que en el proceso del presente proyecto se presentó un ciberataque a la Corporación Nacional de Telecomunicaciones (CNT), en consecuencia de dicho ataque se afectó el servicio de internet a nivel nacional en Ecuador ocasionando que se pierda información del cultivo hidropónico moderno.
- Realizar el estudio en una empresa consolidada o en un área grande que tenga el potencial de convertirse en una microempresa. Esta sugerencia se realiza para tener un mejor análisis del retorno de inversión considerando trabajadores. Este retorno de inversión sería más real para que una persona considere invertir en la creación de una empresa que funcione a base de un sistema hidropónico con soporte *IoT*.

6. REFERENCIAS

- Aguilera Peña, R. (2020). HIDROPONÍA UNA OPORTUNIDAD PARA LA SEGURIDAD ALIMENTARIA DE. *Revista DELOS (Desarrollo Local Sostenible)*. Obtenido de <https://www.eumed.net/rev/delos/36/hidroponia.pdf>
- Alabama. (s.f.). *Semillas lechuga dancing*. Obtenido de <https://www.alabama.com.pe/1-15-lechuga?lightbox=detail-item-igccwmcm>
- Alibaba. (s.f.). *Sensor DHT11*. Obtenido de <https://spanish.alibaba.com/product-detail/dht11-dht-11-temperature-and-relative-humidity-sensor-module-diy-kit-60753657996.html>
- Alibaba. (s.f.). *Solución de polvo amortiguador de PH*. Recuperado el 21 de Junio de 2021, de Alibaba: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/1set-3-calibration-point-4-00-6-86-9-18-ph-buffer-powder-solution-for-ph-meter-calibration-buffer-solution-60829972656.html>
- Amazon. (s.f.). *Lechuga Romana*. Obtenido de <https://www.amazon.es/World-Of-Flowers-Lechuga-Romana/dp/B07K8TXQFY>
- Anaya Isaza, A., Peluffo Ordoñez, D., Ivan Rios, J., Castro Silva, J., Carvajal Ruiz, D., & Espinosa Llanos , L. (2017). Sistema de Riego Basado En La Internet De Las Cosas (IoT). *researchgate*.
- Arduino. (29 de Junio de 2021). *What's Arduino*. Recuperado el 1 de Julio de 2021, de arduino: <https://docs.arduino.cc/foundations/basics/whats-arduino>
- Arduino. (s.f.). *Nano RP2040 Connect with Headers*. Recuperado el 1 de Junio de 2021, de <https://store.arduino.cc/usa/nano-rp2040-connect-with-headers>
- Arley Orozco, Ó., & Llano Ramírez, G. (2015). Sistemas de información enfocados en tecnologías de agricultura de precisión y aplicables a la caña de azúcar, una revisión. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/750/75047635007.pdf>
- Ávila Guzmán, C. A. (2018). Diseño y Construcción de un Sistema hidropónico con IoT adaptable a acuaponía. *Repositorio Uniandes Colombia*. Obtenido de

<https://repository.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/38769/u808585.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Aws. (s.f.). Aws. Recuperado el 16 de Mayo de 2021, de https://aws.amazon.com/es/what-is-aws/?nc1=f_cc

Bakar, A. A., Rahim, S. S., Razali, A. R., Noorsal, E., Radzali, R., & Abd Rahim, A. F. (2019). Wearable Heart Rate and Body Temperature Monitoring Device for Healthcare. *IOPSCIENCE*. doi:10.1088/1742-6596/1535/1/012002

Banco Mundial. (s.f.). *Agricultura, valor agregado (% del PIB)*. Recuperado el 12 de Mayo de 2021, de Banco Mundial: <https://datos.bancomundial.org/indicator/NV.AGR.TOTL.ZS?end=2019&start=1963&view=map&year=2019>

BASTERRECHEA, M. (s.f.). *Medidor TDS de bolsillo*. Recuperado el 21 de Junio de 2021, de Hidroponia casera.

