



UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

GESTIÓN DE BIBLIOTECAS

CARTA DE AUTORIZACIÓN



CÓDIGO	AP-BIB-FO-06	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	1 de 1
--------	--------------	---------	---	----------	------	--------	--------

Neiva, 15 de marzo del 2023

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

El (Los) suscrito(s):

DIEGO ALEJANDRO CADENA, con C.C. No. 1075288622,

YEISSON STEPHEN OLIVEROS YARA, con C.C. No. 1082805186,

Autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado

titulado “CONTROL Y MONITOREO DE LAS VARIABLES FÍSICO QUÍMICAS DE LA SOLUCIÓN NUTRITIVA DEL CULTIVO DE LECHUGA HIDROPÓNICA” presentado y aprobado en el año 2023 como requisito para optar al título de Ingeniero Electrónico;

Autorizo (amos) al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que, con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales “open access” y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.
- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.
- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que, de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores”, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Diego Alejandro Cadena
Firma: _____

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Yeisson Stephen Oliveros
Firma: _____

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO

CÓDIGO

AP-BIB-FO-07

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

1 de 3



TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: CONTROL Y MONITOREO DE LAS VARIABLES FÍSICO QUÍMICAS DE LA SOLUCIÓN NUTRITIVA DEL CULTIVO DE LECHUGA HIDROPÓNICA

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Oliveros Yara	Yeisson Stephen
Cadena	Diego Alejandro

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Robayo Betancourt	Faiber

ASESOR (ES):

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Ingeniero Electrónico

FACULTAD: Ingeniería

PROGRAMA O POSGRADO: Ingeniería Electrónica

CIUDAD: Neiva AÑO DE PRESENTACIÓN: 2023 NÚMERO DE PÁGINAS: 78

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):

Diagramas Fotografías Grabaciones en discos Ilustraciones en general Grabados
Láminas Litografías Mapas Música impresa Planos Retratos Sin ilustraciones Tablas o Cuadros

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO

CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	2 de 3
--------	--------------	---------	---	----------	------	--------	--------

SOFTWARE requerido y/o especializado para la lectura del documento:

MATERIAL ANEXO: SI

PREMIO O DISTINCIÓN (*En caso de ser LAUREADAS o Meritoria*):

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

<u>Español</u>	<u>Inglés</u>	<u>Español</u>	<u>Inglés</u>
1. Base de datos	Database	6. Sistemas de control	Control systems
2. Conductividad	Conductivity	7. Temperatura	Temperature
3. Cultivos hidropónicos	Hydroponic Crops	8. _____	_____
4. Monitoreo de variables	Variable monitoring	9. _____	_____
5. pH	pH	10. _____	_____

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

Este proyecto presenta el diseño e implementación de un control y monitoreo de las variables fisco-químicas de un cultivo hidropónico de lechugas, implementando sensores para la adquisición y medición de variables como temperatura, PH y conductividad eléctrica. La primera fase del proyecto contiene los antecedentes de los cultivos hidropónicos, con el propósito de dejar en claro que es la hidroponía y sus diferentes tipos de "sistema". La segunda fase contiene los elementos de un sistema NFT (la técnica de la película nutritiva), los requerimientos del cultivo hidropónico de lechuga, una breve introducción a que son los sistemas de automatización y el uso de algunos de ellos junto con algunos componentes usados. La tercera fase explica el sistema de control usado para el desarrollo de este proyecto juntos con los componentes usados.



DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO

CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	3 de 3
--------	--------------	---------	---	----------	------	--------	--------

ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

This project presents the design and implementation of a control and monitoring of the physico-chemical variables of a hydroponic lettuce crop, implementing sensors for the acquisition and measurement of variables such as temperature, pH and electrical conductivity. The first phase of the project contains the background of hydroponic crops, with the purpose of making clear what hydroponics is and its different types of "system". The second phase contains the elements of an NFT (Nutrient Film Technique) system, the requirements of hydroponic lettuce cultivation, a brief introduction to what automation systems are and the use of some of them along with some of the components used. The third phase explains the control system used for the development of this project along with the components used.

APROBACION DE LA TESIS

Nombre Presidente Jurado:

Firma:

Nombre Jurado: Yamil Armando Cerquera Rojas

Firma: *Yamil Armando Cerquera Rojas*

Nombre Jurado: Diego Fernando Sendoya Losada

Firma: *Diego Fernando Sendoya*.

CONTROL Y MONITOREO DE LAS VARIABLES FÍSICO QUÍMICAS DE LA SOLUCIÓN NUTRITIVA DEL CULTIVO DE LECHUGA HIDROPÓNICA.

MODALIDAD: PROYECTO DE GRADO

DIEGO ALEJANDRO CADENA
YEISSON STEPHEN OLIVEROS

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
NEIVA – HUILA
2023

CONTROL Y MONITOREO DE LAS VARIABLES FÍSICO QUÍMICAS DE LA SOLUCIÓN NUTRITIVA DEL CULTIVO DE LECHUGA HIDROPÓNICA.

MODALIDAD: PROYECTO DE GRADO

DIEGO ALEJANDRO CADENA (Cód. 20162151279)
YEISSON STEPHEN OLIVEROS (Cód. 20162151819)

Línea de propuesta:
Control e Instrumentación.

Director:
Ing. Mag. FAIBER ROBAYO BETANCOURT

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
NEIVA – HUILA
2023

Notas de aceptación

Firma del director de Tesis

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Neiva, 14 de febrero de 2023

DEDICATORIA

A mi madre por darme la oportunidad de estudiar y formarme como Ingeniero Electrónico.

A mis abuelos por su incansable apoyo moral durante toda mi carrera.
Y a mi compañero por su gran ayuda todos estos años.

Diego Alejandro Cadena

Le dedico el resultado de este trabajo a mi padre Yamil Oliveros y a mi madre María Cristina Yara. Gracias por todo el apoyo que me brindaron durante el desarrollo de esta tesis, sin su ayuda y apoyo incondicional no hubiera logrado afrontar todas las dificultades y tropiezos durante su implementación.

También quiero dedicarle esta Tesis a mi hermano Eder Alberto Oliveros, que gracias a su guía y consejos como ingeniero agrícola me ayudo a afrontar las diferentes dificultades presentadas durante el desarrollo del trabajo.

De una manera muy especial quiero dedicarle el resultado de este trabajo a mi novia Claudia Zulieh Castillo. Le agradezco por su paciencia, compresión, empeño y apoyo incondicional en todos los aspectos de mi vida, especialmente en esos momentos más difíciles, donde de no ser por ella, no hubiera logrado seguir adelante con mi formación académica.

Yeisson Stephen Oliveros

AGRADECIMIENTOS

A mi familia que siempre fue un apoyo de mi proceso de formación académica y moral. Al Ingeniero Faiber Robayo director del presente proyecto, por su guía en el desarrollo del proyecto. A todos los docentes del programa que, durante el transcurso del proceso de mi formación, impartieron sus conocimientos de forma que me fue posible llegar hasta este punto.

Diego Alejandro Cadena

A mis padres que gracias a su guía y apoyo he logrado formarme como persona y ahora como ingeniero electrónico. Agradecer de una manera muy especial a mi hermano Eder Alberto Oliveros que me ha servido de inspiración al ser el primero de la familia en obtener un título universitario. Al ingeniero Faiber Robayo, que gracias a sus conocimientos y aportes durante mi formación académica logré culminar con éxito mis estudios. Agradecer a todos los docentes que me impartieron sus conocimientos guiándome durante mi formación académica.

Yeisson Stephen Oliveros

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
2. JUSTIFICACIÓN	17
3. OBJETIVOS	18
3.1. OBJETIVO GENERAL	18
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
4. MARCO TEÓRICO	19
4.1. CULTIVOS HIDROPÓNICOS	19
4.2. ELEMENTOS DE UN SISTEMA NFT	22
4.3. REQUERIMIENTOS DEL CULTIVO DE LECHUGA HIDROPÓNICA	23
4.3.1. Requerimientos nutricionales	23
4.3.2. Requerimientos de PH	23
4.3.3. Requerimientos de CE	24
4.3.4. Requerimientos en temperatura de la solución	24
4.4. SISTEMAS DE AUTOMATIZACIÓN	24
4.4.1. Automatización en hidroponía	24
4.5. RASPBERRY	26
4.5.1. Raspberry pi 4 B	26
4.6. ARDUINO	27
4.6.1. Arduino mega	27
5. SISTEMA DE CONTROL	29
5.1. ETAPA DE ADQUISICIÓN DE DATOS	29
5.1.1. Pulsador	29
5.1.2. Sensor de pH	31
5.1.3. Sensor de CE	33
5.1.4. Sensor de Temperatura	35
5.1.5. Sensor de presión diferencial	36
5.2. ETAPA DE PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN	37
5.2.1. Comunicación entre el Arduino mega y la Raspberry pi	38
5.2.2. Control de pH y CE	38
5.2.2.1. Cálculo de solución nutritiva en los canales de producción	39

5.2.2.2. Corrección de pH	42
5.2.2.3. Corrección de CE	43
5.2.3. Control de Temperatura y Nivel	44
5.2.4. Creación de archivos	47
5.2.5. Base de datos	47
5.2.6. Aplicación móvil	49
5.2.7. Aplicación web	53
6. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL	56
6.1. PRUEBAS DE CONEXIÓN ENTRE ARDUINO Y RASPBERRY PI	56
6.2. CALIBRACIÓN DE SENSORES DE PH Y CE	56
6.3. MONTAJE DEL SISTEMA DE CONTROL	57
6.4. CONEXIÓN DE LOS ELEMENTOS DE CONTROL	59
6.5. INSTALACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL	60
6.6. PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA DE CONTROL	60
6.6.1. Preparativos iniciales	60
6.6.2. Seguimiento de variables	62
6.6.3. Seguimiento del desarrollo del cultivo hidropónico	64
7. CONCLUSIONES	69
8. RECOMENDACIONES	70
BIBLIOGRAFÍA	71
ANEXOS	75

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Sistema hidropónico de flujo y reflujo	19
Figura 2. Sistema Aeropónico.	20
Figura 3. Sistema de Raíz flotante	20
Figura 4. Sistema hidropónico por goteo	21
Figura 5. Sistema hidropónico de mecha	21
Figura 6. Sistema hidropónico NFT	22
Figura 7. Componentes de sistema NFT	23
Figura 8. Tecnología IRONOX	25
Figura 9. Cultivo hidropónico en las instalaciones de UrbanKisaan.	25
Figura 10. PlanToGo	26
Figura 11. Raspberry pi 4B	27
Figura 12. Placa Arduino Mega	28
Figura 13. Cultivo de lechuga hidropónica	28
Figura 14. Pulsadores	29
Figura 15. Resistencia PULL-UP Y PULL-DOWN	30
Figura 16. Lectura de pH.	30
Figura 17. Kit de medición de pH	31
Figura 18. Medidor de pH HI 98131	31
Figura 19. Comportamiento del ácido con la sonda de AtlasScientific y el medidor de HANNA instruments	32
Figura 20. Comportamiento de la base con la sonda de pH AtlasScientific y el medidor de HANNA instruments	32
Figura 21. Lectura de la CE.	33
Figura 22. Kit de medición de CE	34
Figura 23. Comportamiento del CE en la sonda de CE AtlasScientific y el medidor de HANNA instruments	34
Figura 24. Sensor de temperatura DS18B20	35
Figura 25. Conexión del sensor DS18B20	35
Figura 26. Sensor de presión diferencial MPX5500	36
Figura 27. Modulo Relé	37
Figura 28. Bomba peristáltica	37
Figura 29. Mini bomba sumergible.	38
Figura 30. Diagrama de flujo del control de pH y CE	39
Figura 31. Nivel de solución en las tuberías	39
Figura 32. Representación gráfica de cálculos geométricos	40
Figura 33. Triángulo formado por los puntos AOB	40
Figura 34. Triángulo formado por los puntos COB	40
Figura 35. Función de Control del pH	42
Figura 36. Función de control del CE	43
Figura 37. Diagrama de control de temperatura y nivel	44
Figura 38. Electrobombas del sistema hidropónico	45
Figura 39. Aire acondicionado como chiller casero	45

Figura 40. Control de Temperatura de la solución nutritiva	46
Figura 41. Electroválvula	46
Figura 42. Control de nivel	46
Figura 43. Estructura de la base de datos	47
Figura 44. Formato JSON del archivo en Firebase	48
Figura 45. Valores en tiempo real	48
Figura 46. Pantalla de inicio app Móvil	49
Figura 47. Pantalla de valores en tiempo real	50
Figura 48. Pantalla de selección de archivos para graficarlos.	51
Figura 49. Grafica de conductividad	52
Figura 50. Grafica de pH	52
Figura 51. Grafica de Temperatura	52
Figura 52. página de inicio aplicación Web	53
Figura 53. Vista de valores en tiempo real	53
Figura 54. Grafica del pH	54
Figura 55. Grafica del CE	54
Figura 56. grafica de Temperatura	55
Figura 57. Ventana descargar	55
Figura 58. Pruebas de funcionamiento del Script de Python	56
Figura 59. Calibración a tres puntos de sonda de pH	57
Figura 60. Calibración a dos puntos de la sonda de CE	57
Figura 61. Ubicación de los elementos de control	58
Figura 62. Conexión de los componentes de control.	59
Figura 63. Montaje del sistema de control	60
Figura 64. Adición de los nutrientes a los recipientes contenedores	61
Figura 65. Trasplante de plántulas a los tubos de producción	61
Figura 66. Identificación del módulo de control automático y control manual	62
Figura 67. Comportamiento del pH	63
Figura 68. Comportamiento del CE	63
Figura 69. Comportamiento de la Temperatura	64
Figura 70 Promedio de la cantidad de hojas de las lechugas	66
Figura 71. Promedio del tamaño de lechugas	66
Figura 72. Lechuga en control automático	67
Figura 73. Lechuga en control artesanal	67
Figura 74. Lechugas mas grandes de los dos módulos muestreados.	68

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Características técnicas de la Raspberry pi 4	26
Tabla 2. Horario de control	38
Tabla 3. Promedio de crecimiento del cultivo hidropónico	65
Tabla 4. Promedio de peso en gramos	67

LISTA DE ANEXOS

	Pág
Anexo A. Precio de equipos	75
Anexo B. Precio de materiales, insumos y servicios técnicos	75
Anexo C. Precio de software	76
Anexo D. Titulación del comportamiento del ácido	76
Anexo E. Titulación del comportamiento de la base	77
Anexo F. Titulación del comportamiento del CE	78

GLOSARIO

HIDROPÓNICOS: Según (Lens, 2016) son cultivos donde no se utiliza el suelo para cultivar, sino que se establecen en agua, la cual contiene todos los nutrientes que necesita una planta para crecer, de esta manera las raíces consumen todo lo que necesitan, haciéndose innecesario el uso del suelo.

CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (CE): En Hidroponía se explica que la conductividad eléctrica CE, está relacionada con la presencia de las sales minerales, ya que su disociación genera iones positivos (cationes) y negativos (aniones) capaces de transportar corrientes eléctricas a través de ellas.

TEMPERATURA: La temperatura tiene influencia sobre la concentración de oxígeno y la disponibilidad de nutrientes, si la temperatura se sitúa por debajo de los 12°C o mayor a 30°C la raíz deja de crecer.

PH: Permite identificar la cantidad de iones de Hidrógeno dentro de la solución nutritiva.

RASPBERRY: Una Raspberry pi es una computadora de bajo costo y con tamaño compacto, con sistema operativo Linux que puede ser conectada a un monitor de computadora o televisión, manejarse con un mouse y teclado estándar.

ARDUINO: Arduino es una tarjeta electrónica de código abierto basada en hardware y software libre, que se caracteriza por ser económico, multiplataforma y fácil de usar, a la que se le pueden incorporar diferentes sensores que le permiten percibir su entorno (entradas) y realizar diferentes acciones que alteran un ambiente definido (salidas).

NFT: Nutrient Film Technique, que como su nombre lo sugiere, es un sistema de cultivo de solución en el que una fina película de nutrientes fluye continuamente a lo largo de la base de pequeños canales en los que se encuentran los sistemas radiculares de las plantas.

RESUMEN

Este proyecto presenta el diseño e implementación de un control y monitoreo de las variables fisco-químicas de un cultivo hidropónico de lechugas, implementando sensores para la adquisición y medición de variables como temperatura, PH y conductividad eléctrica. La primera fase del proyecto contiene los antecedentes de los cultivos hidropónicos, con el propósito de dejar en claro que es la hidroponía y sus diferentes tipos de “sistema”. La segunda fase contiene los elementos de un sistema NFT (la técnica de la película nutritiva), los requerimientos del cultivo hidropónico de lechuga, una breve introducción a que son los sistemas de automatización y el uso de algunos de ellos junto con algunos componentes usados. La tercera fase explica el sistema de control usado para el desarrollo de este proyecto juntos con los componentes usados.

Palabras clave: *Base de datos, Conductividad, Cultivos hidropónicos, Monitoreo de variables, pH, Sistemas de control, Temperatura.*

ABSTRACT

This project presents the design and implementation of a control and monitoring of the physico-chemical variables of a hydroponic lettuce crop, implementing sensors for the acquisition and measurement of variables such as temperature, pH and electrical conductivity. The first phase of the project contains the background of hydroponic crops, with the purpose of making clear what hydroponics is and its different types of "system". The second phase contains the elements of an NFT (Nutrient Film Technique) system, the requirements of hydroponic lettuce cultivation, a brief introduction to what automation systems are and the use of some of them along with some of the components used. The third phase explains the control system used for the development of this project along with the components used.

Keywords: Conductivity, Control systems, Database, Hydroponic Crops, pH, Temperature, Variable monitoring.

INTRODUCCIÓN

La hidroponía es un sistema cerrado de cultivo en el que se emplean sustancias minerales en lugar de suelo para hacer que crezcan las plantas. Se puede sustituir la tierra por sustratos orgánicos, inorgánicos o sintéticos. Gracias a su gran adaptabilidad a distintos ambientes y condiciones climáticas, se piensa que la adopción de la hidroponía en todos los países podría solucionar la escasez de alimentos a nivel mundial (Puentes, n.d.).

Los sistemas hidropónicos son sistemas de producción dinámicos que permiten establecer distintos cultivos para diferentes necesidades, donde se pueden lograr rendimientos en el cultivo de arroz de 6 toneladas por hectárea (t/ha) en comparación de las 1.2 t/ha en cultivos en tierra, o en cultivos de lechuga de 23 t/ha contra las 6-10 t/ha al cultivarlas en tierra. Sin embargo, para lograr su máxima eficiencia se requiere suministrar capacitaciones especializadas al personal de campo o técnico encargado del cultivo (INTAGRI, 2017b).

En este sentido, el monitoreo y el respectivo control del pH, conductividad eléctrica (CE) y temperatura de la solución nutritiva es de vital importancia para lograr el mayor rendimiento posible de estos sistemas de producción, evitando de esta manera los costos innecesarios en adición de sales minerales o nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas, o la adición en exceso de químicos usados para estabilizar el pH de la solución; pues si se utilizan en exceso, podrían dañar seriamente el rendimiento del sistema hidropónico.

Por lo anterior, el presente trabajo busca construir un prototipo capaz de automatizar las correcciones de solución nutritiva requeridas por el cultivo hidropónico de lechuga, permitiéndole a los pequeños agricultores incursionar en sistemas de producción eficientes y amigables con el medio ambiente, reduciendo la necesidad de capacitaciones técnicas para la correcta implementación o control de las variables cruciales para el crecimiento o desarrollo del cultivo implementado.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Debido a los drásticos cambios climáticos que se están presentando a nivel mundial y el aumento de la temperatura, los cultivos convencionales están presentando deficiencias nutricionales y excesivo estrés hídrico, lo que causa una disminución significativa en la producción agropecuaria del país (National Geographic España, 2019). Además, la demanda de productos agropecuarios a nivel nacional y mundial ha venido en aumento en los últimos años, por lo que las familias a nivel global han comenzado a implementar nuevos sistemas de producción de alimentos, tales como los cultivos hidropónicos, técnica que permite cultivar plantas sin la utilización del suelo, logrando así ahorrar gran cantidad de agua y espacio (Morales-Casco & Zúñiga-González, 2016).

Tras la implementación de estos nuevos sistemas de producción han surgido retos para su desarrollo, los cuales en la mayoría de casos no son correctamente afrontados por los pequeños productores, lo que genera grandes pérdidas para aquellos que deciden innovar. Según (InfoAgro, 2020), dentro de los retos de producción más difíciles de solucionar se encuentran el mantener fijos los niveles de agua, Conductividad eléctrica (C.E), pH y nutrientes requeridos para los cultivos, todos estos factores son de vital importancia para obtener resultados satisfactorios en este tipo de producción.

