



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

ESCUELA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO EN MECATRÓNICA

TEMA:

“SISTEMA DE CULTIVO HIDROPÓNICO DOMÉSTICO PARA
EXTERIORES”

AUTOR: GREGORI ARON GUALTOR BUITRÓN

DIRECTOR: CARLOS XAVIER ROSERO CHANDI

IBARRA-ECUADOR
NOVIEMBRE 2021



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA
AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA
UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento con el Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el *Repositorio Digital Institucional*, con la finalidad de apoyar los procesos de investigación, docencia y extensión de la Universidad para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

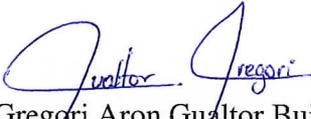
DATOS DEL AUTOR			
CÉDULA DE IDENTIDAD	172690555 – 5		
APELLIDOS Y NOMBRES	GUALTOR BUITRÓN GREGORI ARON		
DIRECCIÓN	Los Tulipanes S/N y Av. Jorge Guzmán Rueda, Ibarra-Imbabura		
EMAIL	gagualtor@utn.edu.ec - ar-gregori@hotmail.com		
TELÉFONO FIJO	022304196	TELÉFONO MÓVIL	0996175358
DATOS DE LA OBRA			
TÍTULO	“SISTEMA DE CULTIVO HIDROPÓNICO DOMÉSTICO PARA EXTERIORES”		
AUTOR	GREGORI ARON GUALTOR BUITRÓN		
FECHA	24 Noviembre 2021		
PROGRAMA	PREGRADO		
TÍTULO POR EL QUE OPTA	INGENIERO EN MECATRÓNICA		
DIRECTOR	CARLOS XAVIER ROSERO C.		



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CONSTANCIA

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es original, y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, 24 Noviembre de 2021


Gregori Aron Gualtor Buitrón
C.I.: 172690555 – 5



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CERTIFICACIÓN

En calidad de director del trabajo de grado “SISTEMA DE CULTIVO HIDROPÓNICO DOMÉSTICO PARA EXTERIORES”, presentado por el egresado GREGORI ARON GUALTOR BUITRÓN, para optar por el título de Ingeniero en Mecatrónica, certifico que el mencionado proyecto fue realizado bajo mi dirección.

Ibarra, 24 Noviembre de 2021

Carlos Xavier Rosero Chandi
DIRECTOR DE TESIS

Agradecimiento

Quiero expresar mi agradecimiento a la Universidad Técnica del Norte no solo por abrirme sus puertas sino por la formación académica recibida. Especial gratitud para Ing. Xavier Rose-ro, tutor y amigo esencial para el desarrollo de este proyecto, Agradecimiento a los docentes de CIME quienes a lo largo de la carrera transmitieron sus conocimientos.

Hoy reconozco que la fortaleza para superar momentos difíciles así como el soporte invaluable de tantas personas representadas en seres tan importantes como mi familia y amigos. Mi inmensa gratitud directamente a mi tío Rodrigo quien es un padre para mí y a mi abuelita Meli-da, juntos estuvieron en cada paso brindándome su apoyo financiero y moral. A mi madre que siempre estuvo para escucharme y motivarme. A mis amigos Bryan, David, Agustín, Michael, Andrés, Xavier, Adriana, Cristina y al resto de compañeros y personas que conocí en la ciudad de Ibarra gracias por los momentos compartidos y acompañarme en mi carrera universitaria.

También quiero expresar agradecimientos especiales a Bryan, Marcos y Andy Cañarte, sin su apoyo no se habría podido llevar a cabo este proyecto de tesis.

Gregori Aron Gualtor Buitrón

Dedicatoria

A mi madre y hermana, Yesenia y Giulyanna.

A mi tío y abuelita, Rodrigo y Melida.

Este trabajo ha sido posible gracias a ellos.

Gregori Aron Gualtor Buitrón

Resumen

En el presente documento se expone el trabajo realizado en un cultivo hidropónico NFT horizontal en el cual se trasplantó lechuga cresa de 5 semanas de haber germinado y que además se instaló un sistema de supervisión capaz de monitorear la temperatura ambiente, temperatura de la solución nutritiva, el nivel de solución, el nivel de pH y la conductividad eléctrica (CE), además de realizar funciones de riego por temporizador, regulación de pH, configuración de los ciclos de riego por temperatura y calibración de sondas. Para esto se procede a realizar una selección de los materiales y componentes que se van a emplear en la construcción del prototipo, basándonos en una evaluación de criterios ponderados, donde el principal requerimiento es que se encuentre disponible en el mercado local donde se desarrolla esta tesis siendo la ciudad de Ibarra en la provincia de Imbabura. El diseño del prototipo propuesto implementó funciones especiales que cambian el comportamiento del sistema de acuerdo con la información adquirida por los sensores, funciones de seguridad, generación de registro histórico y funciones de registro. Para realizar la validación del sistema propuesto se realiza 2 ciclos de cultivo, 1 manual y 1 automático, los cuales nos permitieron comparar los resultados de estos y constatar que la autonomía del sistema mejora notablemente la calidad del producto final.