Beltrano, J., & Gimenez, D. (2015). *Cultivo en hidroponía*. La plata: Editorial de la Universidad de la Plata. Obtenido de <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/46752>

Briceño Jején, M., & Cibides Porras, W. F. (2020). DISEÑO DE UNA SOLUCIÓN IOT PARA MONITOREO DE LAS CONDICIONES ÓPTIMAS DE UN CULTIVO HIDROPÓNICO DE FLORES EN INVERNADERO. *Repository UNAB*. Obtenido de https://repository.unab.edu.co/bitstream/handle/20.500.12749/12734/2020_Tesis_Manuel_Briceño_Jejen.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Bures, S., Urrestarazu Gavilán, M., & Kotiranta , S. (2018). Artificial lighting in agriculture. *bibliotecahorticultura*. Obtenido de <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=ES2018600011>

Cajo Curay, A. M. (2016). *PRODUCCIÓN HIDROPÓNICA DE TRES VARIEDADES DE LECHUGA (Lactuca sativa L), BAJO EL SISTEMA NFT, CON TRES SOLUCIONES NUTRITIVAS*. Amabto: Repositorio Universidad Técnica de Ambato.

Campocyl. (Octubre de 2016). *Campocyl*. Recuperado el 15 de Abril de 2021, de <https://www.campocyl.es/category/sector/como-influye-el-tipo-de-ph-sobre-el-suelo-de-una-explotacion->

agraria/#:~:text=El%20pH%20del%20suelo%20afecta,de%20cambio%20(acidez%20potencial)

Castañares, J. (2020). ABC DE LA HIDROPONIA. *repositorio INTA*. Obtenido de https://repositorio.inta.gob.ar/bitstream/handle/20.500.12123/8023/INTA_DireccionNacional_EEAAMBA_Castañares_JL_ABC_de_la_hidroponia.pdf?sequence=1

Ceja, J., Renteria, R., Ruelas, R., & Ochoa, G. (2017). Módulo ESP8266 y sus aplicaciones en el internet de las cosas. *Ecorfan*, 31. Obtenido de https://www.ecorfan.org/republicofperu/research_journals/Revista_de_Ingenieria_Electrica/vol1num2/ECORFAN_Revista_de_Ingeniería_Eléctrica_VI_N2.pdf#page=31

Cevallos Mendoza, M. R. (2020). *APLICACIÓN DE SOLUCIONES NUTRITIVAS EN VARIEDADES DE LECHUGA*. La Maná: Repositorio Digital Universidad Técnica de Cotopaxi.

Chacón Chaquea, M. Y. (2017). Análisis físico y químico de la calidad del agua. Bogotá, Colombia: Ediciones USTA. Obtenido de <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/33951>

Cingada, L. (2004). Electrodos para medir PH. Obtenido de https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/40974976/Electrodo_de_pH1.pdf?1452036346=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DElectrodo_de_p_H1.pdf&Expires=1627330950&Signature=d~2QWaSLTgcEs9j8Id7p4QXfj32QmYLcZ4~~GuPCbBKbEb0IJ0W~UqDB8FuHMEgvyTW13dabCP

Countrycottageseeds. (s.f.). *Lechuga Salad Bowl*. Obtenido de https://countrycottageseeds.com/index.php?main_page=product_info&cPath=18&products_id=25&language=es

De la Rosa Rodriguez, R., Lara Herera, A., Padilla Bernal, L., Alvear Mejía, J., & España Luna, M. P. (Mayo de 2018). Proporción de drenaje de la solución nutritiva en el rendimiento. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* . doi:<https://doi.org/10.29312/remexca.v0i20.1003>

De Silva, P. C. (2016). Ipanera : An Industry 4.0 based Architecture for. *IEEE Xplore*, 1. doi:[10.1109/MIES.2016.7780266](https://doi.org/10.1109/MIES.2016.7780266)

Delgado Paz, E. M. (2016). *Evaluación de tres variedades de lechuga Lactuca scariola L. con tres dosis de fitohormonas y quelatos inorgánicos y orgánicos cultivadas en condiciones de hidroponía*. Guayaquil: Facultad de Ciencias Agrarias Universidad de Guayaquil.

ebay. (s.f.). Recuperado el 21 de Junio de 2021, de ebay.

Echeverry Buitrago, L., & Acosta, D. (2018). Optimización de sustrato para germinación de semilla de lechuga crespa en cultivos hidropónicos. *Repositorio Institucional Universidad EAFIT*.