Para finalizar, el Departamento Nacional de Planeación (DNP) ha puesto como meta que para el 2030 se tenga una sostenibilidad de estos sistemas de producción ya que podrían aportar una mejora a la problemática de hambruna del país y el desgaste de suelos (Rivera Arbeláez, 2020).

Dicho lo anterior es necesaria la formulación de la siguiente pregunta para dar solución a la problemática expuesta: ¿Cómo optimizar el proceso de producción de lechuga hidropónica mediante un control adecuado de los niveles de CE, pH y temperatura de la solución nutritiva?

2. JUSTIFICACIÓN

Gracias al desarrollo de cultivos hidropónicos se ha logrado sistematizar la agricultura a nivel mundial, permitiendo una tecnificación óptima en la producción intensiva de la mayoría de los productos agrícolas de los países desarrollados (Intagri, 2017a).

En la actualidad los servicios ofrecidos por las empresas de automatización de cultivos hidropónicos son demasiado elevados, haciendo casi imposible el acceso a campesinos que apenas están incursionando en este revolucionario sistema de producción. La implementación de un sistema de control basado en software libre para la automatización del cultivo de lechuga hidropónica es una solución fiable y de bajo costo.

Tras la implementación de un sistema inteligente que ayude a monitorear y tomar decisiones cruciales en tiempo real de las principales propiedades del agua de los cultivos de lechuga hidropónica, se le estaría brindando una ayuda eficiente y de fácil manejo a los agricultores que decidan embarcarse en esta nueva estrategia de producción, pues esta herramienta simplificará los procedimientos de control de calidad y ahorro del preciado recurso hídrico, permitiendo invertir mayor tiempo para el manejo del cultivo en crecimiento. De igual manera, se contará con una base de datos con las acciones realizadas y de los valores de las variables fisicoquímicas de la solución nutritiva.

Teniendo en cuenta lo anterior, se fomentará la producción agrícola eficiente y amigable con el medio ambiente, debido a que para este sistema no sería necesario tener una gran extensión de terreno o talar bosques para la adquisición de nuevas áreas de producción; además, el agua utilizada para este método se puede tener en recirculación y con los correctivos apropiados aportados por este sistema se podría obtener un máximo aprovechamiento sin el derroche del vital líquido.

Este proyecto daría la oportunidad a los estudiantes de ingeniería electrónica de la Universidad Surcolombiana de aplicar los conocimientos y habilidades adquiridas al sector productivo de la región, con lo que estarían ayudando a valorizar los productos de las familias huilenses y colombianas.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un sistema de control que permita mantener en los rangos apropiados las variables de la solución nutritiva CE (1.8 – 2.3 mS/cm), pH (5.8 – 6.4) y temperatura de la solución nutritiva (18 - 24) para el cultivo de lechuga en sistemas hidropónicos.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Monitorear y mantener los niveles del pH, temperatura y conductividad eléctrica en las condiciones adecuadas para el crecimiento de un cultivo hidropónico de lechugas.
- Comparar los resultados obtenidos de crecimiento de la lechuga al realizar un control automático con los obtenidos de manera manual mediante el análisis de las variables cruciales en el crecimiento de las lechugas hidropónicas.
- Proporcionar a los pequeños y medianos productores una ayuda tecnológica para la producción intensiva de alimentos de excelente calidad a un bajo costo en mano de obra.

4. MARCO TEÓRICO

4.1. CULTIVOS HIDROPÓNICOS

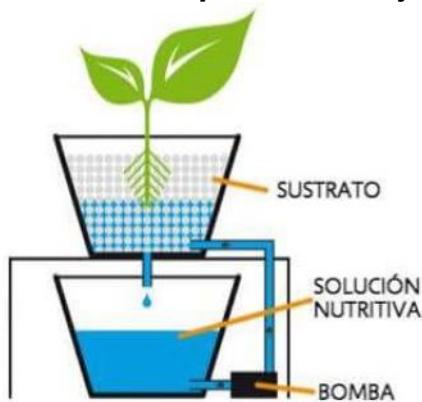
Según (Lens, 2016) son cultivos donde no se utiliza el suelo para cultivar, sino que se establecen en agua, la cual contiene todos los nutrientes que necesita una planta para crecer. De esta manera las raíces consumen todo lo que necesitan, haciéndose innecesario el uso del suelo, en alguno de estos tipos de cultivos el suelo es reemplazada por fibra de coco, arcilla expandida, lana de roca, entre otros. Algunas de sus ventajas son:

- Reducción del consumo de agua en los riegos.
- Irrigación pareja en toda la superficie de las raíces.
- Evita la erosión del suelo
- Cultivos menos propensos a sufrir problemas climáticos
- Reducción en la contaminación por químicos en los suelos
- Mejora la calidad de la producción.

En (Verdegen, 2017) se describen los diferentes tipos de sistemas hidropónicos existentes:

Flujo y reflujo: Es el sistema de producción donde se inundan temporalmente las bandejas de crecimiento con solución nutritiva, luego por gravedad esta es regresada al depósito principal de la solución, un ejemplo de su implementación se puede apreciar en la Figura 1.

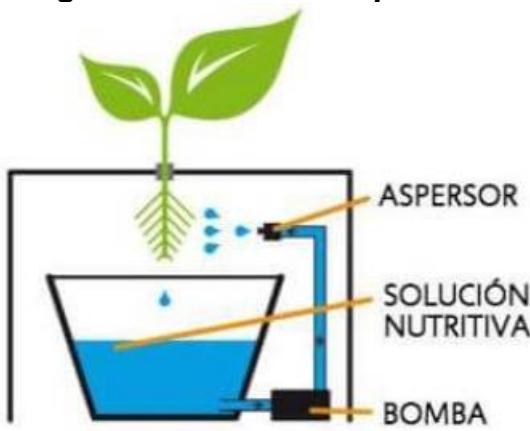
Figura 1. Sistema hidropónico de flujo y reflujo



Fuente: (Verdegen, 2017)

Aeroponía: Técnica en la que las raíces se encuentran suspendidas en el aire dentro de un medio oscuro, las cuales son irrigadas con la solución nutritiva a través de nebulizadores en intervalos cortos de tiempo (pocos minutos), un ejemplo de su implementación se puede apreciar en la Figura 2.

Figura 2. Sistema Aeropónico.



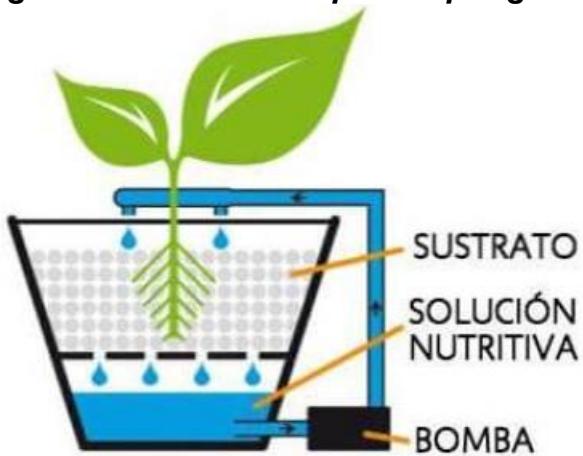
Raíz flotante: Método en el cual las plantas se encuentran en una balsa que flota sobre la solución nutritiva, por lo que sus raíces siempre están sumergidas dentro de ella. Para el suministro de oxígeno a las raíces se emplea una bomba de aire, con lo que se garantiza un óptimo entorno de crecimiento de la planta. En la Figura 3 se muestra un ejemplo de su funcionamiento.

Figura 3. Sistema de Raíz flotante



Goteo: Como se puede apreciar en la Figura 4, este es un sistema donde la solución nutritiva gotea sobre la parte inferior de las plantas, dicho goteo se ejerce gracias al control que ejerce un “timer” sobre la bomba.

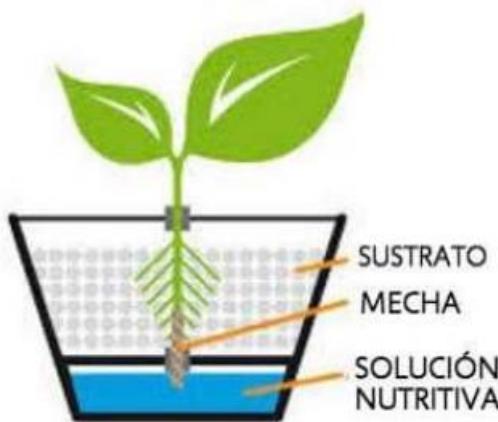
Figura 4. Sistema hidropónico por goteo



Fuente: (Verdegen, 2017)

Mecha: Esta técnica no requiere de bombas para suministrar la solución nutritiva a las plantas, pues la solución es suministrada gracias a la absorción de mechas o pabilos tal como se muestra en la Figura 5.

Figura 5. Sistema hidropónico de mecha



Fuente: (Verdegen, 2017)

NFT (Nutrient Film Technique o técnica de la película de nutriente): en este sistema la solución nutritiva es bombeada desde un depósito hacia tubos de PVC con plantas, donde esta entra en contacto con las raíces de las plantas para luego regresar al depósito principal. Un ejemplo de su funcionamiento se aprecia en la Figura 6.

Figura 6. Sistema hidropónico NFT



Fuente: (Verdegen, 2017)

El cultivo al cual se le implementará el prototipo de control de las variables físico químicas, está construido en el Municipio de Tello – Huila desde el año 2018. Este fue desarrollado por un ingeniero agrícola basándose en las características de los sistemas NFT.

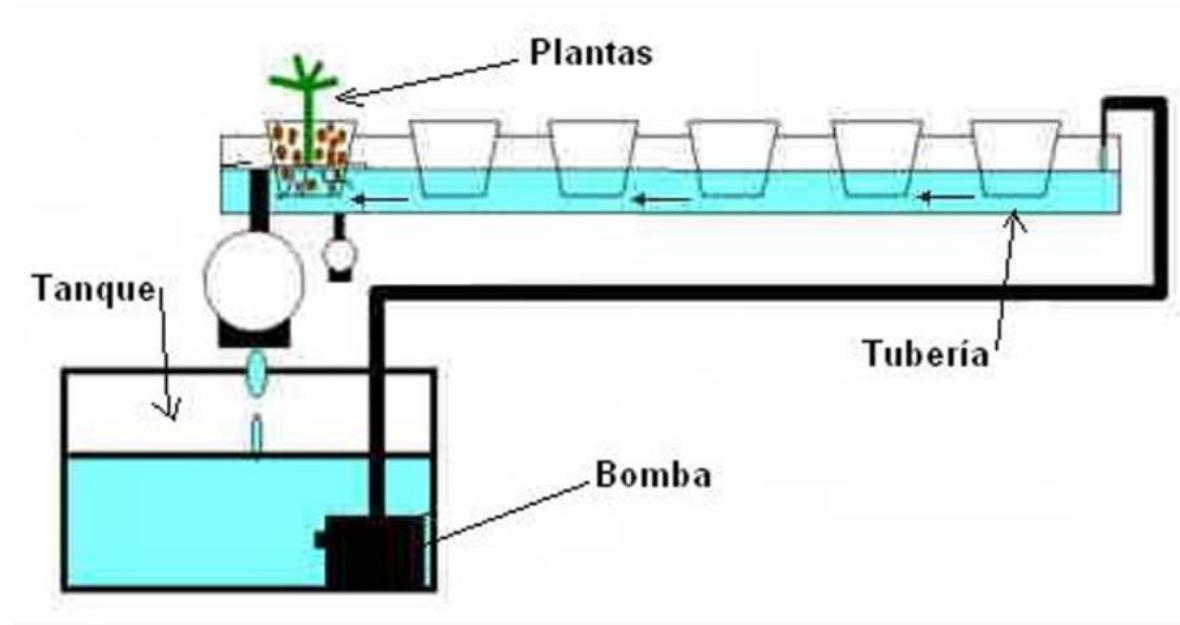
4.2. ELEMENTOS DE UN SISTEMA NFT

(Agrotendencia, n.d.) nos dice que el principio de funcionamiento de este sistema hidropónico es la recirculación continua de la solución nutritiva impulsada por una electrobomba, que gracias al movimiento continuo del agua y de su caída al retornar al tanque es posible la oxigenación requerida para las plantas, por lo que sus principales componentes son:

- **Tanque:** almacena la solución nutritiva, su capacidad dependerá del número de plantas que se deseen producir.
- **Bomba:** envía la solución nutritiva del tanque hacia las tuberías de distribución.
- **Tuberías de distribución:** llevan la solución nutritiva hacia los canales de cultivo.
- **Canales de cultivo:** sostienen las plantas y en su interior recorre la solución nutritiva
- **Tuberías de drenaje:** recoge la solución nutritiva desde los canales y la lleva de retorno hacia el tanque.

Los componentes anteriormente mencionados se pueden observar con mayor claridad en la Figura 7.

Figura 7. Componentes de sistema NFT



Fuente: (Agrotendencia, n.d.)

4.3. REQUERIMIENTOS DEL CULTIVO DE LECHUGA HIDROPÓNICA

4.3.1. Requerimientos nutricionales

La (Universidad Agrícola, n.d.) indica que la solución nutritiva a utilizar debe hacer un aporte de 16 elementos esenciales para que el cultivo tenga un desarrollo adecuado, siendo de mayor importancia el cálculo de los macronutrientes (Nitrógeno, fosforo, azufre, potasio, calcio y magnesio) en la solución nutritiva, esto debido a que los micronutrientes son proporcionados por formulaciones comerciales.

4.3.2. Requerimientos de PH

Según (Growertoday, 2022), cuando el pH es demasiado alcalino puede causar un bloqueo nutricional, lo que impediría una correcta absorción de nutrientes por parte de las plantas, ocasionando un amarillamiento de las hojas, marchitamiento de las plantas, retraso en el crecimiento, entre otros síntomas que pueden ocasionar la pérdida total de las plántulas. Por lo anterior se recomienda que los rangos apropiados del pH deben estar entre 5.6 y 6.2, lo que reduce las actividades de las algas y se facilita la absorción de los nutrientes por parte de las lechugas.

4.3.3. Requerimientos de CE (Conductividad Eléctrica).

En (Hidroponía al cubo, n.d.) se explica que la conductividad eléctrica, está relacionada con la presencia de las sales minerales, ya que su disociación genera iones positivos (cationes) y negativos (aniones) capaces de transportar corrientes eléctricas a través de ellas. La lectura del CE nos indica la cantidad de nutrientes presentes en la solución nutritiva, por lo que, si se aumenta la concentración de nutrientes en la solución, mayor será el valor de la conductividad eléctrica.

Debido a que las plantas absorben agua y nutrientes en diferentes proporciones en función de su estado de desarrollo y de las condiciones ambientales, es necesario realizar un control diario de este parámetro. En consecuencia, si se tienen valores elevados de CE, puede afectar la absorción de agua en las raíces, ya que la absorción de agua en la planta tiene lugar mediante un proceso de osmosis, por lo que una concentración alta de iones en la solución dificultara el paso de agua hasta el interior de las raíces. Una solución hidropónica típica suele prepararse con valores de CE comprendidos entre 1 y 3 mS/cm (Hidroponía al cubo, n.d.).

4.3.4. Requerimientos en temperatura de la solución

La temperatura tiene influencia sobre la concentración de oxígeno y la disponibilidad de nutrientes. Así pues, si la temperatura se sitúa por debajo de los 12°C o mayor a 30°C la raíz deja de crecer, por lo tanto, la oxigenación, absorción y asimilación de nutrientes disminuye. La temperatura óptima para la mayoría de los cultivos hidropónicos este alrededor de los 22°C (Conoce Hidroponía, 2018), y la temperatura apropiada para la producción de hortalizas de hoja como la lechuga esta entre 15 a 25°C (Laura Brenes & María Fernanda, 2014).

4.4. SISTEMAS DE AUTOMATIZACIÓN

En los sistemas de automatización se emplean máquinas para realizar tareas repetitivas que previamente eran realizadas por personas. En la actualidad la automatización abarca desde la robótica, pasando por la inteligencia artificial, los sistemas de control y las interfaces hombre-máquina. La automatización brinda ventajas como controles precisos de producción, mejoramiento en la calidad de los productos, control en tiempo real, disminución del error humano, aumento de la productividad y la competitividad (Oyervides B et al., 2021).

4.4.1. Automatización en hidroponía

Algunos de los avances en la automatización de los diferentes cultivos hidropónicos se muestran a continuación:

Las instalaciones de (Ironox, 2022) incorporan robótica e inteligencia artificial para garantizar que cada planta reciba los niveles óptimos de luz solar, agua y nutrientes. Un pequeño ejemplo de la tecnología usada por IRONOX se muestra en la Figura 8.

Figura 8. Tecnología IRONOX



Fuente: (IRONOX, 2022)

La startup india UrbanKisaan se especializa en cultivos hidropónicos en entornos urbanos tropicales, contribuyendo a la sostenibilidad gracias a que los productos son cultivados en granjas limpias e higiénicas, minimizando la huella de carbono total, y gracias al uso de tecnologías de IOT que permiten monitorear las granjas en tiempo real permiten una producción libre de pesticidas (infoAgro, 2021).

Figura 9. Cultivo hidropónico en las instalaciones de UrbanKisaan.



Fuente: (infoAgro, 2021)

En Valle del Cauca Colombia se desarrolló un robot cultivador hidropónico con el que se espera contribuir al cuidado de los recursos naturales, gracias a que este robot hace todo el proceso del cultivo desde que se siembran las semillas, monitoreando el nacimiento y crecimiento de las plantas garantizando que estas se desarrollen en un entorno controlado y así se aumente la eficiencia del cultivo (Gobernación del Valle del Cauca, 2022).

Figura 10. PlanToGo



Fuente: (Gobernación del Valle del Cauca, 2022)

4.5. RASPBERRY

Una Raspberry pi es una computadora de bajo costo y con tamaño compacto, con sistema operativo Linux que puede ser conectada a un monitor de computadora o televisión, manejarse con un mouse y teclado estándar (Raspberrypi, n.d.).

Todos los diseños de Raspberry pi se basan en el Hardware libre, el cual permite que se utilicen en el desarrollo de pequeños prototipos y en la formación sobre informática y electrónica en los diferentes centros de educación (Santana, 2019).

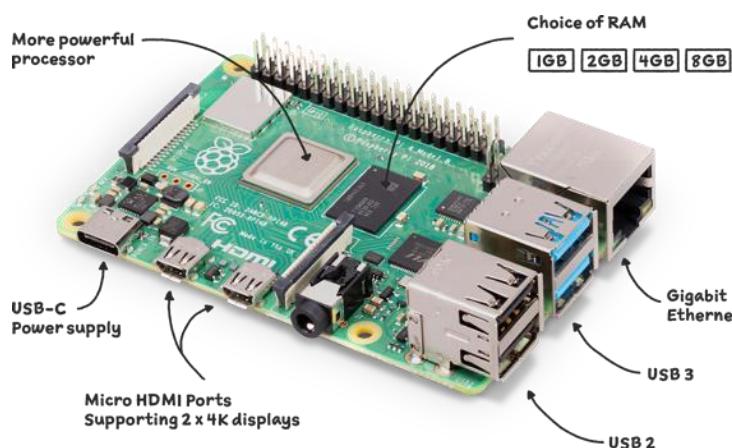
4.5.1. Raspberry pi 4 B

La Raspberry pi 4, mostrada en la Figura 11 actualizó el procesador a un ARM Cortex-172 con cuatro núcleos a 1.5 GHz, que le brinda entre dos y cuatro veces mayor rendimiento en comparación con la Raspberry pi 3B+. Para entender a más detalle la potencia de este modelo, en la Tabla 1 se ilustran sus características técnicas (Rus, 2019).

Tabla 1. Características técnicas de la Raspberry pi 4

PROCESADOR	ARM Cortex-A72
FRECUENCIA DE RELOJ	1,5 GHz
GPU	Video Core VI (con soporte para OpenGL ES 3.x)
MEMORIA	1 GB / 2 GB / 4 GB LPDDR4 SDRAM
CONECTIVIDAD	Bluetooth 5.0, Wi-Fi 802.11ac, Gigabit Ethernet
PUERTOS	GPIO 40 pines 2 x micro HDMI 2 x USB 2.0 2 x USB 3.0 CSI (cámara Raspberry Pi) DSI (pantalla táctil) Micro SD Conector de audio Jack USB-C (alimentación)

Figura 11. Raspberry pi 4B



Fuente: (Raspberry pi, n.d.)