Abstract

This paper presents job carried out in a horizontal NFT hydroponic crop in which crepe lettuce was transplanted 5 weeks after germination and which also installed a monitoring system capable of monitoring the ambient temperature, temperature of the nutrient solution, the level of solution, the pH level and the electrical conductivity (EC), in addition to performing functions of timer irrigation, pH regulation, configuration of temperature irrigation cycles and calibration of probes. This is way, selection of materials and components it's very important to construction of the prototype, based on an evaluation of weighted criteria, where the main requirement is that it is available in the local market where this thesis is developed being the city of Ibarra in the province of Imbabura. The design of the proposed prototype implemented special functions that change the behavior of the system according to the information acquired by the sensors, security functions, generation of historical record and registration functions. To make the validation of the proposed system, 2 cultivation cycles, 1 manual and 1 automatic, were carried out, which allowed us to compare the results of these and verify that the autonomy of the system significantly improves the quality of the final product

Índice general

Introducción	XIV
Problema	XIV
Objetivos	XV
Problema	XV
Objetivos Específicos	XV
Justificación	XV
Alcance	XVI
1. Revisión Literaria	1
1.1. Generalidades de los cultivos hidropónicos	1
1.1.1. Ventajas	1
1.1.2. Desventajas	2
1.1.3. Comparación de cultivos en tierra con cultivos hidropónicos	3
1.1.4. Factores que influyen en un sistema de técnica de película nutritiva	4
1.2. Estado de la técnica en cultivos hidropónicos	5
2. Metodología	6
2.1. Selección de plantas y solución nutritiva	6
2.1.1. Selección de plantas	6
2.1.2. Formulación de la solución nutritiva	6
2.1.2.1. Ciclo de riego de la planta de lechuga	7
2.2. Diseño de la estructura	7
2.3. Diseño de hardware	9
2.3.1. Parámetros de supervisión	9
2.3.2. Selección de sensores	10
2.3.2.1. Sensor de temperatura	10
2.3.2.2. Sensor de Ph	11
2.3.2.3. Sensor de conductividad	12
2.3.2.4. Sensor de nivel	13
2.3.2.5. Caudalímetro	15
2.3.3. Selección de actuadores	16
2.3.3.1. Bomba hidráulica de recirculación de solución nutritiva	16

2.3.3.2.	Bomba hidráulica dosificadora de ácido	17
2.3.3.3.	Selección de controlador para tarjeta principal	18
2.3.3.4.	Selección de unidad para tarjeta de control	20
2.3.4.	Arquitectura del hardware	21
2.3.4.1.	Subsistema de adquisición de datos y control de actuadores	22
2.3.4.2.	Unidad de control	24
2.3.4.3.	Alimentación	24
2.3.4.4.	Visualización	25
2.4.	Software	27
2.4.1.	Software de la tarjeta principal	27
2.4.2.	Software de control de visualización de alertas	28
2.4.3.	Software de la computadora principal	30
2.4.4.	Control del sistema de regulación de pH	31
3.	Implementación y Resultados	33
3.1.	Construcción del cultivo hidropónico NFT	33
3.1.1.	Construcción del invernadero	33
3.1.2.	Construcción de la estructura física	34
3.2.	Implementación del hardware del cultivo hidropónico	36
3.2.1.	Construcción de la tarjeta principal	36
3.2.2.	Construcción del driver de la bomba reguladora de pH	36
3.2.3.	Construcción de la tarjeta de visualización	37
3.2.4.	Instalación y conexión de circuitos	38
3.3.	Puesta en marcha del sistema de cultivo hidropónico	39
3.3.1.	Preparación del sistema de cultivo hidropónico	39
3.3.2.	Transplante de las plantulas de lechuga	39
3.3.3.	Tanque de solución, mezcla de nutrientes y regulación de pH	40
3.3.4.	Configuración de los ciclos de riego	40
3.3.5.	Ciclo diario de riego	41
3.3.6.	Calibración de la sonda de pH	42
3.3.7.	Calibración de la sonda de conductividad	43
3.4.	Resultados	44
3.4.1.	Evolución de las plantulas de lechuga durante el ciclo de producción	44
3.4.2.	Consumo de la solución nutritiva durante el ciclo de producción	46
3.4.3.	Tamaño de raíces y hojas al finalizar los ciclos de cultivo	47
4.	Conclusiones y trabajo futuro	49
4.1.	Conclusiones	49
4.2.	Trabajo futuro	51
4.3.	Fotografías	54

Índice de figuras

1.1. Sistema de Cultivo Hidropónico NFT. [11]	2
1.2. Cultivo hidropónico de sistema NFT. [12]	3
1.3. Diagrama de las variables de control y monitoreo.	4
1.4. Tabla comparativa de prototipos de cultivo hidropónico.	5
2.1. Esquema de estructura física del sistema de cultivo hidropónico.	8
2.2. Vasos plásticos usados como canastillas.	8
2.3. Sensor de temperatura DS18B20. [23]	10
2.4. Sensor de Ph 4502C. [24]	11
2.5. Sensor de conductividad TDS. [25]	13
2.6. Sensor de nivel por ultrasonido HC-SR04. [26]	14
2.7. Sensor de caudal YF-401. [27]	15
2.8. Bomba hidráulica Aqua 30W. [28]	17
2.9. Bomba hidráulica de diafragma R385. [29]	18
2.10. Tarjeta Arduino nano. [30]	19
2.11. Tarjeta Raspberry Pi 3 B+. [31]	21
2.12. Diagrama de arquitectura de hardware.	22
2.13. Esquema de la tarjeta principal.	23
2.14. Unidad de control.	24
2.15. Sistema de Alimentación.	24
2.16. Sistema de Visualización.	26
2.17. Diagrama graficet de la tarjeta principal.	27
2.18. Máquina de estados de la computadora principal, sección controlada por tiempos.	30
2.19. Máquina de estados de la computadora principal, sección controlada por condiciones.	31
2.20. Control de la bomba dosificadora de pH. [22]	32
3.1. Fotografía del invernadero.	33
3.2. Estructura física del sistema de cultivo hidropónico.	34
3.3. Armario que contiene la electrónica.	34
3.4. Tubos de PVC.	35
3.5. Depósito y bomba de solución nutritiva.	35
3.6. Tarjeta Principal.	36