Ecología verde. (s.f.). Recuperado el 18 de Junio de 2021, de <https://www.ecologiaverde.com/semillas-que-son-y-tipos-2497.html>

ecured. (2019). *luxómetro*. Recuperado el 22 de Junio de 2021, de ecured: [https://www.ecured.cu/Lux_\(unidad_de_medida\)](https://www.ecured.cu/Lux_(unidad_de_medida))

Euyong, J., Sangwoon, B., Seungyul, C., Koung Sub, P., & Junghjoon, L. (2018). Real-Time Monitoring of Electroconductivity in Plants with Microscale Needle Probes. *Environ Control Biol*, 131. doi:<https://doi.org/10.2525/ecb.56.131>

Fertilab. (s.f.). *El pH y la CE de la Solución Nutritiva*.

Flores, M., González, E., & Escalona, V. (2020). Infraestructura para cultivos hidropónicos. *Centro de Estudio postcosecha (CEPOC)*, 4. Obtenido de <http://www.microhortalizas.uchile.cl/doc/fichas/1.%20Tipos%20de%20invernaderos.pdf>

Fraile Robayo, R. D., Álvarez Herrera, J. G., Reyes M., A. J., & Álvarez Herrera, O. F. (2017). Evaluation of the growth and quality of lettuce (*Lactuca sativa* L.) in a closed recirculating hydroponic system. *Agronomía Colombiana*, 217.

Garbi , M., & Puerta, A. V. (2021). Simposio Internacional virtual de cultivo en sustrato e hidroponía. *Congreso Argentino de Horticultura*, 41.

Geek Factory. (s.f.). Recuperado el 21 de Junio de 2021, de Geek Factory: <https://www.geekfactory.mx/tienda/sensores/ds18b20-sensor-de-temperatura-sumergible/>

Goho. (s.f.). *Groho*. Recuperado el 19 de Junio de 2021, de <https://www.groho.es/post/crea-tu-propio-sistema-de-raiz-flotante-casero>

Google. (s.f.). *Google Cloud*. Recuperado el 16 de mayo de 2021, de <https://cloud.google.com>

Gutierrez Leon, E., Montiel Argujo, J., Carreto Arellano, C., & Menchaca García, F. R. (2019).

Propuesta de sistema de gestión inteligente basado en IoT para hidroponia. *Research in Computing Science*. Obtenido de https://rcs.cic.ipn.mx/2019_148_10/Propuesta%20de%20sistema%20de%20gestion%20inteligente%20basado%20en%20IoT%20para%20hidroponia.pdf

Hach. (s.f.). *medidor de pH para laboratorio HQ440D*. Recuperado el 21 de Junio de 2021, de latamhach.

hardzone. (2019 de Octubre de 2019). Recuperado el 1 de Julio de 2021, de hardzone.

Hidrocultiva. (s.f.). *hidrocultiva.com*. Recuperado el 18 de Junio de 2021, de <https://hidrocultiva.com/tipo-de-sustrato-para-hidroponia/>

Hidrocultiva. (s.f.). *Sustrato de fibra de coco*. Recuperado el 18 de Junio de 2021, de Hidrocultiva: <https://hidrocultiva.com/tipo-de-sustrato-para-hidroponia/>

Hidrocultiva. (s.f.). *Sustrato Mineral de Perlita para Plantar en Hidroponía*. Recuperado el 18 de Junio de 2021, de Hidrocultiva: <https://hidrocultiva.com/tipo-de-sustrato-para-hidroponia/>

Hidroenviroment. (s.f.). *Hidroenviroment*. Recuperado el 11 de 05 de 2021, de https://www.hydroenv.com.mx/catalogo/index.php?main_page=page&id=221

Hinojosa Pinto, S. (2019). Diseño de una arquitectura IoT para el control de sistemas hidropónicos. *RiuNet Repositorio Institucional UPV*. Obtenido de <https://riunet.upv.es/handle/10251/127335>

IBM. (s.f.). Recuperado el 16 de mayo de 2021, de <https://www.ibm.com/watson>

La Red de Electrónicas. (s.f.). Recuperado el 21 de Junio de 2021, de La Red de Electrónicas: https://laredelectronicas.mercadoshops.com.co/MCO-623544505-sensor-de-luminosidad-digital-bh1750-_JM

Lara Herrera, A. (1999). Manejo de la solución nutritiva en la producción de tomate en hidroponía. *Terra Latinoamericana*.