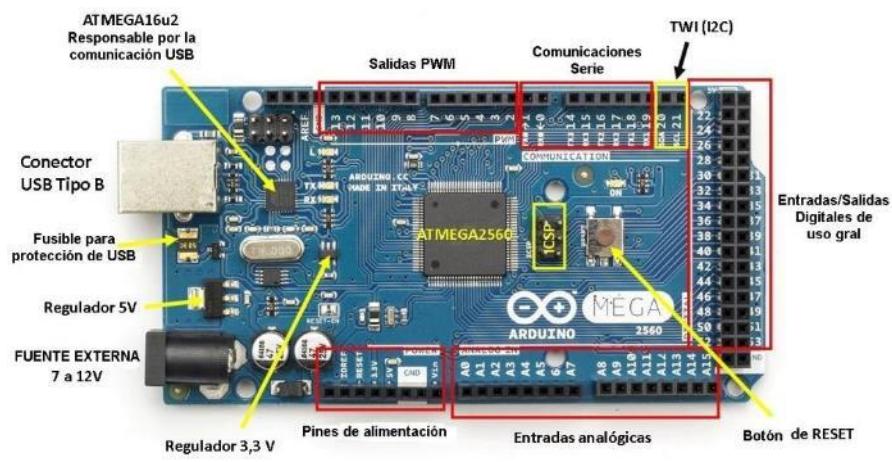
4.6. ARDUINO

Arduino es una tarjeta electrónica de código abierto basada en hardware y software libre, que se caracteriza por ser económico, multiplataforma y fácil de usar, a la que se le pueden incorporar diferentes sensores que le permiten percibir su entorno (entradas) y realizar diferentes acciones que alteran un ambiente definido (salidas). Esto se logra al enviarle un conjunto de instrucciones al microcontrolador en la placa, utilizando el lenguaje de programación de Arduino (Arduino, 2018).

4.6.1. Arduino mega

Dentro de las diferentes versiones que tiene esta versátil tarjeta, se destaca el Arduino mega. El Arduino Mega 2560 es una placa de desarrollo basada en el microcontrolador ATmega2560. Tiene 54 entradas/salidas digitales (de las cuales 15 pueden ser usadas como salidas PWM), 16 entradas analógicas, 4 UARTs, un cristal de 16Mhz, conexión USB, Jack para alimentación DC, conector ICSP, y un botón de reseteo. La placa Mega 2560 es compatible con la mayoría de shields compatibles para Arduino UNO (Arduino, n.d.).

Figura 12. Placa Arduino Mega



Fuente: (Arduino, n.d.)

5. SISTEMA DE CONTROL

El sistema de control diseñado está monitoreando y corrigiendo constantemente las variables fisicoquímicas de la solución nutritiva del cultivo de lechuga hidropónica de la Figura 13. Para ello, el sistema cuenta con dos etapas de funcionamiento, la etapa de adquisición de datos y la etapa del procesamiento de la información.

Figura 13. Cultivo de lechuga hidropónica



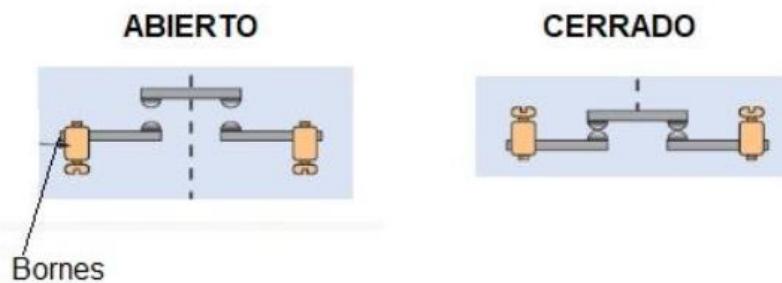
5.1. ETAPA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Esta etapa consta de la interconexión de los pulsadores de encendido de pantalla, lavado del tanque principal, apagado de la Raspberry Pi y los sensores de pH, CE, Temperatura y nivel con la placa Arduino. Esta tarjeta además de interpretar las señales arrojadas por los elementos de medición, será la encargada de enviar esta información a la Raspberry pi 4 por comunicación serie para su posterior procesamiento.

5.1.1. Pulsador

Son componentes electrónicos que permiten o impiden el paso de la corriente eléctrica cuando son pulsados o accionados, pues estos solo se activan cuando el operario los oprime y al soltarlos el pulsador vuelve a su estado inicial.

Figura 14. Pulsadores



Fuente: (Areatecnologica, n.d.)

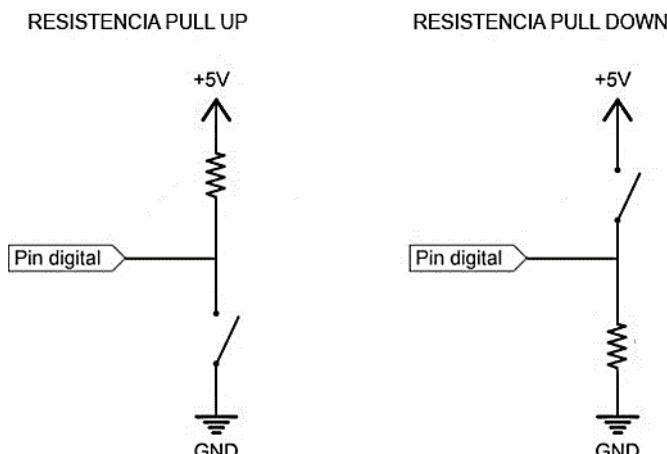
Para su correcto funcionamiento con las tarjetas de desarrollo Arduino y para este caso con la tarjeta Arduino mega, es necesario realizar una configuración con resistencia de Pull-Down o Pull-Up como se ilustra en la Figura 15, donde el valor de la resistencia está condicionado por la intensidad de corriente que pasa al accionar el pulsador. Si es selecciona una resistencia muy pequeña, esta deja pasar más corriente y tiene un mayor consumo energético generando un sobrecalentamiento; en cambio, si es selecciona una resistencia muy elevada, esta podría dejar pasar poca corriente, siendo más susceptible a lecturas erróneas provocadas por el ruido del medio. Por lo anterior, el valor aconsejado de la resistencia es de 10 Kohm (Llamas, 2014).

Resistencia Pull-Up: Esta configuración mantiene un estado alto en el pin del Arduino mientras el pulsador no este accionado, cuando el pulsador es accionado su estado pasa a bajo o un 0.

Resistencia Pull-Down: Esta configuración mantiene un estado bajo en el pin del Arduino mientras el pulsador no este accionado, cuando el pulsador es accionado su estado pasa a alto o un 1.

La configuración escogida para el funcionamiento de los pulsadores de encendido de pantalla, función de lavado y apagado de la Raspberry Pi es la **Pull-Down**.

Figura 15. Resistencia PULL-UP Y PULL-DOWN

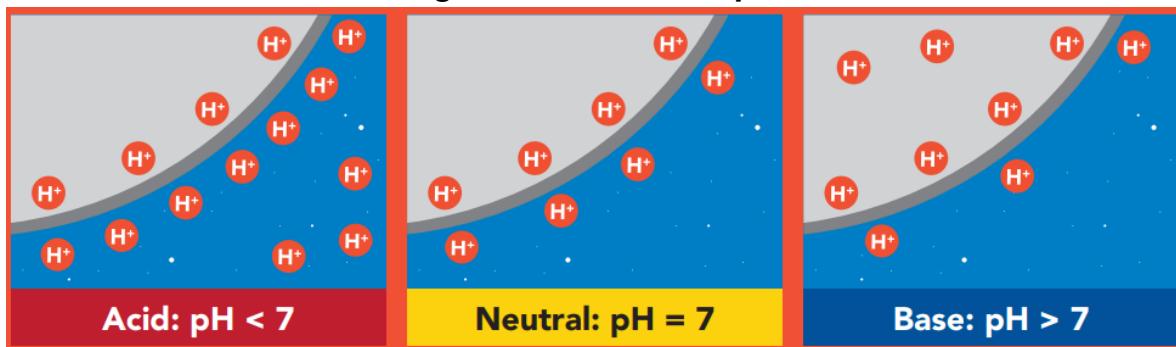


Fuente: (Llamas, 2014)

5.1.2. Sensor de pH

Una sonda de pH (potencial de hidrógeno) mide la actividad de los iones de hidrógeno en un líquido. En la punta de una sonda de pH hay una membrana de vidrio, la cual permite que los iones de hidrógeno del líquido que se mide se difundan hacia la capa exterior del vidrio, mientras que los iones más grandes permanecen en la solución. La diferencia en la concentración de iones de hidrógeno (fuera de la sonda vs. dentro de la sonda) crea una corriente muy pequeña, esta corriente es proporcional a la concentración de iones de hidrógeno en el líquido que se mide (AtlasScientific, n.d.-b)

Figura 16. Lectura de pH.



Fuente: (AtlasScientific, n.d.-b)

Para este proyecto se emplea el kit de medición de pH proporcionado por Atlas Scientific, el cual se muestra en la Figura 17. Esta sonda es calibrada a tres puntos de pH (4, 7 y 10) lo que garantiza una mayor precisión en sus mediciones, gracias a que el circuito Atlas Scientific EZO es de fácil incorporación con las placas de Arduino y muy sensible a cambios de voltajes originados en la sonda de medición, su precisión y exactitud son muy elevados.

Figura 17. Kit de medición de pH



Fuente: (AtlasScientific, n.d.-b)

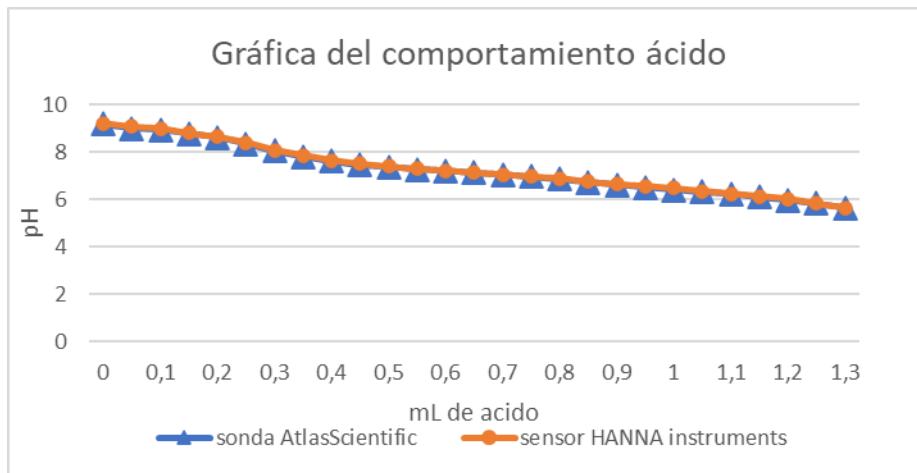
Figura 18. Medidor de pH HI 98131



Fuente: (HANNA instruments, n.d.)

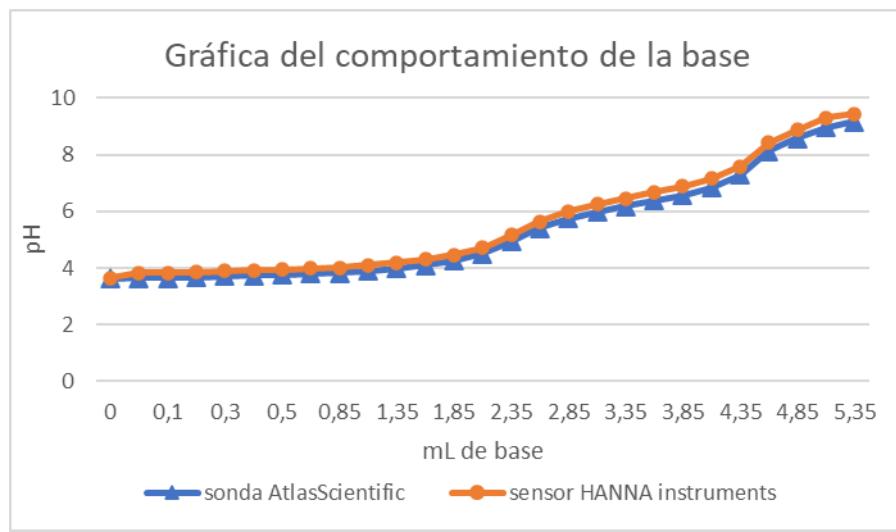
Para asegurarnos del correcto funcionamiento de la sonda de pH AtlasScientific, se realiza una comparación de lecturas entre la sonda de pH mostrada en la Figura 17 y el medidor de pH de Hanna Instruments mostrada en la Figura 18 (Anexo 4 y Anexo 5). Este sensor arroja las gráficas mostradas en la Figura 19 y la Figura 20.

Figura 19. Comportamiento del ácido con la sonda de AtlasScientific y el medidor de Hanna Instruments



Fuente: (autores).

Figura 20. Comportamiento de la base con la sonda de pH AtlasScientific y el medidor de HANNA Instruments

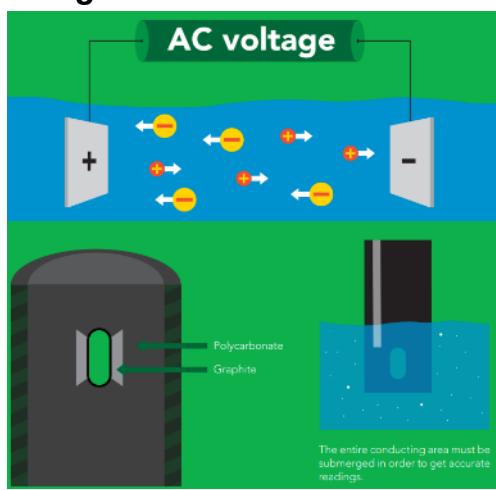


De la Figura 19 y Figura 20, se concluye el correcto funcionamiento de la sonda de pH AtlasScientific utilizada en el sistema de control.

5.1.3. Sensor de CE

Una sonda de CE (conductividad eléctrica) mide la conductividad eléctrica en una solución. Se usa comúnmente en hidroponía, acuicultura y sistemas de agua dulce para monitorear la cantidad de nutrientes, sales o impurezas en el agua. Dentro de la sonda de conductividad se colocan dos electrodos uno frente al otro, se aplica un voltaje de CA (Corriente Alterna) a los electrodos que hace que los cationes se muevan hacia el electrodo con carga negativa, mientras que los aniones se mueven hacia el electrodo con carga positiva. Cuanto más electrolito libre contenga el líquido, mayor será la conductividad eléctrica (AtlasScientific, n.d.-a).

Figura 21. Lectura de la CE.



Fuente: (AtlasScientific, n.d.-a)

Para la medición del CE de la solución nutritiva usada para el cultivo hidropónico se usa el Kit proporcionado por AtlasScientific Figura 22, esto debido a su gran precisión y exactitud en sus mediciones, características cruciales para el correcto funcionamiento del prototipo de control a implementar.

Figura 22. Kit de medición de CE

 **Kit de conductividad K**
1.0

#EC-KIT-1.0

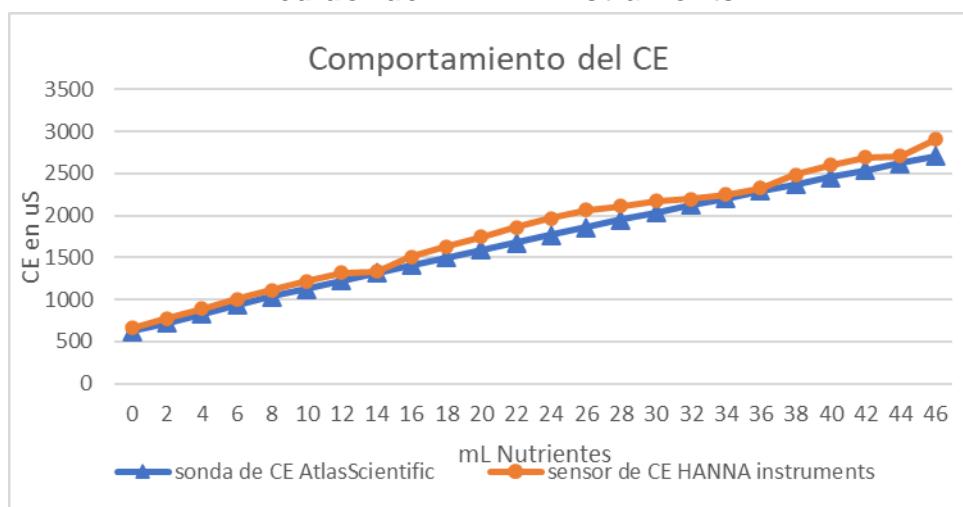
Protegido por
patente



Fuente: (AtlasScientific, n.d.-a)

Para asegurar el correcto funcionamiento de la sonda de CE AtlasScientific, se realiza una comparación de lecturas entre la sonda de CE mostrada en la Figura 22 y el medidor de CE de HANNA instruments mostrado en la Figura 18 (Anexo 6), la cual deja visualizar la gráfica mostrada en la Figura 23.

Figura 23. Comportamiento del CE en la sonda de CE AtlasScientific y el medidor de HANNA instruments



Fuente: (Autores).

Con lo evidenciado en la Figura 23, se comprueba el correcto funcionamiento de la sonda de CE AtlasScientific.

5.1.4. Sensor de Temperatura

Uno de los requerimientos más importante para los elementos que conformen el sistema de control es el trabajo en la solución nutritiva (Líquido), por lo que el sensor de temperatura seleccionado es el **DS18B20** de la Figura 24; pues dicho sensor se encuentra dentro de un tubo de acero inoxidable resistente al agua.

El DS18B20 es un sensor digital de temperatura que utiliza el protocolo 1-wire para comunicarse, este protocolo necesita solo un pin de datos para él envío de datos y permite conectar más de un sensor en el mismo bus. Dentro de las principales características de este sensor, encontramos que puede medir temperaturas desde los -55 °C hasta los 125 °C con una resolución programable desde 9+ bits hasta los 12 bits (Mastrónica, n.d.).

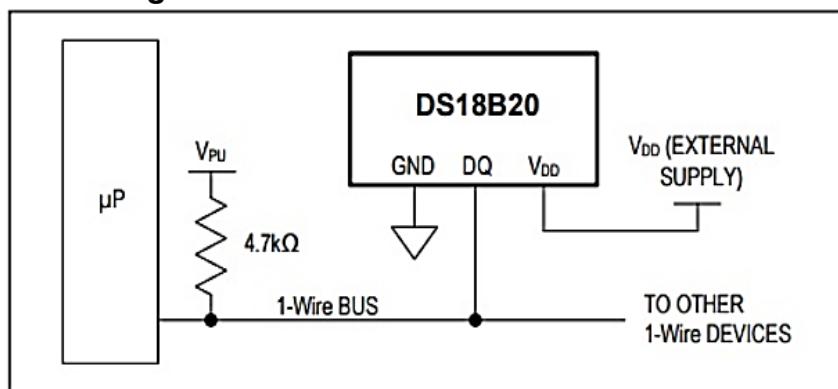
Figura 24. Sensor de temperatura DS18B20



Fuente: (MACTRÓNICA, n.d.)

El esquema de conexión entre el sensor de temperatura y Arduino mega para el sistema de control se evidencia en la Figura 25, donde se puede apreciar que la alimentación es proporciona por una fuente externa, suministrando un voltaje mucho más estable e independiente del tráfico de información del bus 1-wire (Naylamp, n.d.).

Figura 25. Conexión del sensor DS18B20



Fuente: (Naylamp, n.d.)

5.1.5. Sensor de presión diferencial

Para lograr determinar el nivel de la solución nutritiva en el tanque principal, se usa el sensor de presión diferencial **MPX5500** que se muestra en la Figura 26. Con ayuda de las ecuaciones de presión hidrostática se logra determinar la altura del líquido dentro del tanque principal, y posteriormente, se puede determinar el volumen de solución nutritiva al medir el radio del tanque contenedor.

Este sensor es monolítico compuesto de silicio que es capaz de medir la presión del aire, de fácil adaptación con microprocesadores o microcontroladores con entradas A/D, gracias a que provee una salida de voltaje analógico de nivel alto que es proporcional a la presión aplicada (Semiconductor, n.d.).