3.7. Tarjeta encargada de controlar la bomba reguladora de pH.	37
3.8. Tarjeta que controla los indicadores visuales LED RGB.	37
3.9. Sistema de visualización local por medio de luces.	38
3.10. Tablero con la conexión de todos los componentes electrónicos del sistema. . .	38
3.11. Trasplante de plantulas al sistema de cultivo hidropónico NFT.	39
3.12. Contenedores de las soluciones nutritivas A, B y C.	40
3.13. Captura aplicación de configuración de control de riego. [22]	41
3.14. Captura aplicación de configuración de riego por temperatura. [22]	41
3.15. Captura aplicación de configuración de ciclo de riego diario. [22]	42
3.16. Soluciones de calibración de sensor de pH.	42
3.17. Regresión lineal de los valores de voltaje y pH de referencia. [22]	43
3.18. Calibración conductividad. [22]	43
3.19. Evolución de las plantas de lechuga por semanas.	45
3.20. Gráfico de nivel de consumo en el ciclo de cultivo manual.	46
3.21. Gráfico de nivel de consumo en el ciclo de cultivo con control de pH.	46
4.1. Comparación del promedio de largo de hoja máximo y mínimo y largo de raíz.	50
4.2. Comparación del promedio de peso de las lechugas.	50
4.3. Corte a medida deseada del perfil L ranurado.	54
4.4. Construcción del invernadero.	54
4.5. Captura del modelo diseñado en software de modelado 3D.	55
4.6. Construcción del sistema de distribución de solución nutritiva.	55
4.7. Válvulas reguladoras del paso de solución nutritiva.	56
4.8. Lechuga cosechada.	56
4.9. Tablero de electrónica.	57
4.10. Toma de datos de lechugas cosechadas.	57
4.11. Diagrama de circuito de la tarjeta principal.	58
4.12. Diagrama de circuito del driver de control de pH.	58
4.13. Diagrama de circuito de la tarjeta de visualización.	59

Índice de cuadros

1.1. Comparación cultivo tradicional en suelo y cultivo hidropónico	3
2.1. Criterios ponderados para sensor de temperatura.	10
2.2. Criterios ponderados para sensor de Ph.	11
2.3. Criterios ponderados para sensor de Conductividad.	12
2.4. Criterios ponderados para sensor de nivel.	14
2.5. Criterios ponderados para sensor de caudalímetro.	15
2.6. Criterios ponderados para selección de bomba hidráulica de solución.	16
2.7. Criterios ponderados para bomba dosificadora de solución diácida.	17
2.8. Criterios ponderados para la selección de controlador de la tarjeta principal. . .	19
2.9. Criterios ponderados para la selección de la unidad de tarjeta de control.	20
2.10. Comandos de comunicación para la tarjeta principal.	23
2.11. Código de indicadores de luz.	25
2.12. Comandos soportados por el controlador LED. [22]	28
2.13. Selección de LED para asignación de color. [22]	28
2.14. Asignación de colores. [22]	29
2.15. Modos de parpadeo. [22]	29
3.1. Tabla del fabricante para calibración por compensación de temperatura.	44
3.2. Resultados Cosecha 1 manual.	47
3.3. Resultados Cosecha 2 con control de pH.	48
4.1. Materiales utilizados para la construcción de la electrónica del sistema.	52
4.2. Materiales utilizados para la construcción de la estructura del sistema.	53
4.3. Materiales utilizados para la construcción del invernadero.	53

Introducción

Problema

En el Ecuador, la agricultura es uno de los ejes principales de la economía [1], a finales del 2018 representó un 8% del Producto Interno Bruto (PIB) [2] y durante los últimos años se ha trabajado por incrementar la productividad y así cumplir con la demanda interna y externa. Solo en Imbabura se cuenta con 283.659 hectáreas destinadas al cultivo, según el informe entregado por el Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC) [3].

La cadena de producción hortícola implica diversas etapas antes de llegar al consumidor, el período postcosecha de los cultivos es donde se producen las mayores pérdidas de la producción. Esto se debe principalmente al corto período de perecibilidad que poseen algunas de las hortalizas. Además, el daño físico causado por la mala manipulación puede causar ataques de hongos y diferentes patógenos que deberán ser controlados con fungicidas [4], que también son potencialmente tóxicos para los seres humanos. Pueden tener efectos perjudiciales para la salud, por ejemplo, provocar cáncer o acarrear consecuencias para los sistemas reproductivo, inmunitario o nervioso [5].

Ahora se ha presentado un nuevo escenario, la pandemia de corona-virus es una emergencia de salud pública y una crisis económica sin precedentes en la interferencia con la vida cotidiana. [6]. Sin embargo, la necesidad y la manera de adquirir nuestros alimentos no ha cambiado, los mercados se volvieron una zona de riesgo [7] debido a las aglomeraciones y flujo de personas.

Actualmente la hidroponía es el método más intensivo de producción hortícola; generalmente es de alta tecnología lo que implica altos costos de establecimiento por lo que solo las grandes empresas lo realizan. Por tal motivo se presenta como solución un sistema de cultivo hidropónico de bajo costo enfocado a satisfacer a hogares y sectores urbanos [8]. Con la producción sin suelo se obtienen hortalizas de excelente calidad y sanidad, y se asegura un uso más eficiente del agua y fertilizantes. Los rendimientos por unidad de área cultivada son altos, por la mayor densidad y la elevada productividad por planta [4].