López Elías, J. (2018). *Hydroponic production of crops*. Idesia.

doi:<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292018005000801>

Mafla Tapia, E. G. (2015). *Respuesta de tres variedades de lechuga (Lactuca sativa L.) Con tres niveles*. El Ángel: Universidad Técnica de Babahoyo.

Martinez Jacobson, R. (2017). *Comparativa y estudio de plataformas IoT*.

Materiales laboratorio. (2021). Recuperado el 22 de Junio de 2021, de materialeslaboratorio:
<https://materialeslaboratorio.com/luxometro/>

Melgarejo Moreno, P., Navarro Quercop, A., Legua Murcia, P., & Lidón Noguera, L. (2002). *La iluminación en los invernaderos*. Limencop S.L.

Mercado libre. (s.f.). *Lana de roca hidropónica*. Obtenido de Mercado Libre:
https://articulo.mercadolibre.com.ar/MLA-755563746-maceta-cubo-taco-lana-de-roca-hidroponia-x-4-unidades-_JM

Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG). (9 de Septiembre de 2019). *Agricultura, la base de la economía y la alimentación*. Recuperado el 4 de Mayo de 2021, de agricultura:
<https://www.agricultura.gob.ec/agricultura-la-base-de-la-economia-y-la-alimentacion/>

Ministerio de Agricultura y Ganadería. (3 de Septiembre de 2019). *Ecuador es el país socio de la FRUIT LOGISTICA 2020*. Recuperado el 4 de Mayo de 2021, de <https://www.agricultura.gob.ec/ecuador-es-el-pais-socio-de-la-fruit-logistica-2020/>

Moreno Miranda, C., Moreno Miranda , R., Pilamala Rosales, A. A., Molina Sánchez, J. I., & Cerdá Mejía, L. (2 de Diciembre de 2018). El sector hortofrutícola de Ecuador: Principales características socio-productivas de la red agroalimentaria de la uvilla (*Physalis peruviana*). *Ciencia y Agricultura*.
doi:<https://doi.org/10.19053/01228420.v16.n1.2019.8809>

Moreno Montenegro, F. G., Montejo, P., & Polanco Risquet, A. (2019). Sistema Automático para Cultivos Hidropónicos. *Ciencia digital*, 3.
doi:<https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v9i2.409>

Musa, P., Sugeru, H., & Fadhila Mufza, H. (2019). An intelligent applied Fuzzy Logic to prediction the. *IEEE Xplore*, 3. doi:10.1109/ICIC47613.2019.8985712

Pertierra Lazo, R., & Quispe Gonzabay, J. (1 de Marzo de 2020). Análisis económico de lechugas hidropónicas bajo sistema raíz flotante en clima semiárido . *La Granja: Revista Ciencias de la Vida*, 6. doi:<http://doi.org/10.17163/lgr.n31.2020.09>

Pertierra Lazo, R., & Quispe Gonzabay, J. (2020). ECONOMIC ANALYSIS OF HYDROPONIC LETTUCE UNDER FLOATING ROOT SYSTEM IN SEMI-ARID CLIMATE. *La granja revista de ciencias de la vida*, 5. doi:<http://orcid.org/0000-0001-8938-9849>

Perushop. (s.f.). *Lechuga seda.* Obtenido de Perushop:
<http://www.perushop.com.pe/producto/lechuga-seda/>

Quiroga Montoya, E. A., Jaramillo Colorado, S. F., Campo Muñoz, W. Y., & Chanchí Golondrino, G. E. (2016). Propuesta de una Arquitectura para Agricultura de Precisión Soportada en IoT. *Revista Ibérica de Sistema y Tecnologías de Información*. doi: 10.17013/risti.24.39–56

Quispe Tinta, G. (2018). EVALUACIÓN DE COSTOS DE PRODUCCION DE LA LECHUGA (Lactuca sativa L.) EN CARPA SOLAR, BAJO RIEGO POR GOTEO EN EL CENTRO EXPERIMENTAL DE COTA COTA. *Repository UMSA.* Obtenido de <https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/18499/T-2570.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Raspberry. (s.f.). *About us.* Recuperado el 1 de Julio de 2021, de <https://www.raspberrypi.org/about/>