Sus principales características se listan a continuación:

- Rango 0 a 500 kPa (0 a 72.5 psi)
- Voltaje de salida 0.2 V a 4.7 V
- Error máximo: 2.5% en el rango de temperatura de 0 a 85 °C
- Medida diferencial
- 2 puertos
- Voltaje de alimentación: 4.75 V a 5.25 V (típico: 5V)
- Corriente típica: 7 mA
- Sensibilidad: 9 mV/kPa
- Tiempo de respuesta: 1 ms
- Warm-Up Time: 20 ms
- Acondicionamiento de señal on-chip, salida lineal, calibrado y compensado en temperatura
- Presión en P1 debe ser siempre mayor o igual a P2
- Presión máxima en P1: 2000 kPa (290 psi) (Con P2≤ 1 Atmósfera)
- Presión máxima en P2: 500 kPa (72 psi)
- Puerto P1 protegido con gel de fluoro silicona
- Cuerpo durable de Epoxy
- Temperatura de operación: -40 a +125 °C
- Encapsulado: Unibody CASE 867C-05 de 6 pines

Figura 26. Sensor de presión diferencial MPX5500



Fuente: (Semiconductor, n.d.)

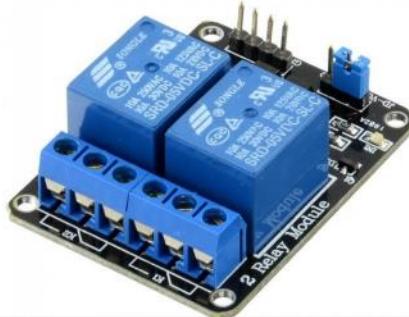
5.2. ETAPA DE PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

En esta etapa se emplea la Raspberry pi 4B, donde se crea un Script en el lenguaje de programación Python, que es el encargado de recibir el valor de las variables por puerto serie, decodificar, tomar acciones de corrección, enviar las variables a la base de datos y mostrar los valores de las variables en pantalla.

Las acciones de corrección se realizan al accionar módulos relés que a su vez activan o desactivan las bombas peristálticas para el pH y las bombas sumergibles para el CE.

- **Módulos relés:** Un relé es un interruptor mecánico operado eléctricamente que se puede encender o apagar, dejando pasar la corriente o no, y se puede controlar con voltajes bajos, como los 5V utilizados en la alimentación de un Arduino (Robots Didácticos, 2020)

Figura 27. Modulo Relé



Fuente: (Robots Didácticos, 2020)

- **Bomba peristáltica:** Es un elemento de tipo hidráulico que permite el desplazamiento de distintos tipos de fluidos, entre ellos los corrosivos o abrasivos que atacarían las partes mecánicas de otro tipo de bombas, esto gracias a que el fluido solo está en contacto con un tubo y no con empaquetaduras u otros elementos (Apema, n.d.).

Figura 28. Bomba peristáltica



Fuente: (APEMA, n.d.)

- **Bomba sumergible:** Esta mini bomba es ideal para aplicaciones donde requieras bombear agua o líquidos de poca densidad. La bomba tiene un orificio por donde succiona el líquido y otro por donde sale, al cual se le puede acoplar una manguera si se considera necesario (Dynamo, n.d.).

Figura 29. Mini bomba sumergible.



Fuente: (Dynamo, n.d.)

En el Anexo 1 se evidencia el costo de los equipos utilizados para el desarrollo del sistema de control, en el Anexo 2 se puede encontrar los precios de los Materiales, Insumos y Servicios técnicos que constituyen el prototipo de control y en el Anexo 3 se consigna el precio de los softwares utilizados para la programación del sistema de control.

5.2.1. Comunicación entre el Arduino mega y la Raspberry pi

Para este proceso se construye una función capaz de solicitar por puerto serie la cadena de texto creada por el Arduino mega, la cual está conformada por las diferentes variables mencionadas en la sección 5.1. De igual manera, está enviando estos valores a la interfaz gráfica de usuario y a las diferentes funciones de control que conforman el script.

5.2.2. Control de pH y CE

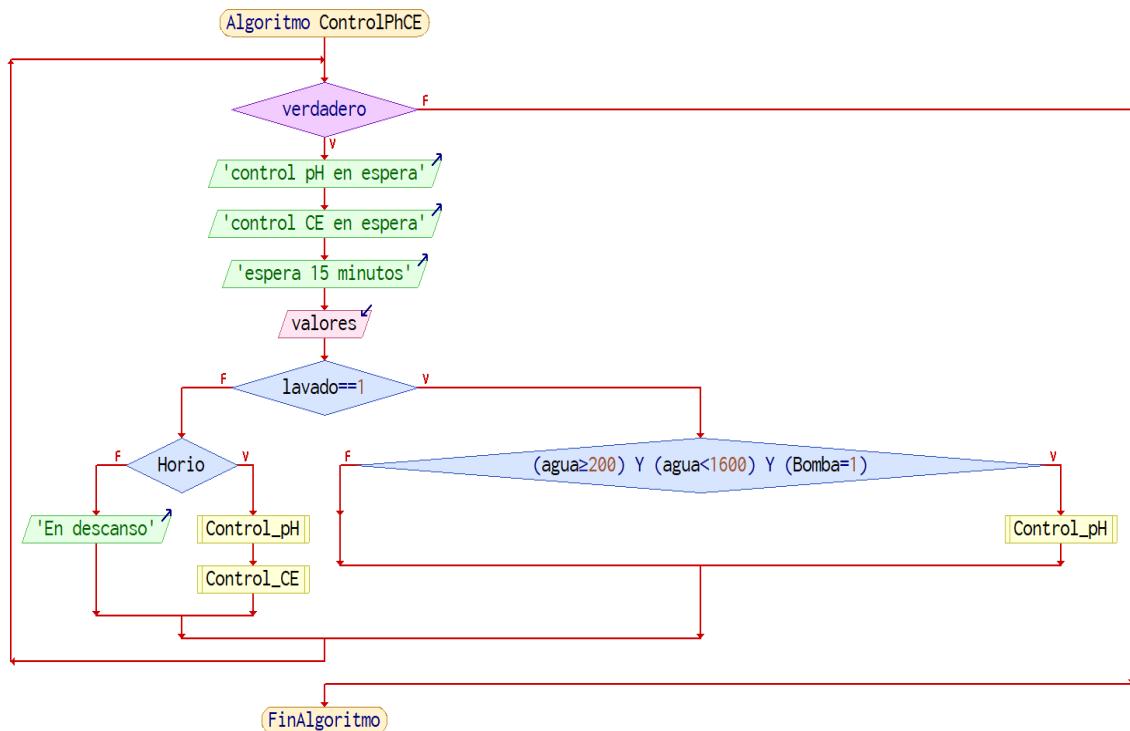
El diagrama de flujo de esta acción de control se puede apreciar en la Figura 30, la cual está conformada por dos acciones principales, la corrección del pH y la corrección del CE; las cuales estarán en funcionamiento en el horario mostrado en la Tabla 2. Además del horario, la corrección del pH y la CE están estrechamente relacionadas por la cantidad de solución nutritiva o agua presente en todo el sistema hidropónico, por lo que en primera medida se calcula la cantidad de agua que debe existir en los canales de cultivo.

Tabla 2. Horario de control

Hora (24 horas)	Estado de control
6-7	ON
7-8	OFF
8-9	ON
9-10	OFF
10-16	ON

16-17	OFF
17-19	ON
19-6	OFF

Figura 30. Diagrama de flujo del control de pH y CE



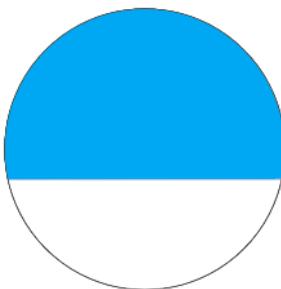
Fuente: (autores)

5.2.2.1. Cálculo de solución nutritiva en los canales de producción

Teniendo en cuenta que la tubería usada para el Cultivo hidropónico NFT es de 3 pulgadas y según las especificaciones dadas en (Caldas, n.d.) su diámetro interior es de 7.62 cm, se procede a calcular la cantidad de solución nutritiva presente en los tubos de producción. Se sigue la recomendación dada en (Agriculturers, 2015), donde dice que las raíces deben permanecer en contacto permanente con la película de nutrientes, por lo cual se tendrá en cuenta la profundidad de las bandejas de germinación, la cual según (Agroactivo, 2021) es de 3.8 cm. Con estos datos se determina que la tubería debe tener un nivel de 4.6 cm de altura, lo que favorecerá la oxigenación de las raíces y el respectivo suministro de nutrientes esenciales.

Según las especificaciones dadas, el nivel del agua dentro de la tubería se vería aproximadamente como en la Figura 31.

Figura 31. Nivel de solución en las tuberías



Fuente: (autores)

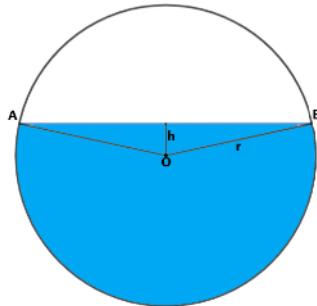
Para determinar el volumen de agua presente en la tubería de la Figura 31, se procede inicialmente a determinar el volumen máximo de la tubería de 3 pulgadas. Conociendo que la tubería tiene una longitud de 6 metros y un diámetro interno de 7.6 cm, se obtiene:

$$V = \pi r^2 l = \pi * \left(\frac{7.6}{2}\right)^2 * (600)$$

$$V = 27218.75 \text{ cm}^3 = 27.218 \text{ Litros}$$

Para determinar el volumen de la solución nutritiva presente dentro de la tubería de la Figura 31, se procede como se ilustra a continuación.

Figura 32. Representación gráfica de cálculos geométricos



Fuente: (Autores)

Se procede a calcular el volumen del segmento de la circunferencia que quedara vacío dentro de la tubería, la cual es el área del sector de la circunferencia menos el área del triángulo formado desde el centro de la tubería, por que inicialmente procederemos a hallar el ángulo formado por los puntos AOB.

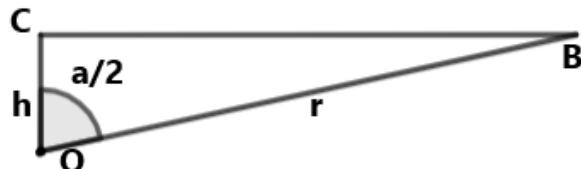
Figura 33. Triángulo formado por los puntos AOB



Fuente: (Autores)

Para facilitar el cálculo de dicho ángulo, convertimos el triángulo de la Figura 33 en dos triángulos rectos.

Figura 34. Triángulo formado por los puntos COB



Fuente: (Autores)

Utilizando geometría para determinar el ángulo correspondiente, se tiene:

$$\cos\left(\frac{a}{2}\right) = \frac{h}{r}$$

Donde h es $4.6 - 3.8 = 0.8 \text{ cm}$

$$\cos\left(\frac{a}{2}\right) = \frac{0.8}{3.8} \Rightarrow \frac{a}{2} = \cos^{-1}\left(\frac{0.8}{3.8}\right) \Rightarrow \frac{a}{2} = 77.84^\circ \text{ y } a = 155.68^\circ$$

Con estos valores, se procederá a calcular la longitud del segmento de la línea \overline{AB} de la Figura 33, esto con ayuda del segmento \overline{CB} de la Figura 34.

$$\sin\left(\frac{a}{2}\right) = \frac{\overline{CB}}{3.8} \Rightarrow \overline{CB} = 3.8 \sin(77.84) \Rightarrow \overline{CB} = 3.71 \text{ cm} \Rightarrow \overline{AB} = 7.42 \text{ cm}$$

el área del triángulo de la Figura 33 es de:

$$AT = \frac{b * h}{2} \Rightarrow \frac{7.42 * 0.8}{2} \Rightarrow 2.968 \text{ cm}^2$$

el área del sector circular está dada por:

$$AS = \frac{\pi r^2 a}{360^\circ} \Rightarrow \frac{\pi (3.8)^2 155.68^\circ}{360^\circ} \Rightarrow 19.61 \text{ cm}^2$$

Con estos datos, logramos determinar el área del segmento de la circunferencia que estará vacío:

$$AV = (19.61 - 2.968) \text{ cm}^2 \Rightarrow AV = 16.642 \text{ cm}^2$$

Multiplicamos el área anterior por los 6 metros de largo de la tubería, con lo que se obtiene el volumen del segmento vacío.

$$VV = 16.642 * 600 \Rightarrow VV = 9985.2 \text{ cm}^3$$

Para determinar el volumen de la solución nutritiva con los anteriores valores, se procederá a restar el volumen vacío del volumen total de la tubería:

$$VU = (27218.75 - 9985.2) \text{ cm}^3 \Rightarrow VU = 17233.5 \text{ cm}^3$$

La anterior cantidad en litros es de:

$$17233.5 \text{ cm}^3 * \frac{0.001 \text{ l}}{1 \text{ cm}^3} = 17.23 \text{ litros}$$

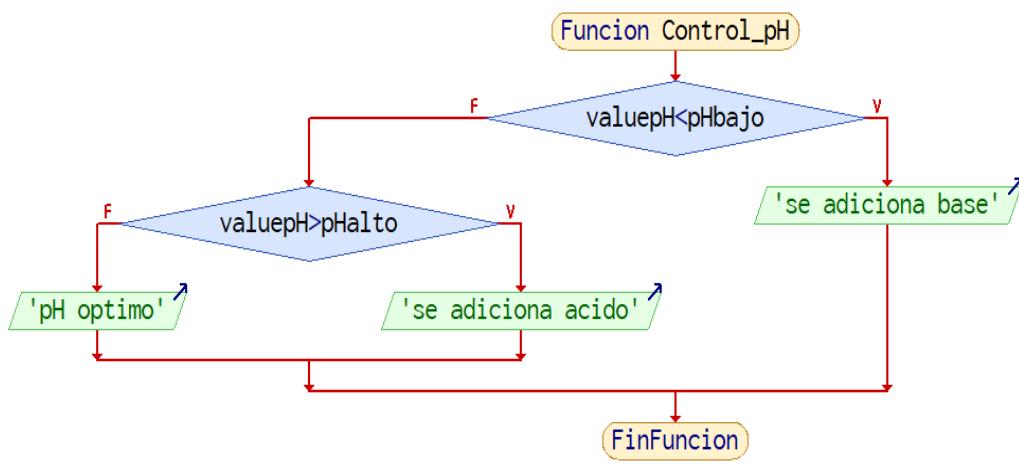
Como cada pirámide cuenta con 10 tuberías de 3 pulgadas y el tanque donde está el sistema de control maneja 8 pirámides, la cantidad de solución nutritiva en las tuberías de producción es de aproximadamente 1.378,4 litros.

El volumen de solución calculado anteriormente, deberá ser sumado al volumen dado por el sensor de nivel presente en el tanque principal para efectos de corrección del pH y CE.

5.2.2.2. Corrección de pH

El diagrama de flujo de la función encargada de la corrección del pH se puede apreciar en la Figura 35, donde el script de Python estará controlando los pines GPIO seleccionados para el control de dos relés, los cuales estarán activando las bombas peristálticas de adición de ácido o base según sea el caso.

Figura 35. Función de Control del pH



Fuente: (Autores)

Los valores del pHbajo (5.8) y pHalto (6.4) de la Figura 35, fueron suministrados por el Ingeniero agrícola asesor del respectivo cultivo de lechuga hidropónica (Oliveros Yara, 2021).

Para la obtención de la cantidad en mililitros de correctivo a aplicar, fue necesario realizar una titulación del comportamiento del pH de la solución nutritiva al aplicar ácido (ácido nítrico) y base (Hidróxido de potasio) teniendo como base 10 litros de solución nutritiva.

- **Aplicación de ácido:** Con los datos obtenidos de la titulación del comportamiento del pH de la solución nutritiva al aplicarle ácido (Anexo 1), se determina el promedio de la variación de esta, siendo este valor de 0,1340 por cada 0.05 mL de ácido adicionado. Lo cual nos permite calcular la cantidad de ácido a adicionar según sea el caso:

$$mL\ acido = \left(\frac{(valuepH - 5.8)}{0,1340} * 0.05 \right) * \frac{agua + LitrosTuberias}{10}$$

Como paso siguiente, es determinar el respectivo tiempo que debe estar encendida la bomba peristáltica del ácido para adicionar la cantidad solicitada, para lo cual se aplica una regla de 3 simple luego de haber calibrado la respectiva bomba.

$$TiempoAcido = \frac{mL\ acido * 60}{CalBombaAcido}$$

- **Aplicación de Base:** Con los datos obtenidos de la titulación del comportamiento del pH de la solución nutritiva al aplicarle base (Anexo 2), se determina el promedio de la variación de esta, siendo este valor de 0,2135 por cada 0.1 mL de base adicionado. Lo anterior nos permite calcular la cantidad de base a adicionar según sea el caso:

$$mL\ base = \left(\frac{(6.4 - valuepH)}{0,2135} * 0.1 \right) * \frac{agua + LitrosTuberias}{10}$$

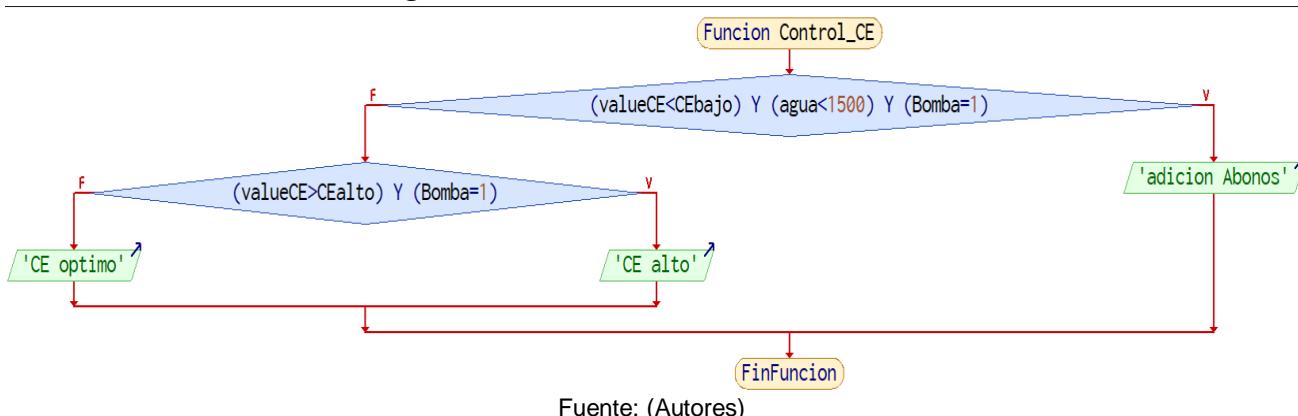
El proceso para determinar el tiempo requerido de encendido de la peristáltica de la base, se determina igual como se realizó en el cálculo del tiempo del ácido.

$$TiempoBase = \frac{mL\ base * 60}{CalBombaBase}$$

5.2.2.3. Corrección de CE

El diagrama de flujo de la función encargada de la corrección del CE se puede apreciar en la Figura 36, donde el script de Python estará controlando los pines GPIO seleccionados para el control de dos relés, los cuales estarán activando las bombas sumergibles de adición de abonos.

Figura 36. Función de control del CE



Los valores del CEbajo (1.8 mS) y CEalto (2.3 mS) de la Figura 35, y la formulación nutricional utilizada, fueron suministrados por el Ingeniero agrícola asesor del respectivo cultivo de lechuga hidropónica (Oliveros Yara, 2021).

Para la obtención de la cantidad en mililitros de nutrientes a aplicar, fue necesario realizar una titulación del comportamiento del CE de la solución nutritiva al adicionar los nutrientes (A y B) en 10 litros de agua como muestra el Anexo 3. De la anterior titulación se determina que cada 1 mL de nutrientes aumenta en un aproximado de 0,0909 mS, con lo que podemos determinar la cantidad de nutrientes a adicionar de la siguiente manera.

$$mL\ Abono = \left(\frac{(2.4 - valueCE)}{0,0909} * 1 \right) * \frac{agua + LitrosTuberias}{10}$$

El proceso para determinar el tiempo requerido de encendido de las bombas sumergibles de los abonos se determina igual como se realizó en el cálculo del tiempo del ácido y el tiempo de la base.

$$TiempoAbono = \frac{mL\ Abono * 60}{CalBombaAbono}$$

5.2.3. Control de Temperatura y Nivel

La acción de control de la temperatura en la solución nutritiva y el nivel del tanque principal se puede apreciar en la Figura 37, en la cual, el respectivo script de Python estará activando y desactivando los relés asignados al accionamiento de dos contactores a cargo del funcionamiento de dos electrobombas Figura 38 y un aire acondicionado configurado como chiller casero Figura 39, el horario de funcionamiento de estas acciones de control se muestra en la Tabla 2.