Al cultivar con este método casero se reduce el uso de agua hasta en un 90 por ciento, ya que ésta se puede reciclar y reutilizar en actividades del hogar, generando un ahorro de agua hasta 10 veces más en comparación con los cultivos tradicionales [9]. Además, brinda salud mental, ya que reduce el estrés y proporciona satisfacción a quien lo practica, asimismo es una actividad ocupacional que permite producir alimentos sin dañar el ambiente. Esta técnica no depende de las condiciones del clima ya que permite cosechar fuera de temporada y cultivar durante todo el año [9].

Objetivos

Objetivo General

Reproducir un prototipo de cultivos hidropónico NFT (Técnica de Película Nutritiva) doméstico para exteriores con software y hardware libre.

Objetivos Específicos

- Identificar los elementos y variables físicas que determinan el correcto funcionamiento de un sistema de cultivos hidropónico y relacionar con la selección del hardware necesario para el sistema.
- Construir el prototipo de sistema de cultivos hidropónicos con materiales que se encuentren en el mercado local y adaptable a hogares con terraza o balcón.
- Verificar el funcionamiento del sistema aplicando un cultivo de corto período de crecimiento.

Justificación

En el desarrollo de este prototipo se aplicarán conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera de ingeniería en mecatrónica.

El prototipo y la información obtenida servirán como base para el incentivo de nuevos estudios en el tema como la implementación de lazos de control cerrado que brinden mayor autonomía al sistema. Podría también usarse para realizar análisis con distintos tipos de productos y determinar cuan aptos son para esta técnica de cultivo.

Alcance

En el presente trabajo se replicará un sistema de cultivos hidropónico NFT doméstico para exteriores como terrazas y balcones, haciendo uso de hardware libre y diferentes sensores necesarios para monitorizar al menos 3 variables, además, contará con un control de lazo cerrado para nivelar el pH del tanque.

Capítulo 1

Revisión Literaria

1.1. Generalidades de los cultivos hidropónicos

La palabra hidroponía deriva del griego **hidro** (agua) y **ponos** (labor o trabajo) lo cual significa literalmente trabajo en agua. Es una herramienta que permite el cultivo de plantas sin suelo, es decir sin tierra, cuyo crecimiento es posible gracias al suministro adecuado de los requerimientos hídrico-nutricionales a través de agua y solución nutritiva. Generalmente asociamos esta forma de cultivo con grandes invernaderos para el cultivo de plantas y el empleo de la más compleja tecnología; sin embargo, los orígenes de la hidroponía fueron muy simples en su implementación. El desarrollo actual de la técnica de los cultivos hidropónicos está basado en la utilización de mínimo espacio, mínimo consumo de agua y máxima producción y calidad [10].

En el cultivo hidropónico existen varias formas de riego, como el sistema por goteo, aeropónico y el sistema NFT objetivo de este proyecto se utiliza para cultivos donde la raíz no sea muy grande como es el caso de las hortalizas [12].

NFT donde las raíces de las plantas se suspenden sobre una corriente de solución de nutrientes que fluye continuamente y que les proporciona toda el agua, nutrientes y oxígeno que necesitan para mantener un crecimiento rápido y saludable de las plantas [11].

Los cultivos NFT se pueden implementar con facilidad en el sector urbano donde las viviendas no disponen de espacios verdes suficientes para sembrar en suelo o disponen de pequeñas terrazas, o pequeños patios logrando así que cada una de ellas obtenga sus propios alimentos orgánicos [13].

1.1.1. Ventajas

Los cultivos hidropónicos presentan una variedad de ventajas al ser cultivos sin suelos, y una nueva manera de producción orgánica para la alimentación de las personas tanto en el sec-

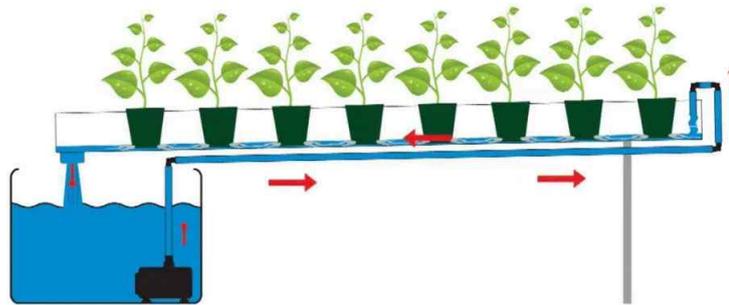


Figura 1.1: Sistema de Cultivo Hidropónico NFT. [11]

tor urbano como en el sector rural de cada país [14].

- Control nutricional adecuado para el cultivo.
- Corrección rápida y fácil de los nutrientes para los cultivos.
- Control de pH (indica el grado de alcalinidad o acidez de una solución).
- Mayor producción en menor tiempo.
- Libre de contaminación provocada por el suelo.
- No existe exploración del suelo.
- Amigable con el medio ambiente.
- Manejo óptimo de recursos hídricos.

1.1.2. Desventajas

Siendo un sistema mucho más completo que los cultivos en tierra y con menor riesgo de contaminación de plantas, los cultivos hidropónicos presentan leves desventajas [14].

- Se necesitan conocimientos básicos previos para la implementación de estos cultivos.
- El abastecimiento de agua debe ser continuo.
- No existe una buena difusión de que es y cómo funciona este método de cultivos.