Raspberry. (s.f.). *Raspberry Pi 4.* Recuperado el 1 de Julio de 2021, de <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-4-model-b/>

Raspberry. (s.f.). *Research and Insights.* Recuperado el 1 de Julio de 2021, de <https://www.raspberrypi.org/research-and-insights/>

Red Hidrometeorológica de Tungurahua. (2021). *Baños Parque de la Familia Promedios horarios, diarios y mensuales.* Obtenido de <https://rrnn.tungurahua.gob.ec/red/estaciones/estacion/530b84ed74daaf23bce53ce9>

Ricardo Morales, J. J. (2019). EVALUACIÓN DEL CULTIVO DE LECHUGA HIDROPÓNICA (*Lactuca sativa L.*) EN RAÍZ FLOTANTE BAJO DIFERENTES SOLUCIONES NUTRITIVAS. *Repositorio Dspace*. Obtenido de <http://repositorio.upse.edu.ec:8080/jspui/handle/46000/4808>

Rincón Guerrero, N., Olarte Quintero, M. A., & Pérez Naranjo, J. C. (2012). Determinación del Área Foliar en Fotografías Tomadas con una Cámara Web, un Teléfono Celular o una Cámara Semiprofesional. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*. Obtenido de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/refame/article/view/30766>

Ruiz, C. (13 de Noviembre de 2018). Recuperado el 10 de Mayo de 2021, de openlanuza: <https://openlanuza.com/cultivo-hidropónico-inteligente-controlado-por-arduino/>

Saldarriaga Quiroz, M. (2020). *Solución IoT aplicada al cultivo de tomates en Colombia*. Re-Unir.

Serenidad ec. (s.f.). *Serenidad*. Obtenido de <https://www.serenidad.ec/shop/organics/productos-naturales-y-organicos/hierbas-aromaticas/lechuga-crespa-verde-organica/>

Sharma, N., Acharya, S., Kumar, K., Singh, N., & Chaurasia, O. (2018). Hydroponics as an advanced technique for vegetable. *Journal of Soil and Water Conservation*, 366. doi:10.5958/2455-7145.2018.00056.5

Sharma, N., Acharya, S., Kumar, K., & Chaurasia, O. (2019). Hydroponics as an advanced technique for vegetable production. *Journal of Soil and Water Conservation*.

Shopee. (s.f.). *PH Sensor probe*. Recuperado el 21 de Junio de 2021, de Shopee.

Torres P., A., & Leris G., L. (2020). Técnicas de producción de hortalizas en sistemas hidropónicos. *Instituto de Investigaciones Agropecuarias INIA LA CRUZ*. Obtenido de <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/123456789/67022/NR42151.pdf?sequencia=1>

Ubidots. (s.f.). *Ubidots*. Recuperado el 16 de mayo de 2021, de <https://ubidots.com/about/> Verdegen. (8 de Abril de 2017). *generacion verde*. Recuperado el 18 de Junio de 2021, de <https://generacionverde.com/blog/hidroponia/tipos-de-sistemas-hidroponicos/>

Verdegen. (8 de Abril de 2017). *Sistemas de hidroponía*. Obtenido de Generación verde: <https://generacionverde.com/blog/hidroponia/tipos-de-sistemas-hidroponicos/>

Verdegen. (8 de Abril de 2017). *Técnica de Mecha*. Recuperado el 18 de Junio de 2021, de
Generación verde: <https://generacionverde.com/blog/hidroponia/tipos-de-sistemas-hidroponicos/>