Figura 37. Diagrama de control de temperatura y nivel

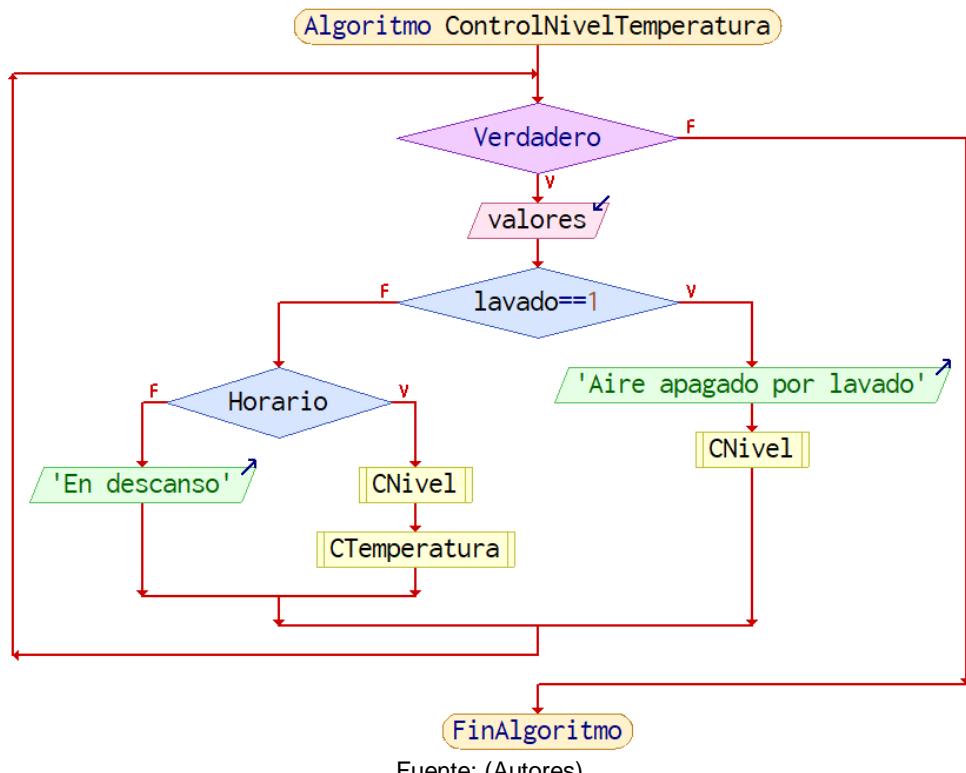


Figura 38. Electrobombas del sistema hidropónico



Fuente: (Autores)

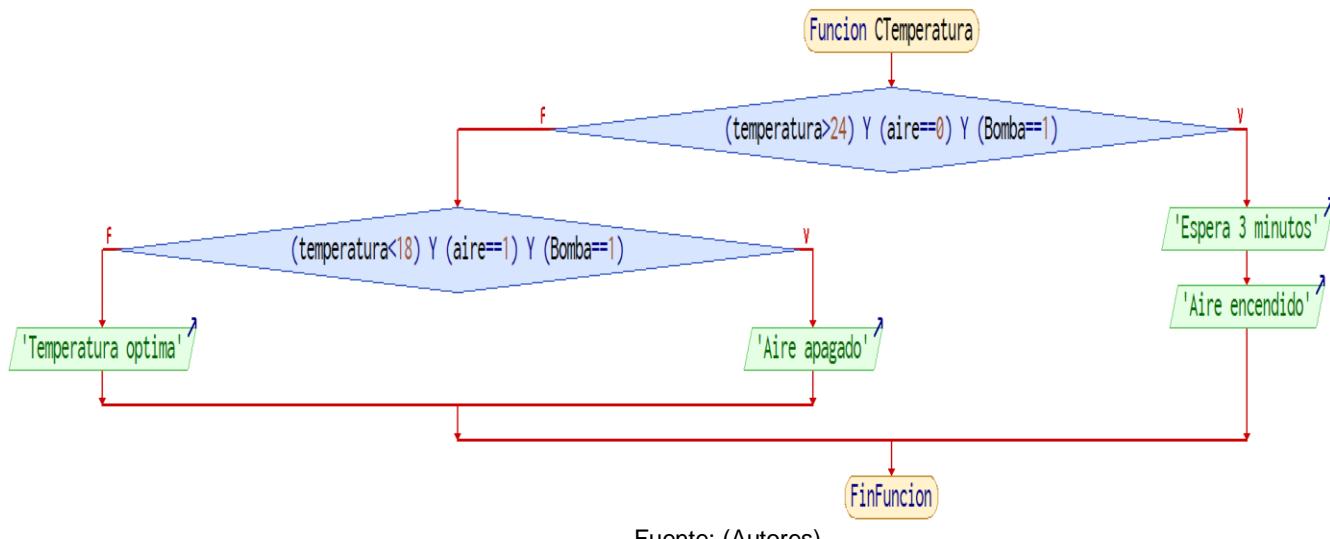
Figura 39. Aire acondicionado como chiller casero



Fuente: (Autores)

- **Control de Temperatura:** Para el control de la temperatura de la solución nutritiva se utiliza el chiller casero de la Figura 39, que será activado gracias a las lecturas del sensor de temperatura 18b20 de la Figura 24 según el diagrama de la Figura 40.
- **Control del nivel de la solución nutritiva:** Para el monitoreo de la cantidad de solución nutritiva presente en el tanque principal se utiliza el sensor de presión diferencial de la Figura 26. Este sensor estará activando la adición de agua para el llenado del tanque principal por medio de la electroválvula de la Figura 41, que, a su vez, estará controlada por un relé dirigido por el script de Python según el diagrama de la Figura 42.

Figura 40. Control de Temperatura de la solución nutritiva



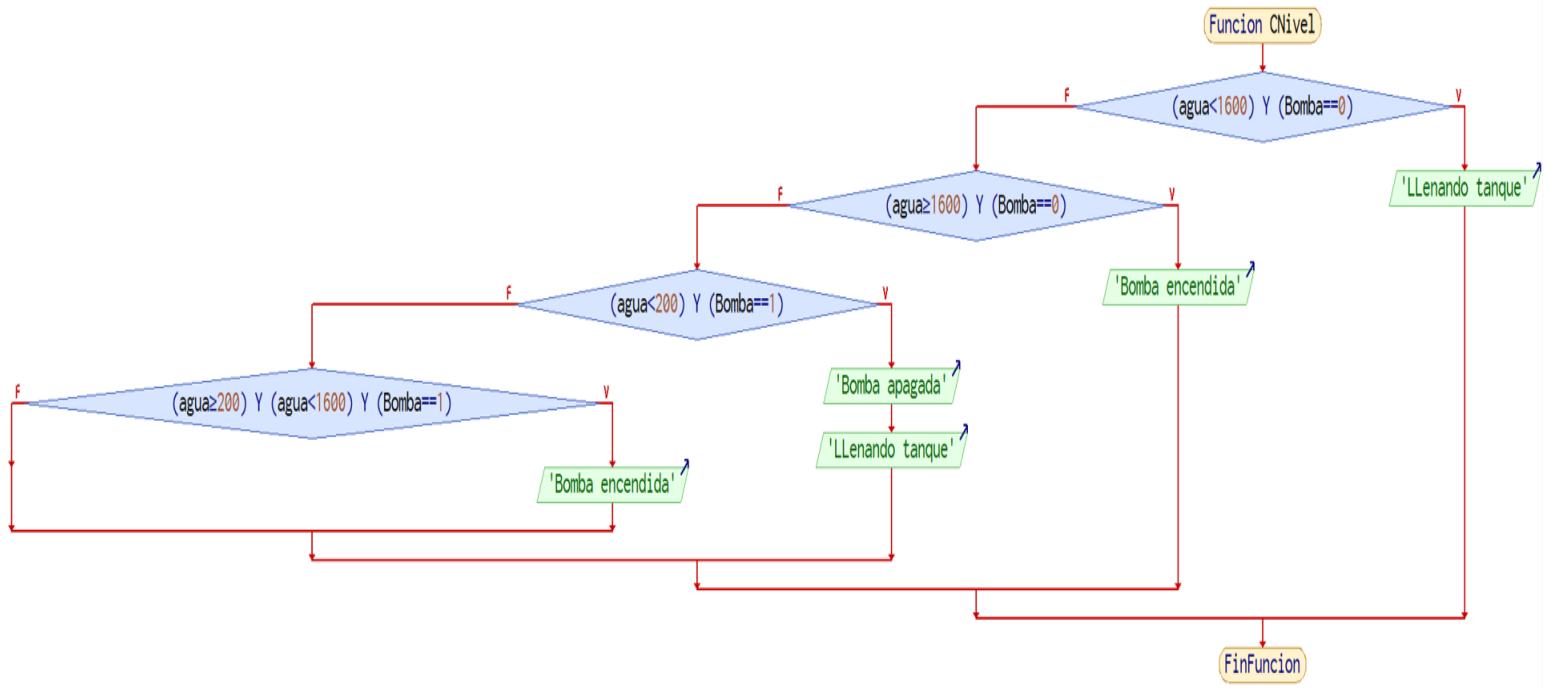
Fuente: (Autores)

Figura 41. Electroválvula



Fuente: (Autores)

Figura 42. Control de nivel



Fuente: (Autores)

5.2.4. Creación de archivos

La función encargada de la generación de los archivos .csv con los valores de las variables censadas, se están generando cada 6 horas, en el horario de 0 a 6, 6 a 12, 12 a 18 y de 18 a 0 horas. Por lo anterior el nombre de cada archivo tiene como estructura la hora de creación, el día, mes y año. Como ejemplo tenemos el siguiente nombre de archivo, “0-11-10-22” este nombre indica que los valores consignados son del día 11 del mes 10 del año 2022 desde las 0 hasta las 6 horas.

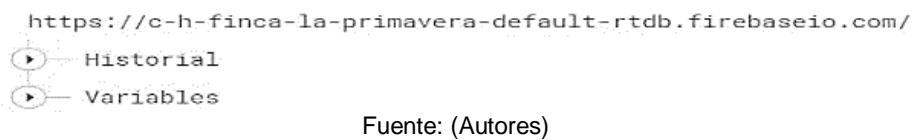
Los valores del pH, CE, T°, nivel y las acciones de control como el estado del aire acondicionado, lavado, la adición de abonos, adición de ácido y base se estarán registrando en cada archivo en un intervalo de 5 minutos.

5.2.5. Base de datos

La base de datos utilizada para almacenar los archivos creados en la sección 5.2.4 es Realtime Database, la cual es un administrador de base de datos con estructura tipo JSON alojada en la nube, permitiendo un almacenamiento y sincronización de los datos en tiempo real (Google, n.d.).

La conexión a Internet por parte de la Raspberry Pi se da gracias a la instalación de un cable utp que está conectado al modem principal, lo que permite enviar los archivos a la base de datos cada 6 horas, para finalmente sean almacenados como se puede apreciar en la Figura 44.

Figura 43. Estructura de la base de datos



Fuente: (Autores)

Figura 44. Formato JSON del archivo en Firebase

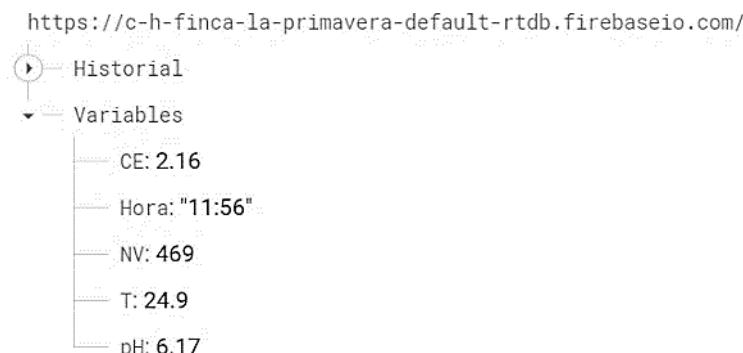
```
"Historial": {
  "0-11-10-22": {
    "-NE5gt5YruJpve7OVKeI": {
      "AddAbnos": "0",
      "AddAc": "0",
      "AddBase": "0",
      "Aire": "0",
      "CE": 1.93,
      "Hora": "0:0",
      "Lavado": "0",
      "NV": "553.0",
      "T": 21.6,
      "pH": 6.19
    },
    "-NE5gtAs0atHiMVbI5z2": {
      "AddAbnos": "0",
      "AddAc": "0",
      "AddBase": "0",
      "Aire": "0",
      "CE": 1.93,
      "Hora": "0:5",
      "Lavado": "0",
      "NV": "553.0",
      "T": 21.6,
      "pH": 6.19
    },
  }
},
```

Fuente: (Autores)

Como se logra apreciar en la Figura 43 y Figura 44, para lograr acceder a los valores guardados en la base de datos, se debe acceder a la llave Historial y seleccionar la llave con el nombre del archivo deseado.

La llave Variables mostrada en la Figura 43, estará siendo actualizada cada dos minutos por el sistema de control con los valores del pH, CE, Hora, T° y nivel de la solución nutritiva Figura 45, esta llave estará siendo llamada por la ampliación móvil y web para la visualización de los valores en tiempo real.

Figura 45. Valores en tiempo real



Fuente: (Autores)

5.2.6. Aplicación móvil

La aplicación móvil fue diseñada en Android Studio, la cual estará conectada a la llave variables (Figura 45) de la base de datos mencionada en la sección 5.2.5, funcionando como un sistema de monitoreo remoto de las variables de la solución nutritiva.

En la pantalla principal de la aplicación móvil mostrada en la Figura 46, se puede visualizar la información de la empresa y del tanque al cual se le va a realizar el control, la fecha y hora con el formato predeterminado del dispositivo móvil. De igual manera, esta ventana contará con dos botones que re direccionarán al usuario a la pantalla de valores en tiempo real o a la pantalla donde se podrán graficar los datos previamente almacenados en la base de datos dentro de la llave Historial.

Figura 46. Pantalla de inicio app Móvil



Fuente: (Autores)

En la pantalla de los valores en tiempo real mostrada en la Figura 47, se puede visualizar el logo de la empresa a la cual se le está realizando el control, la fecha y hora con el formato predeterminado del dispositivo móvil, la hora de la última lectura de las variables de pH, CE, T° y nivel de la solución nutritiva, la cual será actualizada cada 2 minutos. La app mostrará si las variables están dentro de los rangos óptimos o no, de igual manera, esta pantalla poseerá dos botones que estarán re direccionando al usuario a la pantalla de inicio o la pantalla donde se

podrán visualizar las diferentes gráficas de los datos almacenados en la base de datos.

Figura 47. Pantalla de valores en tiempo real



Fuente: (Autores)

La pantalla de visualización de gráficas mostrada en la Figura 48 cuenta con:

- Barras desplegables que facilitan el seleccionar la Hora, Día, Mes y el año de creación del archivo a graficar.
- Un botón de confirmación para la fecha seleccionada.
- Tres botones que re direccionará al usuario a la pantalla grafica del pH, CE y temperatura según haya sido su selección.
- Dos botones que re direccionará al usuario a la pantalla de inicio o a la pantalla de valores en tiempo real, según sea su selección.

Figura 48. Pantalla de selección de archivos para graficarlos.



Fuente: (Autores)

Si el usuario selecciona alguno de los botones de gráfica de pH, CE o T° de la Figura 48, el usuario será re direccionado a la pantalla gráfica de conductividad (Figura 49), de pH (Figura 50) o de temperatura (Figura 51), según haya sido su selección. En estas gráficas se encuentra el respectivo comportamiento de la variable seleccionada, con dos líneas que determinan el valor máximo y mínimo permitido para el correcto desarrollo del cultivo hidropónico.

En las ventanas de las gráficas de las variables, se encuentra un botón que dirige al usuario a la pantalla de la Figura 48.

Figura 49. Grafica de conductividad



Figura 50. Grafica de pH

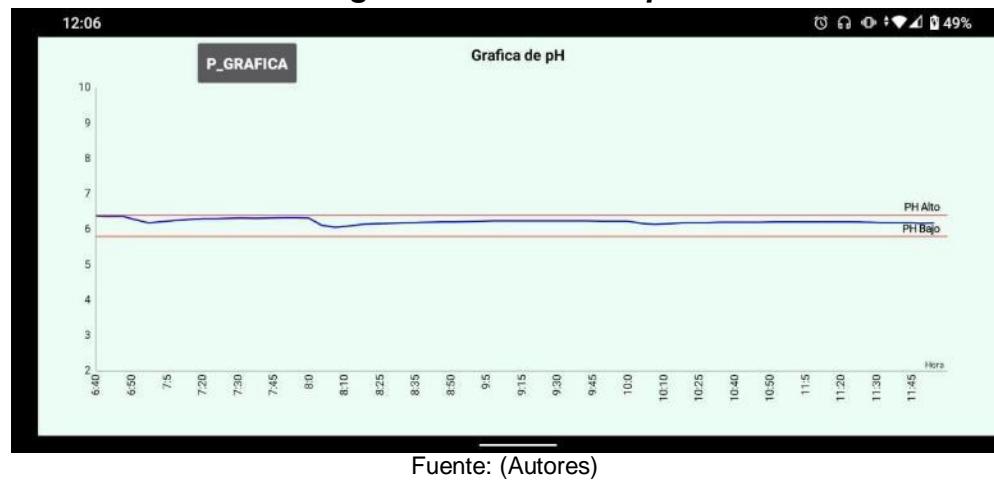
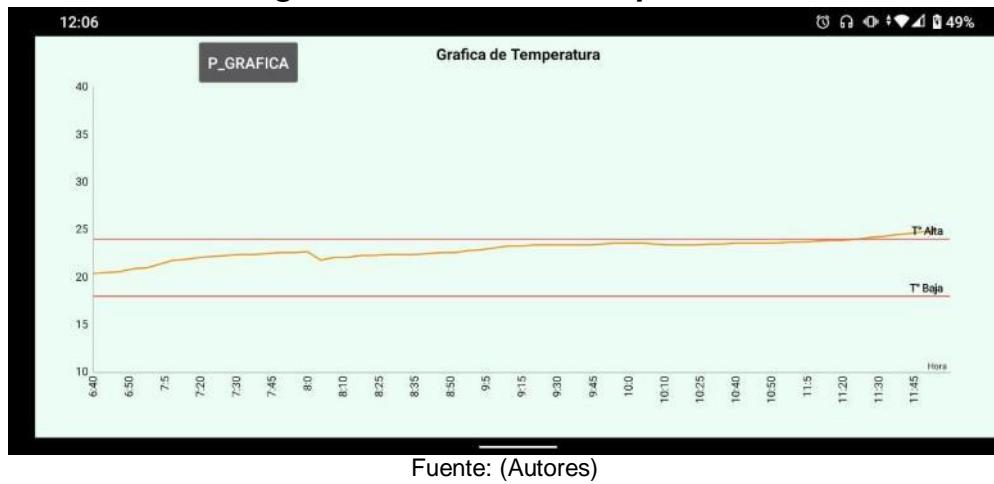


Figura 51. Grafica de Temperatura



5.2.7. Aplicación web

En la pantalla principal de la aplicación Web, Figura 52 se puede visualizar un mensaje de bienvenida, de igual manera cuenta con un botón llamado “ingresar” que enviará al usuario a otra pantalla donde se podrán visualizar las variables predeterminadas (pH, Temperatura y CE) en tiempo real.

Figura 52. página de inicio aplicación Web



Fuente: (Autores)

En la pantalla de la Figura 53, además de observarse las variables físico químicas de la solución nutritiva en tiempo real, se evidencian dos botones que redireccionarán al usuario a la ventana que le permitirá descargar el historial del comportamiento de las variables fisicoquímicas en el transcurso del tiempo (botón historial) y un botón que le permitirá graficar el comportamiento de las variables ya mencionadas con respecto al tiempo (Botón Progreso).

Figura 53. Vista de valores en tiempo real



Fuente: (Autores)

En la pantalla, el botón “Progreso” debemos ingresar el día del dato que queremos observar, adicional a esto, las fechas que están fuera del máximo de 30 días no estarán disponibles para poderse visualizar dentro de las gráficas. Una vez

ingresada la fecha se debe oprimir la opción de “mostrar” y esta desplegará la gráfica del pH (Figura 54), del CE (Figura 55) o de la Temperatura (Figura 56).