Cuadro 1.1: Comparación cultivo tradicional en suelo y cultivo hidropónico

	Cultivo en suelo	Cultivo hidropónico
Nutrición de la planta	Difícil control del alimento para la planta debido al medio en el que se encuentra (suelo).	Fácil control de la mezcla de solución nutritiva y agua que sirve de alimento para las plantas.
Espacio	Se necesita tierra fértil lo cual es perjudicial para el medio ambiente por la deforestación de árboles, químicos que se usan para lograr tierras fértiles entre otras.	Se los puede realizar en pequeños espacios, tierras infértiles, no necesitan mayor espacio para optimizar la cantidad de plantación para sembrar.
Enfermedades	Alto grado de contaminación por bacterias que se encuentran en el suelo, además de los pesticidas usados para su limpieza.	No existe contaminación y no hay agentes que produzcan contaminación o enfermedades para las plantas
Agua	Cuando la planta es joven puede presentarse estrés hídrico que es falta de agua en la planta debido a que el suelo absorbe minerales y la exposición de estos al sol hace que se evapore más rápidamente.	No hay presencia de estrés hídrico ya que el agua se encuentra cien por ciento disponible para las plantaciones.

1.1.3. Comparación de cultivos en tierra con cultivos hidropónicos

En el Cuadro 1.1 se parecían las diferencias encontradas en la comparación de un cultivo tradicional en suelo y un cultivo hidropónico:

De esta tabla podemos llegar a la conclusión de que los beneficios que brinda como método de cultivo alternativo claramente son superiores a los cultivos tradicionales.



Figura 1.2: Cultivo hidropónico de sistema NFT. [12]

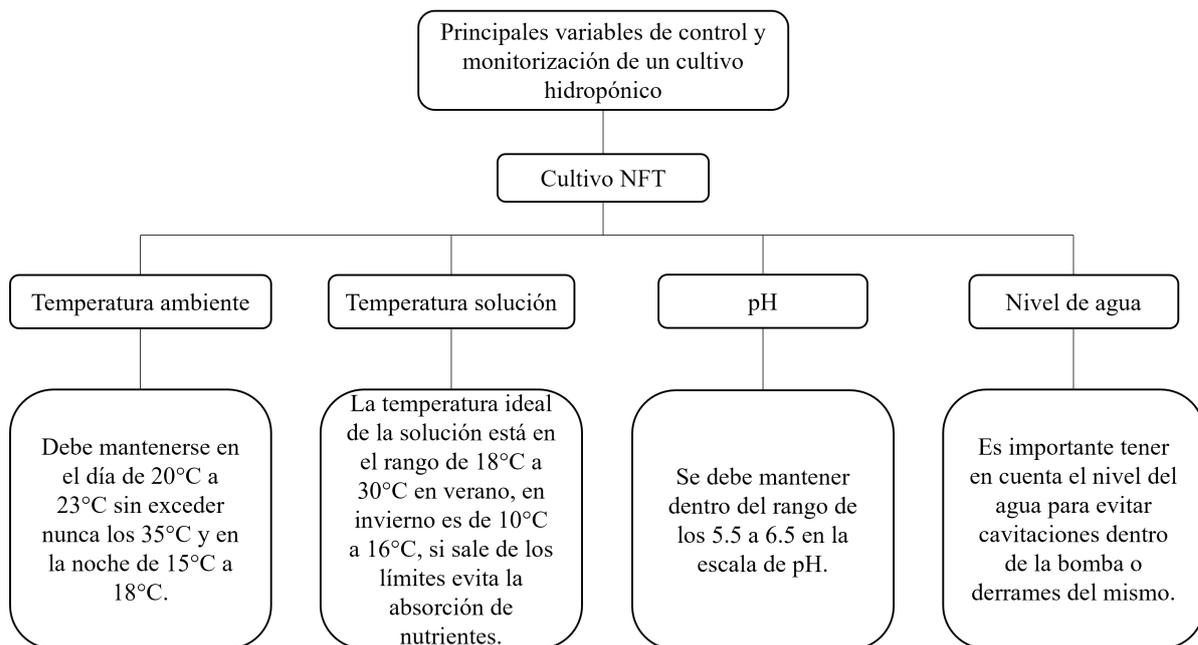


Figura 1.3: Diagrama de las variables de control y monitoreo.

1.1.4. Factores que influyen en un sistema de técnica de película nutritiva

En un sistema NFT intervienen varios factores que son específicos para cada tipo de cultivo entre los cuales destacan los siguientes, que son los principales para el tipo de cultivo que se utilizará en el presente documento [15].

- Temperatura: Entre 13 a 15 °C de la solución nutritiva facilita la absorción a la planta.
- pH: Optimo de 5.5 a 6.5.
- Conductividad eléctrica: De 750 a 1500 ppm rango indicado para que las plantas no se deshidraten por altas cantidades de sales o baja absorción de nutriente por ausencia de estas.
- Longitud del canal: Hasta un límite de 20 m en hortalizas
- Anchura del canal: Generalmente de 10 a 30 cm
- Pendiente del canal: Se recomienda rango 1.5 y 2% para que el flujo del líquido sea adecuado.

1.2. Estado de la técnica en cultivos hidropónicos

La aplicación de tecnología en el área de cultivos hidropónicos ha permitido mejorar el rendimiento, desarrollo de las plantas cultivadas en el mismo. Esto se debe a que se solucionan muchos de los problemas que de otra forma dificultarían el proceso de producción. Sin embargo no existe un único enfoque tecnológico en la resolución de problemas en el cultivo hidropónico. A lo largo del tiempo se han desarrollado múltiples proyectos que presentan diversas características en busca de mejorar y optimizar este proceso. La tabla 1.4 muestra una comparación de prototipos de sistemas hidropónicos construidos en la actualidad.