Anexo A. Código implementado en el dispositivo 1

```
1 #include "Ubidots.h"
2 #define D0 16 //GPIO16 Definición de puertos
3 #define D1 5 //GPIO5
4 #define D2 4 //GPIO4
5 #define D3 0 //GPIO0
6 #define D4 2 //GPIO2
7 #define D5 14 //GPIO14
8 #define RX 3 //GPIO3
9 #define TX 1 //GPIO1
10 #define DEVICE "dispositivo2" // nombre del dispositivo
11 #define ID_TEMP_AGUA "temp_agua"
12 #define ID_PPM "ppm"
13 #define TOKEN "BBFF-4n0GZJwpgrxgQ7xxxxxxxxxJTg" // Tpken de acceso
14 #define WIFISSID "Marciital" // nombre del SSID
15 #define PASSWORD "mar*27" // contraseña de la red SSID
16 #define ONE_WIRE_BUS 2
17 #include <NTPClient.h>
18 #include <WiFiUdp.h>
19 Ubidots client(TOKEN);
20 WiFiUDP ntpUDP;
21 const long utcOffsetInSeconds = -18000; // definición de zona horaria
22 float Valor_Temperatura = 0;
23 float Valor_Humedad = 0;
24 bool cont=true;
25 const byte Obj_DHT11 = D4;
26 unsigned int acumulador;
27 unsigned luxprom;
28 NTPClient timeClient(ntpUDP, "pool.ntp.org", utcOffsetInSeconds); // librería para obtener la hora
29 #include <EEPROM.h>
30 #include "GravityTDS.h"
31
32
33 #include <OneWire.h>
34 #include <DallasTemperature.h>
35
36
37 OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
38 GravityTDS gravityTds;
39
40 DallasTemperature sensors(yoneWire);
41
42 int ppm=0;
43 const int bombaA=12;
44 const int bombaB=13;
45 const int bombaC=15;
46 int minuto;
47 bool cont;
48 namespace pin
49 {
50 const byte tds_sensor = A0; // TDS Sensor
51 }
52
53 namespace device
```

```
54 {
55 float aref = 3.3;
56 }
57
58 namespace sensor
59 {
60 float ec = 0;
61 unsigned int tds = 0;
62 float ecCalibration = 1;
63 }
64 float rawEc;
65 double waterTemp;
66 float temperatureCoefficient;
67 void setup()
68 {
69   Serial.begin(115200); // Debugging on hardware Serial 0
70   sensors.begin();
71   client.wifiConnect(WIFISSID, PASSWORD);
72   timeClient.begin();
73 }
74
75
76 void loop() //mide TDS, LUX,temperatura y humedad relativa y
77 temperatura del agua cada media hora
78 {
79   timeClient.update(); // obtener hora
80   minuto=timeClient.getMinutes();
81   if(minuto==0 || minuto==30){
82     if (cont==true){
83       medirTDS();
84       leerDHT();
85       cont=false;
86     }
87   }
88
89   if(minuto==15 || minuto==45) {
90     cont=true;
91   }
92
93 }
94
95 void medirTDS() {
96
97   sensors.requestTemperatures(); //bloque para leer el sensor de TDS
98   waterTemp = sensors.getTempCByIndex(0); // adquiere el valor del
99   sensor de temperatura DS18b20
100  rawEc = analogRead(pin:::tds_sensor) * device:::aref / 1023.0;
101  temperatureCoefficient = 1.0 + 0.02 * (waterTemp - 25.0);
102
103  sensor:::ec = (rawEc / temperatureCoefficient) *
104 sensor:::ecCalibration;
105  sensor:::tds = (133.42 * pow(sensor:::ec, 3) - 255.86 * sensor:::ec *
106 sensor:::ec + 857.39 * sensor:::ec) * 0.5; //conversión de voltaje a
107 valor de TDS
108  ppm=(sensor:::tds)*4.4382-706.18;
109  Serial.print(F("Temperature:")); Serial.println(waterTemp,2);
110  Serial.print(F(""));
```

```
111 Serial.print(F("PPM:")); Serial.println(ppm);
112 client.add(ID_TEMP_AGUA,waterTemp);
113 client.add(ID_PPM,ppm);
114 client.send();
115
116 if(ppm<1500) {
117     analogWrite(bombaB,1023);
118     analogWrite(bombaC,1023);
119     delay(3000);
120     analogWrite(bombaB,0);
121     analogWrite(bombaC,0);
122     analogWrite(bombaA,1023);
123     delay(6000);
124     analogWrite(bombaA,0);
125 }
126 delay(30000);
127 }
128
129 void leerDHT(){
130     float h = Obj_DHT.readHumidity(); //Lee la humedad
131     float t = Obj_DHT.readTemperature(); //Lee la temperatura en grados
132 centigrados (Valor por defecto)
133
134     // verifica si alguna lectura ha fallado
135     if (isnan(h) || isnan(t)) {
136         Serial.println("Existe un error en la lectura del sensor DHT11");
137         return;
138     }
139
140     Valor_Temperatura = t;
141     Valor_Humedad = h;
142
143
144     client.add(ID_TEMP, Valor_Temperatura);
145     client.add(ID_HUM, Valor_Humedad);
146     client.send();
147     delay(100);
148     leerLux();
149 }
150 void leerLux(){
151     acumulador=0;
152     for(int i=0;i<10;i++) {
153         unsigned int lux = sensor.readLightLevel(); // lee y almacena
154 lectura de sensor
155         acumulador=lux+acumulador;
156         //Serial.print("Nivel: "); // muestra texto
157         //Serial.print(lux); // muestra valor de variable lux
158         //Serial.println(" lx"); // muestra texto y salto de linea
159         delay(200); // demora de 1 seg.
160     }
161     luxprom=acumulador/10;
162     Serial.println(luxprom); // muestra texto y salto de linea
163     client.add(ID_LUX, luxprom);
164     client.send();
165 }
166 void leerLux(){
167     acumulador=0;
```

```
168     for (int i=0; i<10; i++) {  
169         unsigned int lux = sensor.readLightLevel(); // lee y almacena  
170         lectura de sensor  
171         acumulador=lux+acumulador;  
172  
173         delay(200); // demora de 1 seg.  
174         }  
175         luxprom=acumulador/10;  
176         Serial.println(luxprom); // muestra texto y salto de linea  
177         client.add(ID_LUX, luxprom);  
178         client.send();  
179     }  
180
```