Figura 54. Grafica del pH

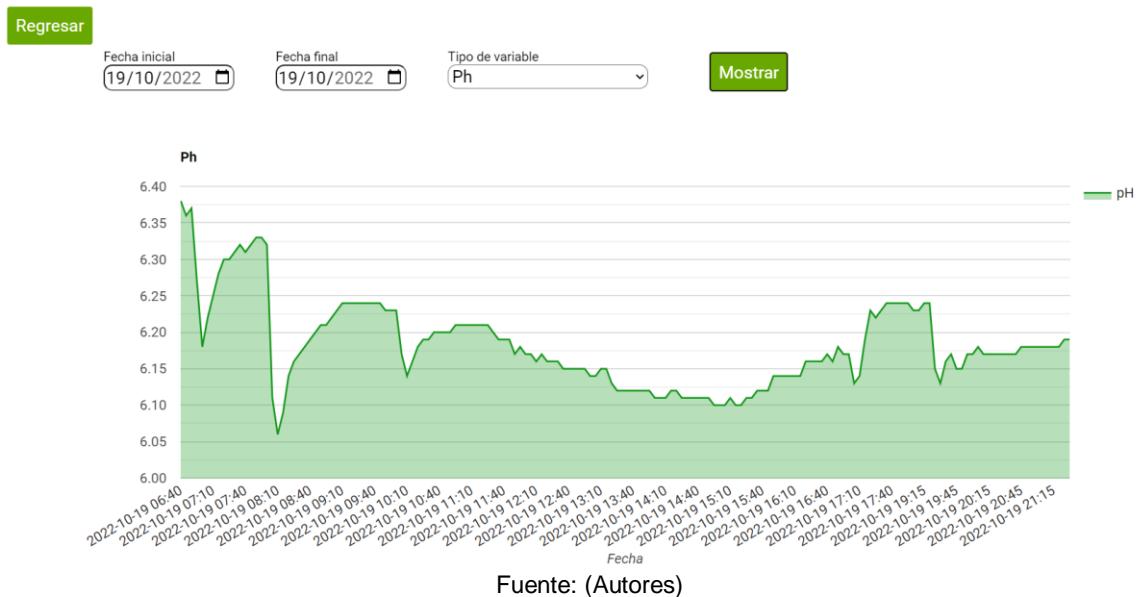


Figura 55. Grafica del CE

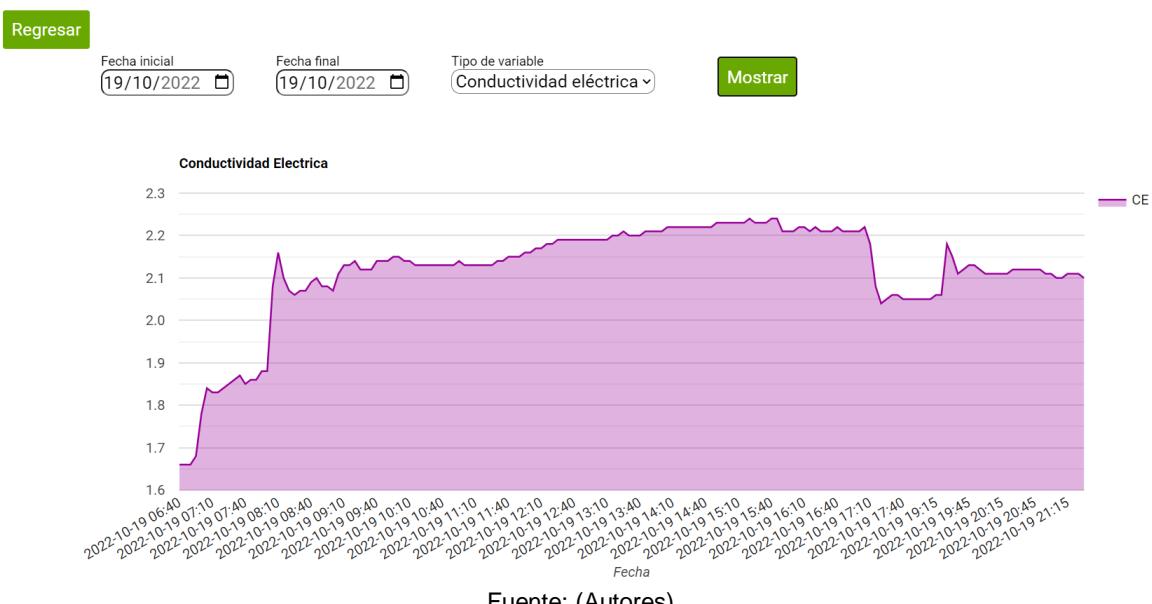
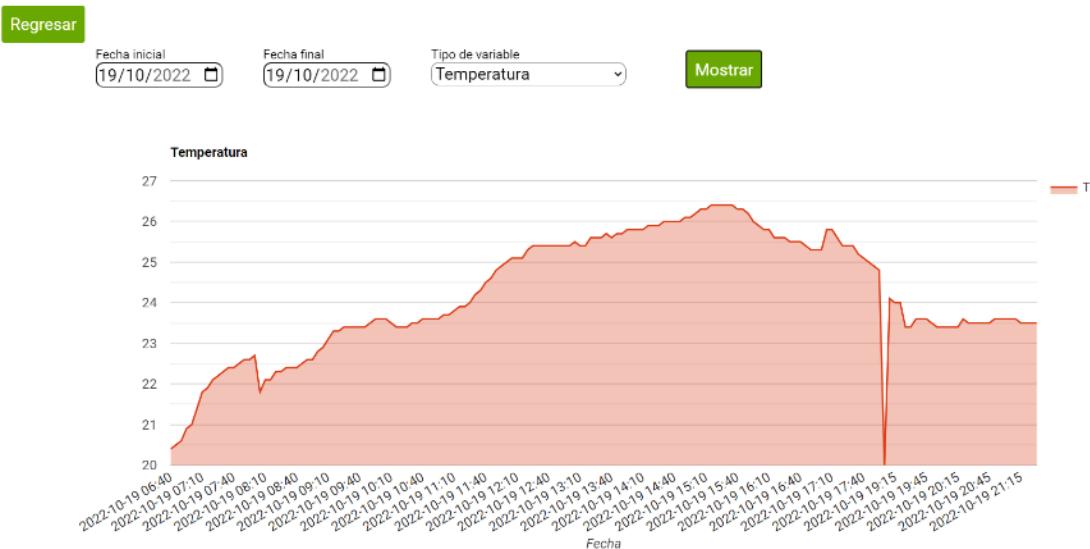


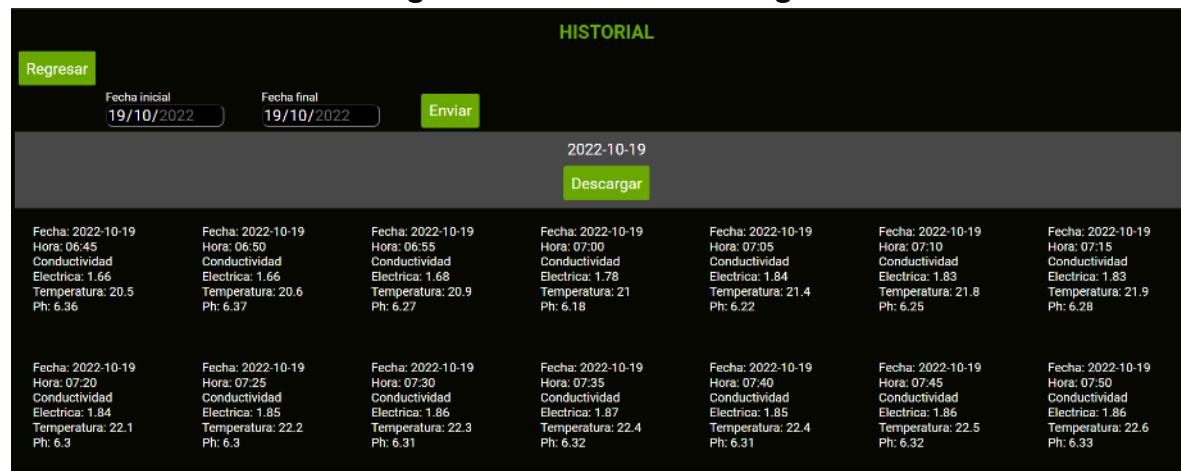
Figura 56. grafica de Temperatura



Fuente: (Autores)

Tras seleccionar el botón Historial, permite ver los valores de las variables almacenados en la nube (máximo 30 días de antigüedad) y también permite hacer la descarga de los archivos correspondientes del día que se escoja, para lo cual se debe ingresar la fecha que se quiere descargar y oprimir el botón enviar. Lo anterior permite observar todos los archivos almacenados en los rangos de tiempo seleccionados; una vez se esté seguro de la información a descargar, se debe seleccionar la opción “descargar”, generando un archivo “.txt” para poder ser visualizados de manera local si así se desea, como se observa en la Figura 57.

Figura 57. Ventana descargar



Fuente: (Autores)

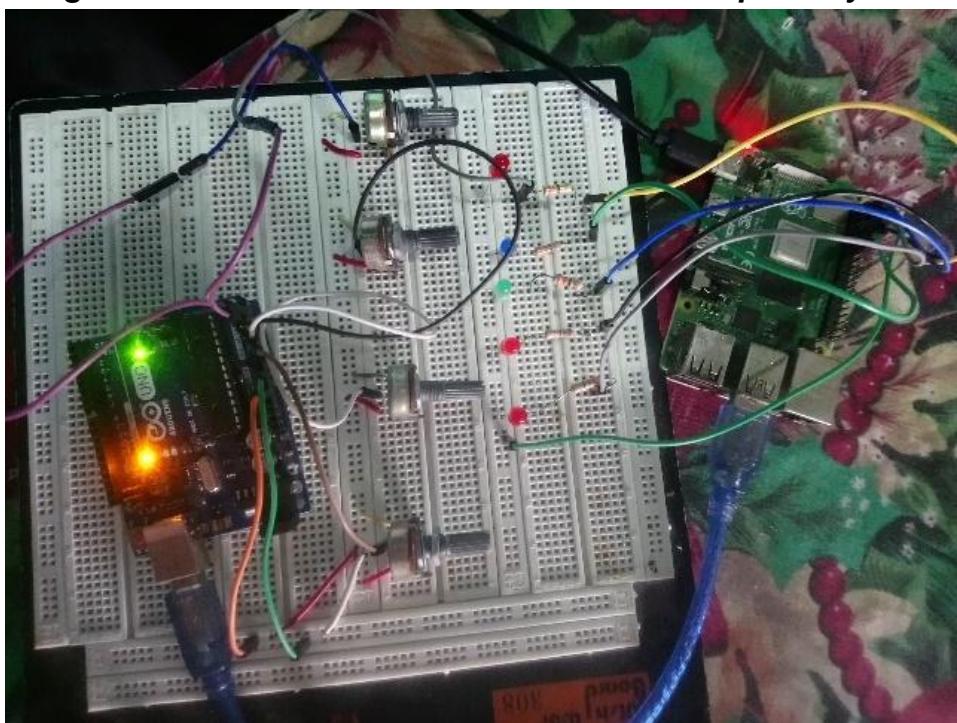
6. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

En esta sección se muestra el proceso de montaje, instalación y configuración del sistema de control de las variables físico químicas del cultivo de lechuga hidropónica. También se expone una comparativa del funcionamiento entre el sistema de control automático y un control manual de las variables físico químicas, finalmente se muestra el desarrollo o crecimiento de dos módulos de producción, uno controlado con el sistema de control automático y otro controlado de manera artesanal o manual.

6.1. PRUEBAS DE CONEXIÓN ENTRE ARDUINO Y RASPBERRY PI

Inicialmente se realizan pruebas del funcionamiento del Script de Python, donde se realiza la comunicación entre Arduino y la Raspberry pi, también se verifica la toma de decisiones teniendo como respuesta de prueba la señal de cuatro potenciómetros. También, se verifica la correcta recepción de los datos en la base de datos de Firebase Figura 58.

Figura 58. Pruebas de funcionamiento del Script de Python



Fuente: (Autores)

6.2. CALIBRACIÓN DE SENSORES DE PH Y CE

Una vez instalados los sensores de pH y CE que se muestran en la Figura 17 y Figura 22 respectivamente, se procede a realizar su calibración con las soluciones buffers dadas por el fabricante, este proceso se evidencia en la Figura 59 y Figura 60.

Figura 59. Calibración a tres puntos de sonda de pH



Fuente: (Autores)

Figura 60. Calibración a dos puntos de la sonda de CE



Fuente: (Autores)

Una vez realizada la calibración de las sondas de medición de pH y CE, se realiza la titulación del comportamiento de la solución nutritiva al aplicarle los reactivos de corrección. De igual manera, se utiliza esta titulación para comparar la respuesta de las sondas de AtlasScientific con el medidor de HANNA tal como está consignado en las secciones 5.1.2 y 5.1.3.

6.3. MONTAJE DEL SISTEMA DE CONTROL

Para el montaje del sistema de control se selecciona una caja de paso hermética de 384 X 304 X 120 mm, donde se ubican los diferentes elementos necesarios para el correcto funcionamiento del sistema tal como se evidencia en la Figura 61.

Figura 61. Ubicación de los elementos de control



Fuente: (Autores)

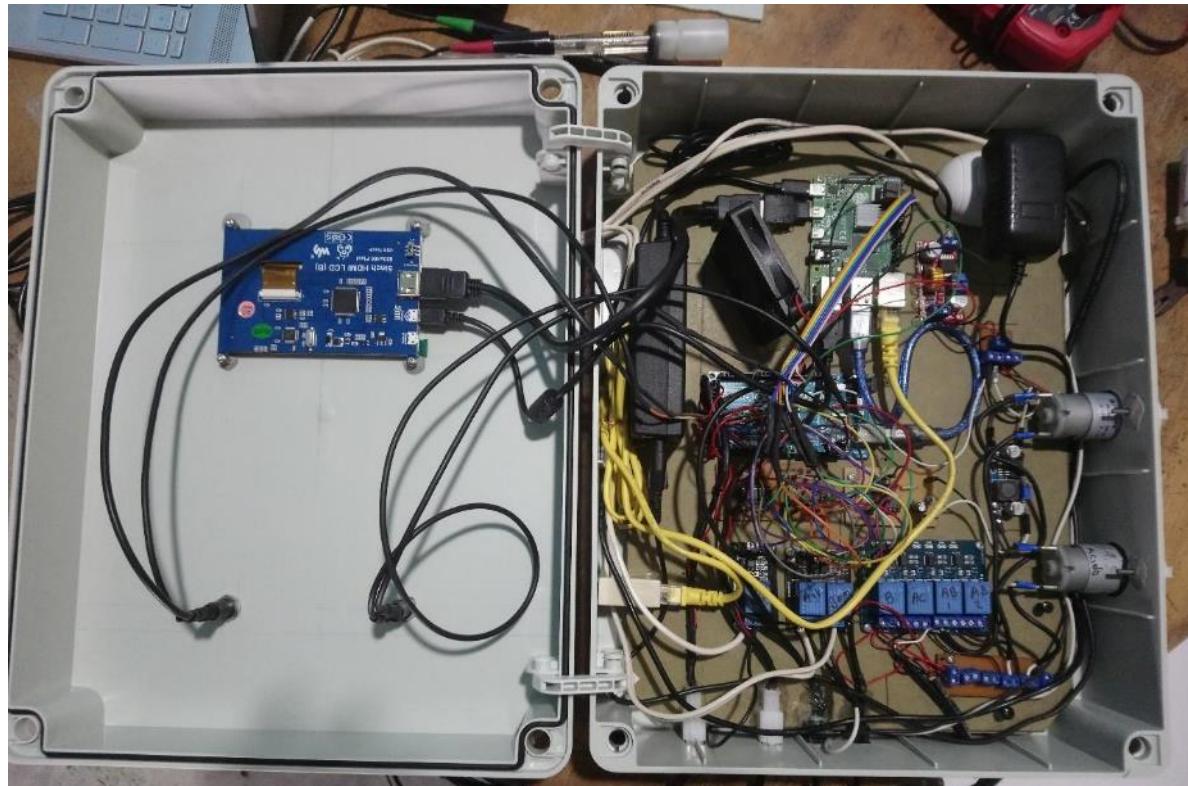
- **A:** Raspberry pi 4b, es el elemento central del sistema de control, pues este estará tomando las decisiones necesarias para la corrección de las variables físico químicas de la solución nutritiva, así como también está a cargo de suministrar de manera correcta la información a la base de datos y la visualización de los mismos en la interfaz gráfica de usuario.
- **B:** Toma corriente, este elemento estará alimentando la tarjeta Raspberry pi.
- **C:** Borneras. En estos elementos estará conectada la línea de fase necesaria para la activación de las electrobombas y el sistema de refrigeración.
- **D:** Regulador de voltaje, este elemento disminuirá el voltaje de 12 Volts entregados por el elemento **J** a 5 Volts, necesarios para el funcionamiento de los módulos relés.
- **E:** Temporizador, este circuito conformado por un integrado 555 estará garantizando un retardo de inicio de los módulos relés de 10 minutos, esto con el fin de proteger las electrobombas y el sistema de refrigeración ante cortes repentinos de energía.

- **F:** Compuertas lógicas, estas compuertas NOT facilitan el trabajo de la lógica de Python con los módulos relés, pues estos trabajan con lógica inversa.
- **G:** Arduino mega, esta tarjeta será la encargada de recolectar la información de los sensores y los estados de los pulsadores y enviarlos por el puerto serial a la Raspberry pi.
- **H:** Módulos relés, son los encargados de activar el sistema de refrigeración, electrobombas, bombas peristálticas y bombas sumergibles según la orden dada por la Raspberry pi.
- **I:** borneras, estas borneras permitirán una fácil conexión de las bombas peristálticas y las bombas sumergibles.
- **J:** Fuente de alimentación, esta fuente de alimentación de 12 Volts, es la encargada de suministrar la energía de funcionamiento a las bombas peristálticas y bombas sumergibles.

6.4. CONEXIÓN DE LOS ELEMENTOS DE CONTROL

Una vez ubicados todos los elementos que conforman el sistema de control, se procede a realizar las respectivas conexiones para su correcto funcionamiento, teniendo en cuenta la distribución y configuración de pines del Arduino mega para la adquisición de datos y los pines GPIO de la Raspberry Pi para la corrección de las variables físico químicas de la solución nutritiva dada en el Script de Python Figura 62.

Figura 62. Conexión de los componentes de control



Fuente: (Autores)

6.5. INSTALACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

Una vez se verificada la conexión y el funcionamiento de los elementos electrónicos que conforman el sistema de control, se procede a la instalación del mismo y de los recipientes contenedores del ácido, base y sales minerales en el lugar de operación Figura 63.

Figura 63. Montaje del sistema de control



Fuente: (Autores)

6.6. PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA DE CONTROL

Al tener el sistema de control instalado, se procede a realizar los preparativos para ponerlo en marcha.

6.6.1. Preparativos iniciales

Se adiciona el ácido, la base y los nutrientes en los recipientes seleccionados para su almacenamiento, cabe resaltar que para el control del CE se usara un kit de

dos compuestos de nutrientes dados por el Ing. agrícola Eder Alberto Oliveros, este proceso se puede evidenciar en la Figura 64.

Figura 64. Adición de los nutrientes a los recipientes contenedores



Fuente: (Autores)

Una vez se tienen los recipientes con las soluciones de corrección, se procede a trasplantar las plántulas de lechugas a los tubos de producción como se observa en la Figura 65. Para este proceso se seleccionaron dos módulos de siembra con diferente tanque principal Figura 66, donde se realiza la comparación del comportamiento de las variables físico químicas controladas por el sistema de control diseñado o automático con el control manual o artesanal.

Figura 65. Trasplante de plántulas a los tubos de producción



Fuente: (Autores)

Figura 66. Identificación del módulo de control automático y control manual



a Sistema controlado automáticamente

b Sistema controlado manualmente

Fuente: (Autores)

6.6.2. Seguimiento de variables

Una vez todos los preparativos iniciales fueron culminados, se realiza un seguimiento del comportamiento de las variables físico químicas durante el ciclo de crecimiento de las lechugas que es aproximadamente 4 semanas, dicho ciclo de crecimiento o producción inicia el día 16 de septiembre del 2022 y culmina el día 20 de octubre del 2022.

Las gráficas que muestran el comportamiento de las variables de pH, CE y temperatura se logran evidenciar en la Figura 67, Figura 68 y Figura 69

respectivamente, cabe resaltar que los datos seleccionados para mostrar el comportamiento de las variables físico químicas fueron tomados a las 11 de la mañana.