	Control automático de pH en cultivo NFT basado en Raspberry PI	Sistema de mezcla de soluciones nutritivas y preparación de pH para cultivo NFT
Características técnicas	Regulación automática del pH	Control automático de la dosificación de nutrientes
	Acceso remoto al sistema	HDMI de control
Tipo de cultivo	NFT horizontal	NFT horizontal-vertical
Producción	12 plantas por cosecha	18 plantas por cosecha
Algoritmo de control	PID-control local	PID-control local
Capacidad del depósito	46,81 litros	15 litros
Estructura	Metalica	En madera
Escalable	Probablemente	No
Costos	aprox \$500	aprox \$300

Figura 1.4: Tabla comparativa de prototipos de cultivo hidropónico.

Capítulo 2

Metodología

En este capítulo procederemos a seleccionar los componentes que se utilizarán en la construcción de este prototipo mediante criterios ponderados.

2.1. Selección de plantas y solución nutritiva

2.1.1. Selección de plantas

La lechuga es una hortaliza que generalmente se cultiva para el uso de su hoja vegetal, se consume fresca como complemento para alimentos [20]. La variedad de lechuga que se ha seleccionado para aplicarse en la ubicación geográfica Ibarra, Imbabura es la "Green Salad Bowl". Esta variedad es una roseta de mediano tamaño con hojas profundamente lobuladas de color verde claro. Su textura y sabor son buenos, por lo que tiene aceptación de los consumidores. El tiempo que se demora en madurar es de 60 a 65 días [20]. Cabe recalcar que para el sistema se adquirió lechugas germinadas de aproximadamente 4 semanas.

2.1.2. Formulación de la solución nutritiva

La formulación de la solución nutritiva se realizó al adquirir la asesoría de una Ingeniera Agrónoma que trabaja con cultivos hidropónicos, la misma que se dividió en tres soluciones A, B, C y adicional la solución diácida que su función es regular el Ph de la solución nutritiva.

Solución A:

Agua	18 litros
Nitrato de potasio	2370 gramos
Fosfato monopotásico	525 gramos

Solución B:

Agua	10 litros
Sulfato de potasio	94 gramos
Sulfato de magnesio	954 gramos
Quelato de hierro	60 gramos
Boro	220 gramos
Microbull	106 gramos

Solución C:

Agua	10 litros
Nitrato de calcio	2140 gramos

Solución Diacida (reguladora de Ph):

Agua	4620 mililitros
Ácido nítrico	1380 mililitros

2.1.2.1. Ciclo de riego de la planta de lechuga

Basados en la locación geográfica donde está ubicado el sistema y tomando en consideración una altura de 2215 m s. n. m., la humedad relativa promedio de 77.5 % y su temperatura promedio de 18°C, se determinó que el ciclo de recirculación de la solución nutritiva será por histeresis, en clima fresco ($\leq 21^\circ\text{C}$) se riega cada hora durante 10 min y si las temperaturas aumentan ($\geq 23^\circ\text{C}$) cambia el ciclo a 10 min cada 30 min.

2.2. Diseño de la estructura

El diseño conceptual en el que se basa para la construcción e implementación de este trabajo es un sistema de cultivo hidropónico horizontal, el cual fue montado sobre una base metálica de 90cm de altura \times 67cm \times 86,5cm que sirve de soporte para la electrónica y el sistema de tuberías. Se toma en cuenta la simplicidad tanto para el montaje como el desarme del sistema, ubicando adecuadamente los actuadores y sensores, la Figura 2.1 permite observar el modelo preliminar realizado en un software de modelado 3D.

Para este sistema se utiliza un invernadero con cubierta de plástico transparente. Además se instala una cobertura interna en el techo de sarán que nos ayuda a controlar la temperatura. En el sistema instalado, se utiliza una cama con 3 tubos de PVC blanco, de 4" de diámetro y 1m de largo, con 5 aperturas por cada uno, en los que se colocaron canastillas de soporte para las plantas. Adicionalmente, el sistema cuenta con un reservorio plástico en el que se almacenan 60 litros de solución nutritiva, un mecanismo de recirculación y bombeo automatizado que consiste en una bomba sumergible para el control de los ciclos de riego de las plantas, el mismo que se activa y desactiva con los parámetros establecidos en el programa dentro del micro-controlador.