Anexo B. Código implementado en el dispositivo 2

```
1 #include "Ubidots.h"
2 #define D0 16 //GPIO16
3 #define D1 5 //GPIO5
4 #define D2 4 //GPIO4
5 #define D3 0 //GPIO0
6 #define D4 2 //GPIO2 - TXD1
7 #define D5 14 //GPIO14 - HSCLK
8 #define D6 12 //GPIO12 - HMISO
9 #define D7 13 //GPIO13 - HMOXI - RXD2
10 #define D8 15 //GPIO15 - HCS - TXD2
11 #define RX 3 //GPIO3 - RXD0
12 #define TX 1 //GPIO1 - TXD0
13 #define DEVICE "ph" // nombre el dispositivo2
14 #define ID_PH "valor_ph"
15 #define TOKEN "BBFF-4n0GZJwpxxxxxxxxv63oII1JGK" // Token de acceso
16 #define WIFISSID "Marcianital" // Put here your Wi-Fi SSID
17 #define PASSWORD "marcia*27" // Put here your Wi-Fi password
18 // #define WIFISSID "Velastegui" // Put here your Wi-Fi SSID
19 // #define PASSWORD "donxxxxo" // Put here your Wi-Fi password
20 #include <NTPClient.h>
21 #include <WiFiUdp.h>
22 Ubidots client(TOKEN);
23 WiFiUDP ntpUDP;
24 const long utcOffsetInSeconds = -18000;
25 bool cont=true;
26 NTPClient timeClient(ntpUDP, "pool.ntp.org", utcOffsetInSeconds);
27 int ph_pin = A0; //This is the pin number connected to Po
28 int buf[10],temp;
29 double voltaje;
30 unsigned long int avgValue;
31 int medida;
32 int pwmPin = D8; // Pin controlado por PWM
33 const int luz=D6;
34 const int bomba=D7;
35 float pHVol;
36 float phValue=5.4;
37 int minuto;
38 int hora;
39 void setup() {
40   pinMode(D1,INPUT);
41   pinMode(bomba,OUTPUT);
42   pinMode(luz,OUTPUT);
43   Serial.begin(9600);
44   digitalWrite(bomba,HIGH);
45   digitalWrite(luz,HIGH);
46   client.wifiConnect(WIFISSID, PASSWORD);
47   timeClient.begin();
48 }
49
50 void loop() {
51
52 //delay(15000);
53 if(digitalRead(D1)==LOW) {
```

```
54     medir();  
55 }  
56 timeClient.update();  
57 minuto=timeClient.getMinutes();  
58 hora=timeClient.getHours();  
59     if(minuto==0 || minuto==30){  
60         if(cont==true){  
61             medir();  
62             cont=false;  
63         }  
64     }  
65  
66     if(minuto==15 || minuto==45){  
67         cont=true;  
68     }  
69  
70  
71         if(hora>=18 yy hora<=21){  
72             digitalWrite(luz,LOW);  
73         }  
74     else{  
75         digitalWrite(luz,HIGH);  
76     }  
77  
78  
79         if(hora==9 yy minuto<=30 || hora==21 yy minuto<=30){  
80             digitalWrite(bomba,LOW);  
81         }  
82     else{  
83         digitalWrite(bomba,HIGH);  
84     }  
85  
86     delay(10000);  
87 }  
88  
89  
90  
91  
92 void medir(){  
93     for(int i=0;i<10;i++)  
94     {  
95         buf[i]=analogRead(ph_pin);  
96         delay(10);  
97     }  
98     for(int i=0;i<9;i++)  
99     {  
100         for(int j=i+1;j<10;j++)  
101         {  
102             if(buf[i]>buf[j])  
103             {  
104                 temp=buf[i];  
105                 buf[i]=buf[j];  
106                 buf[j]=temp;  
107             }  
108         }  
109     }  
110     avgValue=0;
```

```
111 for(int i=2;i<8;i++)  
112 avgValue+=buf[i];  
113 pHVol=(float)avgValue*3.3/1024/6;  
114 phValue = -5.7345 * pHVol + 22.65;  
115 //Serial.print("sensor = ");  
116 Serial.println(phValue);  
117 Serial.println(pHVol,3);  
118 client.add(ID_PH, phValue);  
119 client.send();  
120  
121  
122 if(phValue>5.5){  
123     analogWrite(pwmPin,1024);  
124     digitalWrite(bomba,LOW);  
125     delay(2000);  
126     analogWrite(pwmPin,0);  
127     }  
128 else{  
130     analogWrite(pwmPin,0);  
131     digitalWrite(bomba,HIGH);  
132     }  
133     delay(1000);  
134 }  
135
```