Figura 67. Comportamiento del pH

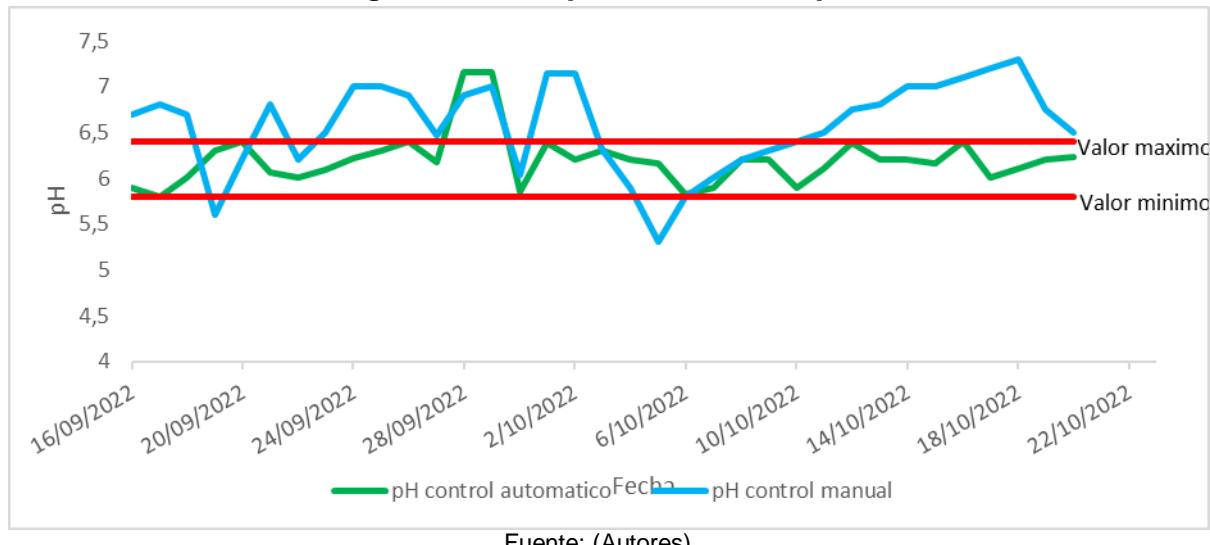
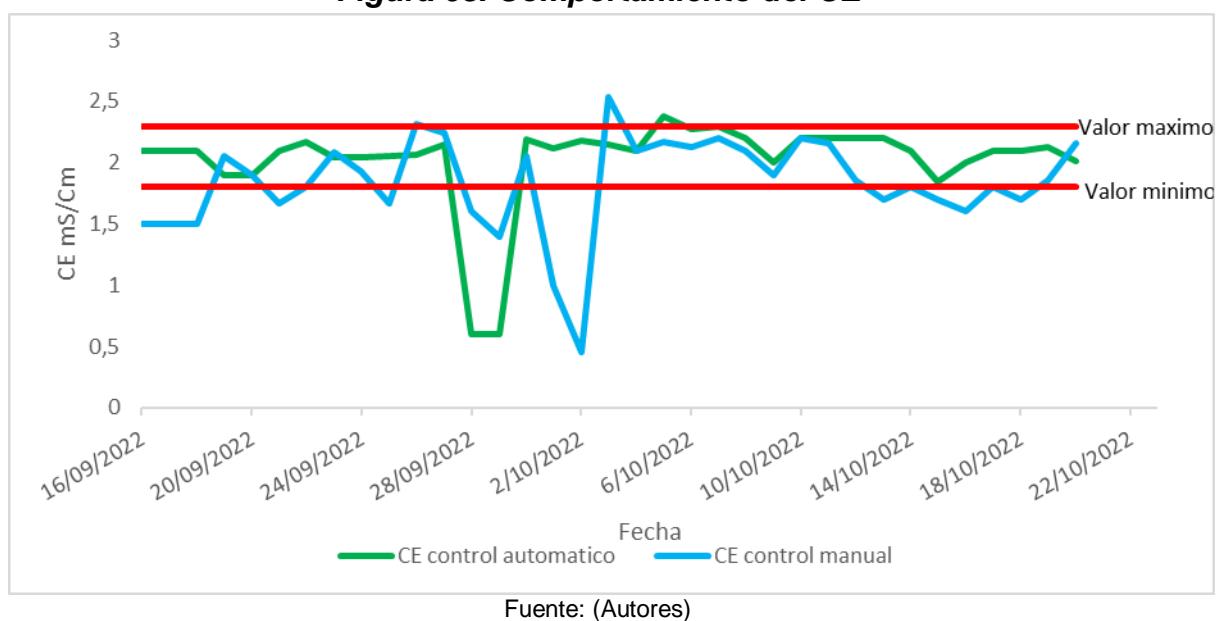
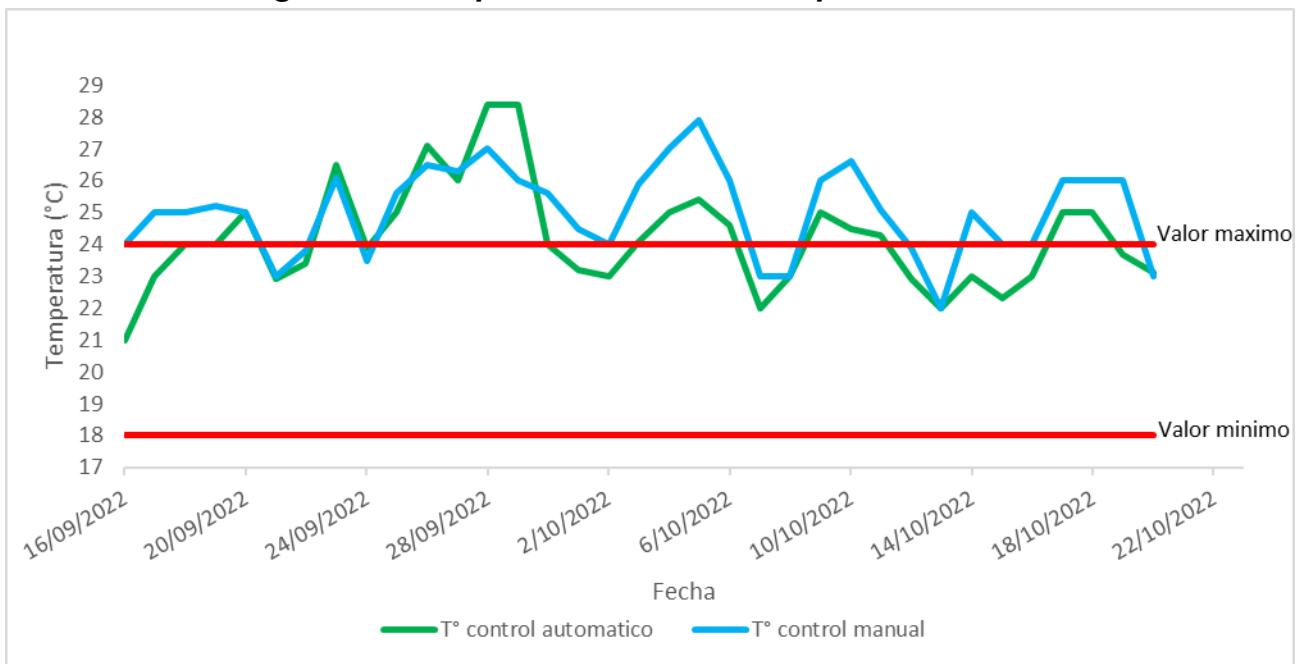


Figura 68. Comportamiento del CE



El comportamiento evidenciado en los días 27 al 29 de septiembre en el control automático y los días 30 de septiembre al 02 de octubre en el control manual de las variables de pH y CE, son originados al proceso de lavado de los respectivos tanques principales.

Figura 69. Comportamiento de la Temperatura



Fuente: (Autores)

El comportamiento de la temperatura en el sistema de control automático de los días 27 al 29 de septiembre, es originado a que el sistema desconecta el sistema de enfriamiento para que se realice el respectivo lavado del tanque principal, además de ello solo activa la electrobomba encargada de la circulación de la solución nutritiva cuando se alcanza el nivel máximo de la misma asignado, mientras que en el control artesanal estas operaciones están en libre decisión del operario.

6.6.3. Seguimiento del desarrollo del cultivo hidropónico

Según (July E. Chiroque & Roislen Castaño Concepción, 2019, los componentes del rendimiento del cultivo de la lechuga son el peso y el número de hojas/planta, teniendo esto en cuenta, para el seguimiento del crecimiento en cm y el incremento en la cantidad de hojas de las 400 lechugas controladas por el sistema automático y las 400 lechugas controladas de manera artesanal. Se determina la muestra necesaria para obtener datos representativos del desarrollo del cultivo hidropónico con la siguiente ecuación:

$$n = \frac{N * Z_{\alpha}^2 * p * q}{e^2 * (N - 1) + Z_{\alpha}^2 * p * q}$$

Donde:

n= Tamaño de la muestra buscada

N= Tamaño de la población

Z= Parámetro estadístico que depende del nivel de confianza

e= error de estimación máximo aceptado

P = probabilidad de que ocurra el evento estudiado (éxito)

Los valores seleccionados para determinar la muestra son:

- N** 400
- Z** 1,645
- P** 50,00%
- Q** 50,00%
- e** 5,00%

Reemplazando los valores se obtiene:

$$n = \frac{400 * (1.645)^2 * 0.5 * 0.5}{(0.05)^2 * (400 - 1) + (1.645)^2 * 0.5 * 0.5} = 161.65 \cong 162$$

Por lo que a 162 de lechugas se le hará el seguimiento de crecimiento y cantidad de hojas cada 4 días.

En la Tabla 3 se puede apreciar el promedio de la cantidad de hojas y del tamaño en cm de las 162 lechugas controladas con el sistema automático y las 162 lechugas controladas de forma artesanal.

Tabla 3. Promedio de crecimiento del cultivo hidropónico

Fecha	Promedio cantidad Hojas		Promedio Crecimiento Tamaño (cm)	
	Control	Manual	Control	Manual
16/09/2022	3	3	7,70	7,59
20/09/2022	4	4	8,38	8,36
23/09/2022	4	4	8,92	9,23
27/09/2022	6	5	11,00	10,92
30/09/2022	6	6	13,05	12,74
4/10/2022	7	7	17,20	14,23
20/10/2022	18	14	28,86	29,36

Los datos del 4 de octubre de 2022 fueron los últimos que se pudieron recolectar estando las lechugas en los tubos de producción, debido al reducido espacio que desde esa fecha se presentó entre las lechugas, lo que impidió la respectiva toma de datos.

En la Figura 71 y Figura 72, se muestra la comparación gráfica del comportamiento en el incremento en la cantidad de hojas y el incremento del tamaño en cm de las lechugas hidropónicas controladas por el sistema diseñado y controladas artesanalmente.

Figura 70 Promedio de la cantidad de hojas de las lechugas

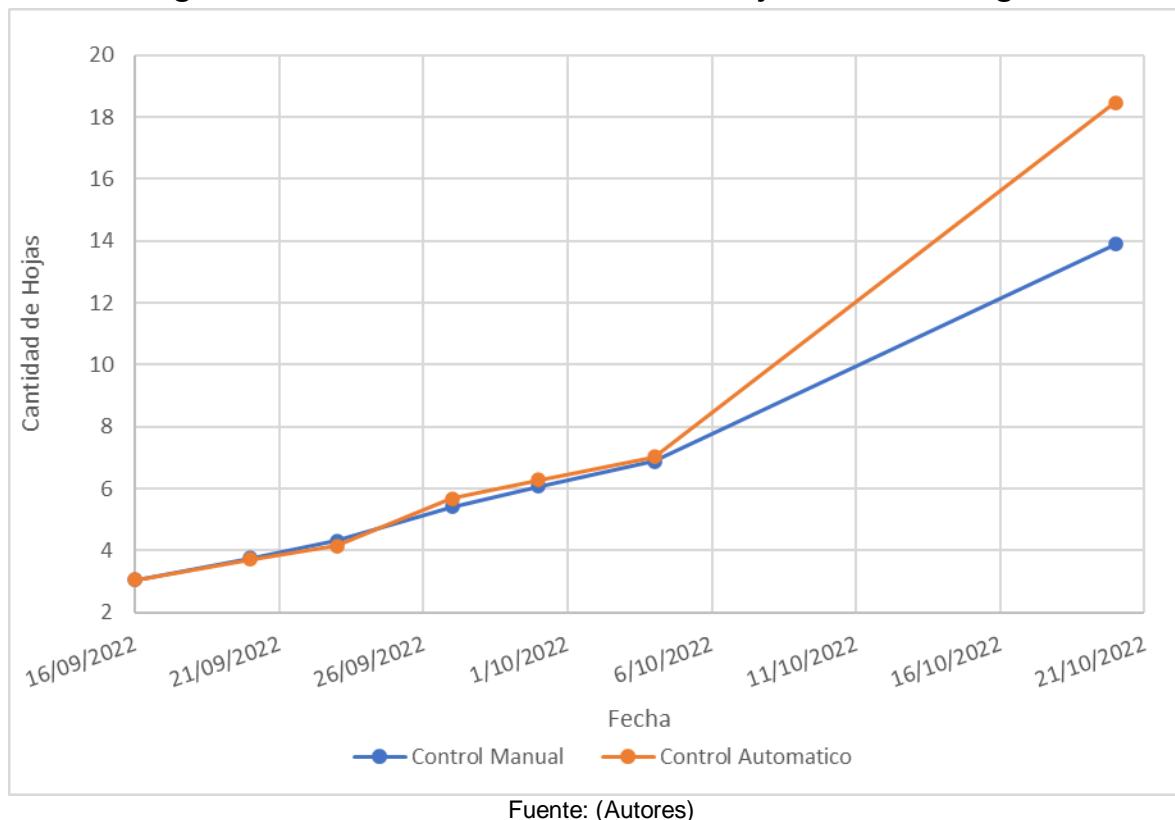
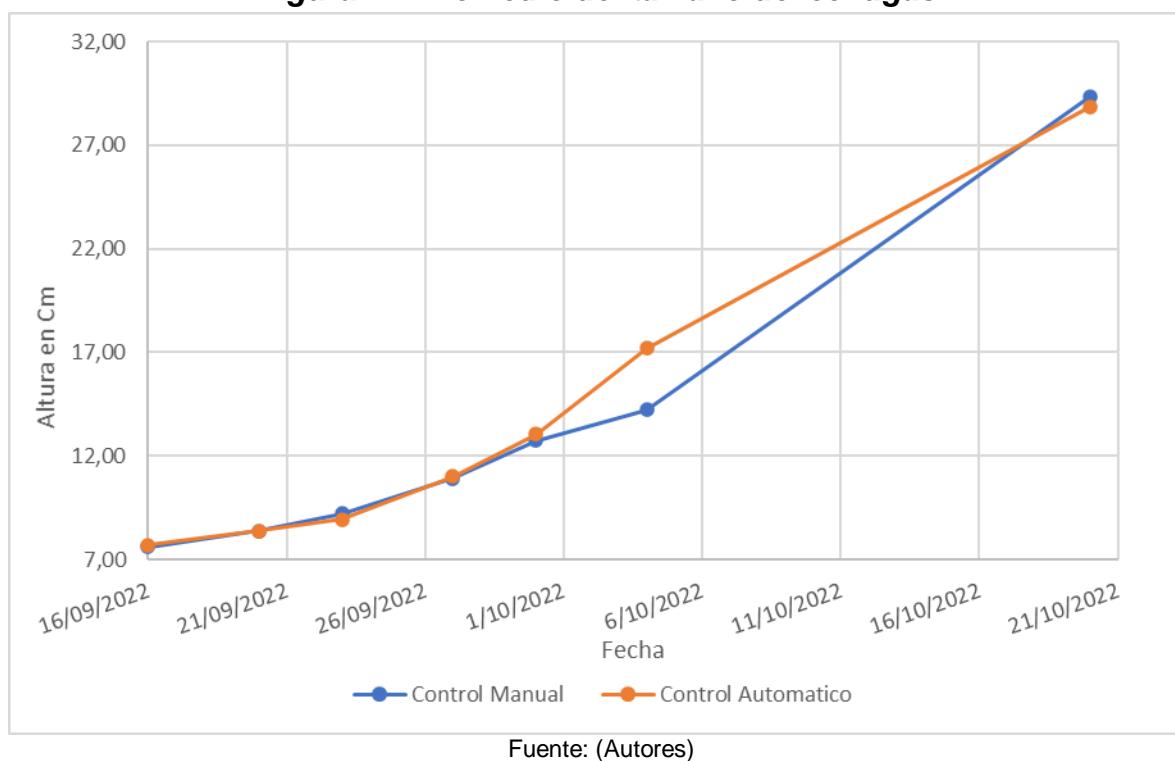


Figura 71. Promedio del tamaño de lechugas



En la Tabla 4 está consignado el peso promedio final en gramos del módulo de las lechugas controladas por el sistema automático y del módulo controlado de manera artesanal.

Tabla 4. Promedio de peso en gramos

Control automático	Control artesanal
263,821	202,494

Durante el ciclo de producción se realizó un registro fotográfico del desarrollo de una lechuga del control automático Figura 72 y una lechuga del control artesanal Figura 73, mostrando la planta al momento de su siembra y la misma planta al momento de su recolección y pesaje.

Figura 72. Lechuga en control automático



Fuente: (Autores)

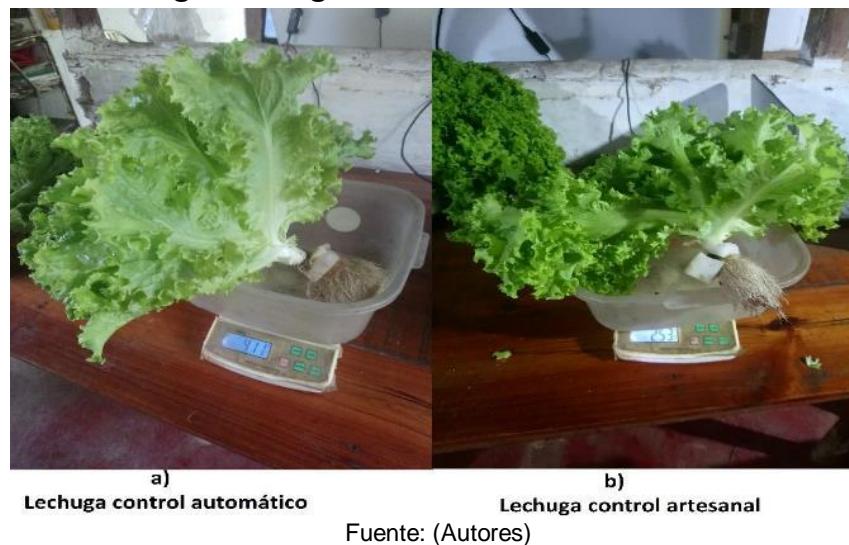
Figura 73. Lechuga en control artesanal



Fuente: (Autores)

Como datos adicionales, en la Figura 74 se muestra la lechuga de mayor peso dada en el control automático y la de mayor peso en el control artesanal.

Figura 74. Lechugas más grandes de los dos módulos muestreados



**a)
Lechuga control automático**

**b)
Lechuga control artesanal**

Fuente: (Autores)

7. CONCLUSIONES

En la presente Tesis se tuvo como objetivo principal el mantener de forma automática las variables físico químicas de la solución nutritiva usada en un cultivo de lechuga hidropónica dentro de los rangos previamente dados por el personal capacitado.

Se evidencia el correcto funcionamiento del sistema de control diseñado al momento de realizar las correcciones de pH, CE y temperatura, lo cual se ha confirmado gracias a que el sistema guarda el valor de las variables físico químicas controladas permitiendo su posterior análisis. Es decir, gracias a que el sistema es capaz de guardar el valor numérico de las variables censadas, es posible realizar gráficas donde se evidencia la correcta corrección de las mismas, logrando de esta manera comprobar que el sistema de control mantiene los valores del pH, CE y temperatura dentro de los límites preestablecidos para el adecuado desarrollo del cultivo de lechuga.

El sistema diseñado permite una visualización en tiempo real del valor de las variables físico químicas de la solución nutritiva del cultivo de lechuga hidropónica, gracias a la interfaz gráfica compuesta por una pantalla de 5" conectada a la Raspberry pi por el puerto HDMI. De igual manera, el monitoreo del estado de las variables se puede hacer de forma remota, gracias a que los valores de estas variables son enviados a la base de datos dispuesta para el proyecto cada 2 minutos, y posteriormente son recuperados por el aplicativo web y móvil desarrollado para el monitoreo de este cultivo en específico.

Una vez culminado el periodo de producción, se realizó el análisis de los datos del crecimiento en cm y el incremento de hojas durante el ciclo de desarrollo de las lechugas, obteniendo un promedio final de 18 hojas por lechuga en el módulo controlado automáticamente en comparación con el promedio de 14 hojas por planta del módulo controlado de manera artesanal. De igual manera, se realizó un pesaje a todas las lechugas que conformaron la muestra, hallando un promedio de 263.821 gramos en el módulo controlado automáticamente y un promedio de 202.494 gramos del bloque controlado artesanalmente, concluyendo en un aumento considerable en las características físicas de las lechugas al tener controladas de manera automática las variables físico químicas de la solución nutritiva utilizada para su producción.