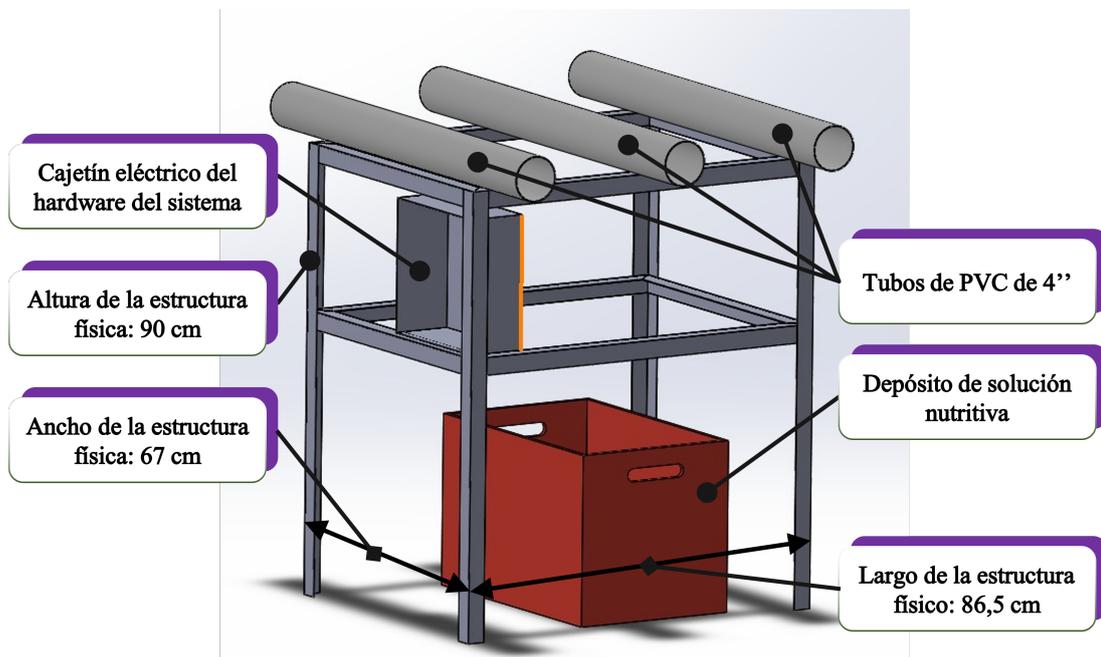


Figura 2.1: Esquema de estructura física del sistema de cultivo hidropónico.

Las canastillas para sistemas hidropónicos suelen ser adquiridas con proveedores locales; sin embargo, también se puede utilizar vasos plásticos desechables, a los cuales se les realiza orificios, como se puede observar en la Figura 2.2.



Figura 2.2: Vasos plásticos usados como canastillas.

2.3. Diseño de hardware

Para el diseño del hardware se basa en los parámetros que intervienen en el correcto funcionamiento de un sistema de cultivos hidropónico. Para ellos debe cumplir con ciertos parámetros, entre ellos:

- El sistema debe ser capaz de tomar medidas y ejecutar acciones sobre el cultivo hidropónico.
- Al ser un sistema automático, debe requerir la menor intervención posible del usuario, siendo el operador solamente un supervisor.
- Sistema adaptivo, con la capacidad de modificar su comportamiento con cada situación.
- Funcionalidad de control manual, permitiendo al usuario tomar decisiones sobre el sistema.
- Disponer de un sistema de seguridad que garantice la integridad del sistema.
- Disponer de registros históricos que puedan ser utilizados para observar la evolución del sistema.
- Al no poseer una interfaz HMI, debe poseer indicadores visuales que permitan conocer el estado del sistema.

A partir de los mismos se realiza la selección de los componentes que mejor se adapten a estos requerimientos. Dentro de esta selección se encuentran: sensores, actuadores, microcontroladores, fuente de alimentación, entre otros.

2.3.1. Parámetros de supervisión

Los sensores están asociados a un parámetro para el monitoreo en el sistema, entre ellos tenemos:

- Ph de la solución nutritiva.
- Conductividad eléctrica de la solución nutritiva.
- Temperatura ambiente del invernadero.
- Temperatura de la solución nutritiva.
- Caudal suministrado por el dosificador de Ph.
- Nivel de la solución nutritiva.

Los actuadores están asociados a los parámetros que se deben controlar:

- Bomba hidráulica dosificadora de Ph.
- Bomba hidráulica de recirculación de la solución nutritiva.

2.3.2. Selección de sensores

2.3.2.1. Sensor de temperatura

Estos sensores tienen la capacidad de detectar los cambios de temperatura en el entorno donde se los esté empleando y transformarlo en señales eléctricas que podrán mostrarse de forma digital al enviarlas a un dispositivo o computadora donde se podrán visualizar, almacenar o trabajar con ellas. [16]

Cuadro 2.1: Criterios ponderados para sensor de temperatura.

	LM35	DS18B20
Resistencia al agua	0	10
Alimentación 5V	10	10
Resistente al medio ambiente	0	10
Digital (10) / Analógico (5)	5	10
Disponibilidad	10	10
	25	50

10 = cumple
5 = cumple regularmente
0 = no cumple

Seleccionamos el sensor de temperatura DS18B20 debido a que es el que mejor se adecua a los requerimientos del sistema tanto para conocer la temperatura del ambiente cómo la temperatura de la solución nutritiva.



Figura 2.3: Sensor de temperatura DS18B20. [23]

Características:

- Rango de Alimentación: 3.0V a 5.5V
- Temperatura de operación: -55°C a 125°C
- Presición: $\pm 0.5^\circ\text{C}$

- Resistencia al agua: Si
- Encapsulado: Acero inoxidable

2.3.2.2. Sensor de Ph

Este sensor permite conocer el nivel de acidez de una sustancia para luego poder determinar la calidad de la misma (ácida o básica). La medición del electrodo nos entrega valores entre 0 y 14. [17]

Cuadro 2.2: Criterios ponderados para sensor de Ph.

	Gravity: Analog Ph sensor	Sensor Ph 4502C
Resistencia al agua	10	10
Alimentación 5V	10	10
Digital (10) / Analógico (5)	5	5
Disponibilidad	0	10
	25	35

10 = cumple
 5 = cumple regularmente
 0 = no cumple

Se seleccionó el sensor de Ph 4502C que se adecua mejor a los requerimientos del sistema.