Anexo C. Formato en el que se almacenan los datos de las variables críticas

Cada variable se almacena en formato CSV (*comma separated values*). A continuación, se muestra el formato con el que están almacenadas las variables.

```
timestamp,temperatura,context_temperatura,date
1629514866970,17.600000381469727,{},2021-08-20 22:01:06.970000-05:00
1629513064958,18.0,{},2021-08-20 21:31:04.958000-05:00
1629511265741,17.899999618530273,{},2021-08-20 21:01:05.741000-05:00
1629509467687,17.799999237060547,{},2021-08-20 20:31:07.687000-05:00
1629507669474,18.200000762939453,{},2021-08-20 20:01:09.474000-05:00
1629505870882,18.600000381469727,{},2021-08-20 19:31:10.882000-05:00
```

En el formato presentado se encuentra en la cabecera 4 títulos los cuales son: timestamp,temperatura, context_temperatura y date.

Timestamp: el primer encabezado se refiere a la marca del tiempo. Es decir, es un identificador para saber en que momento se guardó dicha información.

Temperatura: el segundo encabezado hace referencia al nombre de la variable almacenada.

Context_temperatura: el tercer encabezado hace referencia a un comentario adicional para el dato almacenado en caso de ser necesario.

Date: el cuarto encabezado hace referencia a la fecha y hora en que se almacenó el dato.

Este formato es utilizado para cada variable crítica, debido a que la información generada es extensa se ha publicado los archivos CSV en el siguiente enlace:
https://mega.nz/file/Sd5QzDSR#Gy33XNpRE2_jh6RG6jKSH279mtUUlcOXQYeBqG4VwEo

Anexo D. Fotografías del consumo de corriente en los diferentes estados del sistema hidropónico moderno

Fotografía del consumo de corriente cuando el sistema está recolectando datos



Fotografía cuando se encuentra la bomba de agua activada más recolección de datos



Fotografía de la luz artificial de crecimiento activada en conjunto con la bomba de agua



Fotografía de la luz artificial de crecimiento activada