Una vez hecho la implementación del sistema de control se le realizó una entrevista al operario encargado del manejo del cultivo en general, el cual manifestó su satisfacción al ver reducido el tiempo requerido al control de las variables del módulo controlado con el sistema diseñado, evidenciando un gran aporte a los tiempos de manejo utilizados en el manejo del cultivo hidropónico.

8. RECOMENDACIONES

Se recomienda la búsqueda de un nuevo sistema o elemento encargado de la adición del ácido al tanque principal, pues se ha evidenciado un deterioro acelerado en la bomba peristáltica encargada de su suministro, asociado a los gases emitidos por el ácido nítrico utilizado para disminuir el valor del pH de la solución nutritiva.

Se recomienda la búsqueda de componentes que cuenten con mayor precisión al medir la cantidad de líquido presente en el tanque principal, pues el medidor de presión diferencial ha presentado errores en sus medidas, que de no tenerse en cuenta podría llegar a ocasionar desde la avería de la electrobomba por succión de aire o hasta daños irreparables en las lechugas al ocasionar una adición de ácido errónea en la acción de disminución del pH.

Se recomienda incorporar al sistema de control una UPS, para evitar posibles fallas en la Raspberry pi tras apagones repentinos de energía, pues al estar el sistema de control en regiones rurales que son susceptibles a apagones o disminuciones de voltajes repentinos es vulnerable a daños por cambios abruptos en su alimentación.

Se recomienda la utilización de recipientes contenedores de las sales o nutrientes empleados en el control del CE más grandes, esto con el fin de garantizar un periodo más largo de autonomía en el control de dicha variable.

Con el fin de maximizar los tiempos de respuesta del sistema de control, se recomienda investigar otras formas más rápidas de realizar las medidas y aplicar los correctivos necesarios al tanque principal, esto se podría lograr cambiando el punto de muestreo del canal de drenaje a la tubería de salida de la electrobomba encargada de llevar la solución nutritiva a los tubos de producción.

Debido a que el sistema de control diseñado es un prototipo, se recomienda la no manipulación del interior del mismo por personal no capacitado, pues su interconexión de elementos está realizada con jumpers que fácilmente se podrían desconectar y ocasionar daños irreparables en los elementos de medición como las sondas de pH y conductividad o en elementos de control como el Arduino mega y la Raspberry pi.

Se recomienda que el operario del cultivo hidropónico verifique la calibración de las sondas de pH y CE cada 7 días, con el fin de cerciorarse del correcto funcionamiento de las sondas, de igual manera, se recomienda realizar una adecuada limpieza de las mismas cada 4 semanas, debido a que esto ayudara sustancialmente en la vida útil de las sondas en mención.

BIBLIOGRAFÍA

- AGRICULTURERS. *Aprende sobre el sistema hidroponía NFT – Agriculturers.com | Red de Especialistas en Agricultura.* Aprende Sobre El Sistema de Hidroponía NFT.2015. Disponible en: <https://agriculturers.com/aprende-sobre-el-sistema-hidroponia-nft/>
- AGROACTIVO. *BANDEJA X 200 CAVIDADES - Agroactivo.* 2021. Disponible en: <https://agroactivocol.com/producto/equipos-y-herramientas/bandejas-x-200-cavidades/>
- AGROTENDENCIA. (n.d.). *Tipos de Sistemas hidropónicos, diferencias y ventajas.* Retrieved October 3, 2022. Disponible en: <https://agrotendencia.tv/agropedia/cultivos/hidroponia/tipos-de-sistemas-de-hidroponia/>
- APEMA. (n.d.). *Ventajas de las Bombas Peristálticas.* Retrieved October 11, 2022. Disponible en: <https://www.apema.com.ar/ventajas.htm>
- Arduino. (n.d.). *Arduino Mega 2560 | Arduino.cl - Compra tu Arduino en Línea.* Retrieved October 5, 2022. Disponible en: <https://arduino.cl/arduino-mega-2560/>
- ARDUINO. *What is Arduino? | Arduino,* 2018. Disponible en: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>
- AREATECNOLOGICA. (n.d.). *Pulsador.* Retrieved October 6, 2022. Disponible en: <https://www.areatecnologia.com/electricidad/pulsador.html>
- ATLASSCIENTIFIC. (n.d.-a). *Conductividad K 1.0 Kit | atlas científico.* Retrieved October 6, 2022. Disponible en: <https://atlas-scientific.com/kits/conductivity-k-1-0-kit/>
- ATLASSCIENTIFIC. (n.d.-b). *kit de pH | atlas científico.* Retrieved October 6, 2022. Disponible en: <https://atlas-scientific.com/kits/ph-kit/>
- CALDAS, U. D. F. J. de. (n.d.). *TUBERÍA PVC SANITARIA 3" - Especificaciones Técnicas para Construcción de Viviendas.* Retrieved December 25, 2021. Disponible en: <https://sites.google.com/a/correo.udistrital.edu.co/manualviviendas/3-especificaciones-de-materiales/tuberia-hidraulica-y-sanitaria/tuberia-sanitaria-de-3>
- CONOCE HIDROPONÍA. *SOLUCIÓN NUTRITIVA: Puntos a considerar para tener mejores resultados.* 2018. Disponible en: <http://hidroponia.mx/solucion-nutritiva-puntos-a-considerar-para-tener-mejores-resultados/>
- DYNAMO. (n.d.). *Mini bomba sumergible - DynamoElectronics.* Retrieved October 11, 2022. Disponible en: <https://dynamoelectronics.com/tienda/mini-bomba-sumergible/>
- GOBERNACIÓN DEL VALLE DEL CAUCA. *‘PlantToGo’, el robot cultivador hidropónico que es desarrollado en el Valle.* 2022. Disponible en:

<https://www.valledelcauca.gov.co/publicaciones/73611/plantogo-el-robot-cultivador-hidropónico-que-es-desarrollado-en-el-valle/>

GOOGLE. (n.d.). *Firebase*. Retrieved October 18, 2022. Disponible en: <https://firebase.google.com/?hl=es>

GROWERTODAY. *PH para lechuga hidropónica - Grower Today*.2022. Disponible en: <https://www.growertoday.com/es/ph-for-hydroponic-lettuce/>

HANNA instruments. (n.d.). *HI 98131 Medidor de bolsillo de pH/EC/TDS/Temperatura Línea GroLine | HANNA Instruments Colombia*. Retrieved October 11, 2022. Disponible en: <https://www.hannacolombia.com/productos/producto/hi-98131-medidor-de-bolsillo-de-phectdstemperatura-linea-groline>

HIDROPONIA AL CUBO. (n.d.). *Conductividad eléctrica – Hidroponía al cubo*. Retrieved October 4, 2022. Disponible en: <https://hidroponiaalcubo.wordpress.com/conductividad-electrica/>

INFOAGRO. *¿Qué problemas se pueden encontrar al cultivar en hidroponía? - Revista Infoagro México*. 2020. Disponible en: <https://mexico.infoagro.com/que-problemas-se-pueden-encontrar-al-cultivar-en-hidroponia/>

INFOAGRO. *BASF Venture Capital invierte en UrbanKisaan, el pionero de la hidroponía india*. 2021. Disponible en: https://www.infoagro.com/noticias/2021/bASF_venture_capital_invierte_en_urbankisan_el_pionero_de_la_hidropo.asp

INTAGRI. *La Hidroponía: Cultivos sin Suelo | Intagri S.C.* 2017. Disponible en: <https://www.intagri.com/articulos/horticultura-protégida/la-hidroponia-cultivos-sin-suelo>

INTAGRI. *La Industria de los Cultivos Hidropónicos | Intagri S.C.* 2017. Disponible en: <https://www.intagri.com/articulos/horticultura-protégida/la-industria-de-los-cultivos-hidropónicos>

IRONOX. *Sustainability - IronOx*. 2022. Disponible en: <https://ironox.com/sustainability/>

July E. Chiroque, Montalban., & Roislen Castaño Concepción. *Caracterización de la Lechuga (Lactuca sativa.L.) en la unidad Guayabal - Engormix*. 2019. Disponible en: <https://www.engormix.com/agricultura/articulos/caracterizacion-lechuga-lactuca-sativa-t44527.htm>

LAURA BRENES, P., & Maria Fernanda, J. M. *Manual de producción hidropónica para hortalizas de hoja en sistemas NFT*. 2014. Disponible en: <https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/6581/manual-hidroponia-NFT.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

LENS, J. *Cultivo hidropónico_ qué, cómo, cuándo, quién, dónde y por qué*. 2016. Disponible en: <https://ecoinventos.com/las-5w-del-cultivo-hidropónico/>

LLAMAS, L., September 2). *Leer un pulsador con Arduino*. 2014. Disponible en: <https://www.luisllamas.es/leer-un-pulsador-con-arduino/>

MACTRÓNICA. (n.d.). *SONDA SENSOR DE TEMPERATURA DS18B20*. Retrieved October 8, 2022. Disponible en: <https://www.mactronica.com.co/sonda-sensor-de-temperatura-ds18b20>

MORALES-CASCO, L. A., & Zúniga-González, C. A. Impactos del cambio climático en la agricultura y seguridad alimentaria. *Rev. Iberoam. Bioecon. Cambio Clim.*, 2(1), 269–291.2016. Disponible en: <https://doi.org/10.5377/ribcc.v2i1.5700>

NATIONAL GEOGRAPHIC ESPAÑA. El cambio climático cambiará la agricultura mundial. *National Geographic España*. 2019. Disponible en: https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/el-cambio-climatico-cambiara-la-agricultura-mundial_9948

NAYLAMP. (n.d.). *Tutorial sensor digital de temperatura DS18B20*. Retrieved October 8, 2022. Disponible en: https://haylampmechatronics.com/blog/46_tutorial-sensor-digital-de-temperatura-ds18b20.html

OLIVEROS YARA, E. A. Requerimientos de las lechugas hidroponicas. (Y. S. Oliveros Yara, Entrevistador). 2021.

OYERVIDES B, J. A., Hernández Carpio, A., & López Cuervo, T. N. Revista especializada en procesos industriales - Virtual Pro. *VIRTUALPRO*, 230, 3–24. 2021. Disponible en: <https://www.virtualpro.co/revista/tendencias-en-automatizacion/3>

PUENTES, T. (n.d.). *Impacto de la hidroponía en el Medio Ambiente - Salud For You*. Retrieved October 31, 2022. Disponible en: <https://www.saludforyou.com/impacto-hidroponia-medio-ambiente/>

RASPBERRY PI. (n.d.). *Buy a Raspberry Pi 4 Model B – Raspberry Pi*. Retrieved October 5, 2022. Disponible en: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/>

RASPBERRYPI. (n.d.). *¿Que es Raspberry Pi? - Raspberry Pi*. Retrieved October 4, 2022. Disponible en: <https://raspberrypi.cl/que-es-raspberry/>

RIVERA ARBELÁEZ, S. *El Resurgimiento de la Agricultura Urbana: Cultivos Hidropónicos - ANEIA - Universidad de Los Andes*. 2020. Disponible en: <https://agronegocios.uniandes.edu.co/2020/08/30/el-resurgimiento-de-la-agricultura-urbana-cultivos-hidroponicos/>

ROBOTS DIDACTICOS. *Módulos de relé y Arduino: Domótica (1) | Robots Didácticos*. 2020. Disponible en: <https://robots-argentina.com.ar/didactica/modulos-de-rele-y-arduino-domotica-1/>

RUS, C. *Raspberry Pi 4, características, precio y ficha técnica*. 2019. Disponible en: <https://www.xataka.com/ordenadores/raspberry-pi-4-caracteristicas-precio-ficha-tecnica>

SANTANA, B. Raspberry Pi: Qué es, para qué sirve y qué podemos hacer. *Profesional Review*, 1–12. 2019. Disponible en: <https://www.profesionalreview.com/2021/07/18/que-es-raspberry-pi/>

SEMICONDUCTOR, F. (n.d.). *MPX5500 Integrated Silicon Pressure Sensor On-Chip Signal Conditioned, Temperature Compensated and Calibrated*.

Universidad agrícola. (n.d.). *Requerimientos para un cultivo hidropónico - Universidad Agrícola*. Retrieved October 3, 2022. Disponible en: <https://universidadagricola.com/requerimientos-para-un-cultivo-hidroponomico/>

VERDEGEN. *Tipos de sistemas hidropónicos para cultivar [figura]* generacionverde.com. HIDROPONÍA. 2017. Disponible en: <https://generacionverde.com/blog/hidroponia/tipos-de-sistemas-hidroponicos/>

ANEXOS

Anexo A. Precio de equipos

Equipos						
Descripción	Cant	Valor unitario	Recurso Usco	Recurso facultad	Recurso contrapartida	Entidad financiadora
Computador portátil	1	\$ 2.500.000,00	No	No	No	Tesistas

Anexo B. Precio de materiales, insumos y servicios técnicos

Materiales - Insumos - Servicios técnicos							
Descripción	Cant	Valor unitario	Recurso Usco	Recurso facultad	Recurso contrapartida	Entidad financiadora	Subtotal
Arduino mega	1	\$ 92.000,00	No	No	No	Tesistas	\$ 92.000,00
Raspberry Pi	1	\$ 259.000,00	No	No	No	Tesistas	\$ 259.000,00
Adaptador Raspberry pi	1	\$ 23.000,00	No	No	No	Tesistas	\$ 23.000,00
Kit Sensor de pH	1	\$ 638.989,63	No	No	No	Tesistas	\$ 638.989,63
Kit Sensor de CE	1	\$ 911.790,63	No	No	No	Tesistas	\$ 911.790,63
Sensor de Temperatura	1	\$ 12.000,00	No	No	No	Tesistas	\$ 12.000,00
Sensor de presión diferencial	1	\$ 219.900,00	No	No	No	Tesistas	\$ 219.900,00
Pantalla para Raspberry pi	1	\$ 294.800,00	No	No	No	Tesistas	\$ 294.800,00
Contactor	2	\$ 30.000,00	No	No	No	Tesistas	\$ 60.000,00
Bomba peristáltica	2	\$ 57.900,00	No	No	No	Tesistas	\$ 115.800,00
Bomba sumergible	2	\$ 40.990,00	No	No	No	Tesistas	\$ 81.980,00
Electro válvula	1	\$ 30.400,00	No	No	No	Tesistas	\$ 30.400,00
Recipientes plásticos	4	\$ 5.000,00	No	No	No	Tesistas	\$ 20.000,00
Mangueras siliconadas	1	\$ 10.500,00	No	No	No	Tesistas	\$ 10.500,00
Regulador de Voltaje	1	\$ 7.500,00	No	No	No	Tesistas	\$ 7.500,00
Fuente de voltaje para PC	1	\$ 35.000,00	No	No	No	Tesistas	\$ 35.000,00
Relés	1	\$ 27.000,00	No	No	No	Tesistas	\$ 27.000,00
Compuerta NOT	2	\$ 1.400,00	No	No	No	Tesistas	\$ 2.800,00
Bornera	12	\$ 700,00	No	No	No	Tesistas	\$ 8.400,00
Caja plástica	1	\$ 90.000,00	No	No	No	Tesistas	\$ 90.000,00
Cable Utp Cat 6	1	\$ 75.000,00	No	No	No	Tesistas	\$ 75.000,00
Jumpers	60	\$ 220,00	No	No	No	Tesistas	\$ 13.200,00
Varios	1	\$ 100.000,00	No	No	No	Tesistas	\$ 100.000,00
Total							\$ 3.129.060,26

Anexo C. Precio de software

Software						
Descripción	Cant	Valor unitario	Recurso Usco	Recurso facultad	Recurso contrapartida	Entidad financiadora
Python	1	0	NO	NO	NO	Tesistas
Arduino	1	1	NO	NO	NO	Tesistas

Anexo D. Titulación del comportamiento del ácido

AGUA (Litros)	T (°C)	ÁCIDO (mL)	RESULTADO PH		VARIACION
			SONDA (Atlas Scientific)	MEDIDOR (HANNA HI 98131)	
10	20	0	9,19	9,2	
10	20	0,05	9	9,07	0,19
10	20	0,1	8,94	8,99	0,06
10	20	0,15	8,79	8,81	0,15
10	20	0,2	8,63	8,64	0,16
10	20	0,25	8,36	8,4	0,27
10	20	0,3	8,06	8,09	0,3
10	20	0,35	7,81	7,87	0,25
10	20	0,4	7,61	7,65	0,2
10	20	0,45	7,47	7,52	0,14
10	20	0,5	7,39	7,41	0,08
10	20	0,55	7,27	7,3	0,12
10	20	0,6	7,21	7,23	0,06
10	20	0,65	7,13	7,14	0,08
10	20	0,7	7,05	7,06	0,08
10	20	0,75	6,97	6,97	0,08
10	20	0,8	6,86	6,9	0,11
10	20	0,85	6,73	6,77	0,13
10	20	0,9	6,62	6,65	0,11
10	20	0,95	6,52	6,57	0,1
10	20	1	6,42	6,48	0,1
10	20	1,05	6,33	6,35	0,09
10	20	1,1	6,24	6,25	0,09
10	20	1,15	6,11	6,14	0,13
10	20	1,2	5,98	6,03	0,13
10	20	1,25	5,83	5,83	0,15
10	20	1,3	5,64	5,65	0,19
10	20	1,35	5,39	5,39	0,25
10	20	1,4	5,07	5,08	0,32
10	20	1,45	4,8	4,78	0,27
10	20	1,5	4,57	4,58	0,23
10	20	1,55	4,45	4,46	0,12
10	20	1,6	4,34	4,34	0,11
10	20	1,65	4,25	4,25	0,09
10	20	1,7	4,17	4,17	0,08
10	20	1,75	4,1	4,09	0,07
10	20	1,8	4,04	4,03	0,06
10	20	1,85	3,98	3,97	0,06
10	20	1,9	3,92	3,92	0,06
10	20	1,95	3,88	3,87	0,04

10	20	2	3,83	3,82	0,05
Promedio					0,1340

Anexo E. Titulación del comportamiento de la base

AGUA (Litros)	T (°C)	BASE (mL)	RESULTADO PH		VARIACION
			SONDA (Atlas Scientific)	MEDIDOR (HANNA HI 98131)	
10	20	0	3,63	3,64	
10	20	0,05	3,65	3,83	0,02
10	20	0,1	3,65	3,84	0
10	20	0,2	3,68	3,86	0,03
10	20	0,3	3,71	3,89	0,03
10	20	0,4	3,74	3,92	0,03
10	20	0,5	3,77	3,95	0,03
10	20	0,6	3,8	3,98	0,03
10	20	0,85	3,83	4,01	0,03
10	20	1,1	3,91	4,1	0,08
10	20	1,35	4	4,19	0,09
10	20	1,6	4,11	4,3	0,11
10	20	1,85	4,27	4,46	0,16
10	20	2,1	4,51	4,71	0,24
10	20	2,35	4,95	5,17	0,44
10	20	2,6	5,42	5,65	0,47
10	20	2,85	5,75	6	0,33
10	20	3,1	5,99	6,25	0,24
10	20	3,35	6,19	6,46	0,2
10	20	3,6	6,4	6,69	0,21
10	20	3,85	6,58	6,89	0,18
10	20	4,1	6,84	7,15	0,26
10	20	4,35	7,3	7,59	0,46
10	20	4,6	8,14	8,43	0,84
10	20	4,85	8,58	8,88	0,44
10	20	5,1	8,98	9,3	0,4
10	20	5,35	9,18	9,45	0,2
Promedio					0,2135

Anexo F. Titulación del comportamiento del CE

AGUA (Litros)	T (°C)	ABONO (mL)	RESULTADO CE		VARIACIÓN (mS)
			SONDA (Atlas Scientific) uS	MEDIDOR (HANNA HI 98131) uS	
10	20	0	619	661	
10	20	2	721	772	0,102
10	20	4	831	888	0,11
10	20	6	933	1008	0,102
10	20	8	1033	1111	0,1
10	20	10	1130	1215	0,097
10	20	12	1227	1319	0,097
10	20	14	1315	1335	0,088
10	20	16	1407	1505	0,092
10	20	18	1498	1631	0,091
10	20	20	1592	1748	0,094
10	20	22	1677	1862	0,085
10	20	24	1770	1965	0,093
10	20	26	1858	2066	0,088
10	20	28	1951	2109	0,093
10	20	30	2033	2170	0,082
10	20	32	2124	2195	0,091
10	20	34	2206	2250	0,082
10	20	36	2292	2323	0,086
10	20	38	2373	2486	0,081
10	20	40	2455	2604	0,082
10	20	42	2541	2689	0,086
10	20	44	2621	2707	0,08
10	20	46	2710	2905	0,089
Promedio					0,0909