Figura 2.4: Sensor de Ph 4502C. [24]

Características:

- Rango de Alimentación: 5V
- Corriente: 10mA
- Rango de detección: 0 - 14 (ácido / base)
- Temperatura de operación: 10°C a 50°C
- Presición: $\pm 0.1^\circ\text{C}$
- Resistencia al agua: Si

La medición de pH es realizada por la sonda y el módulo acondicionador de señal que transmite un voltaje proporcional a la medición realizada, la misma que es leída a través del puerto de lectura analógico integrado en el microcontrolador Atmega328p. Necesitaremos coconvertir la lectura analógica a un valor de voltaje mediante la ecuación 2.1, para luego con la ecuación 2.2 convertirla a valores de pH, esta misma será la ecuación de calibración del sensor. [22]

$$V = L(0 - 1023) \cdot \frac{5V}{1023}, \text{ donde } V \text{ corresponde al voltaje y } L \text{ a la lectura analógica} \quad (2.1)$$

En la siguiente ecuación podemos interpretar a m como la ganancia y a b como un offset.

$$pH = m \cdot V - b \quad (2.2)$$

2.3.2.3. Sensor de conductividad

En soluciones acuosas esta directamente relacionada con la cantidad de sales disueltas, las cuales consiguen transportar energía eléctrica. Por ende, la conductividad será la medida de concentración de iones y la actividad de una solución. [18]

Cuadro 2.3: Criterios ponderados para sensor de Conductividad.

	Sonda de conductividad TDS	DFR0300
Resistencia al agua	10	10
Alimentación 5V	10	10
Digital (10) / Analógico (5)	5	5
Disponibilidad	10	0
	35	25

10 = cumple
 5 = cumple regularmente
 0 = no cumple

Se selecciona el sensor de conductividad TDS que se adecua mejor a los requerimientos del sistema.

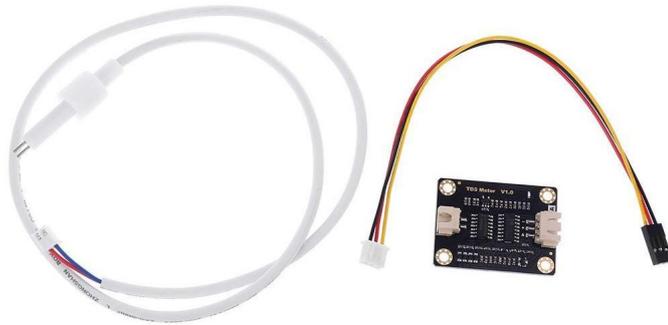


Figura 2.5: Sensor de conductividad TDS. [25]

Características:

- Rango de Alimentación: 3.3 a 5.5V
- Voltaje de salida: 0 a 2.3V
- Corriente: 3 a 6mA
- Rango de medición TDS: 0 a 1000ppm
- Rango de detección: 0 - 14 (ácido / base)
- Temperatura de operación: 10°C a 50°C
- Presición: ± 0.1
- Resistencia al agua: Si

La adquisición de los datos es realizada por medio de la sonda y su respectivo acondicionador el cuál genera un voltaje al realizar las mediciones y se emplea la ecuación 2.1 para luego con la ecuación 2.3 convertirla en valores de conductividad.

$k = C \cdot V_{out}$, donde k corresponde a la conductividad y C es la constante de la sonda de conductividad (2.3)

2.3.2.4. Sensor de nivel

Los medidores de nivel en líquidos trabajan midiendo la altura de un líquido, puede ser sobre una línea de referencia, por presión hidroestática o el desplazamiento producido por un flotador de una sustancia contenida en un tanque. [19]

Cuadro 2.4: Criterios ponderados para sensor de nivel.

	HC-sr04	Sensor de boya
Rango completo	10	0
Resistencia al agua	10	10
Alimentación 5V	10	10
Digital (10) / Analógico (5)	10	5
Disponibilidad	10	5
	50	30

10 = cumple
5 = cumple regularmente
0 = no cumple

Se selecciona el sensor de nivel por ultrasonido HC-SR04 que se adecua mejor a los requerimientos del sistema para obtener óptimas mediciones en el tanque de la solución nutritiva.



Figura 2.6: Sensor de nivel por ultrasonido HC-SR04. [26]

Características:

- Rango de Alimentación: 5V
- Corriente: 15mA
- Rango de medición: 2 a 450cm
- Ángulo de apertura: 15°
- Frecuencia de ultrasonido: 40KHz
- Tiempo de espera entre medidas: 50ms
- Presición: ± 3 mm

Su funcionamiento se basa en restar el nivel cuando el está tanque lleno y el nivel actual de la solución. Al estar el sensor a una altura mayo que el nivel máximo de la solución, se debe añadir un offset. Para facilitar la interpretación del usuario se utilizó la ecuación 2.4 para presentar el nivel de forma porcentual.

$$n = \frac{N}{h - O} \cdot 100, \text{ donde } n \text{ corresponde al nivel porcentual, } N \text{ al nivel en cm, } h \text{ a la altura y } O \text{ al offset} \quad (2.4)$$

2.3.2.5. Caudalímetro

Los sensores de caudal adquieren las velocidades del flujo de líquidos o aire.

Cuadro 2.5: Criterios ponderados para sensor de caudalímetro.

	YF-401	YF-B10
Resistente	5	10
Alimentación 5V	10	10
Digital (10) / Analógico (5)	10	10
Disponibilidad	10	0
	35	30

10 = cumple
5 = cumple regularmente
0 = no cumple

Se selecciona el sensor de caudal YF-401 que se adecua mejor a los requerimientos del sistema.



Figura 2.7: Sensor de caudal YF-401. [27]

Características:

- Rango de Alimentación: 5 a 18V
- Corriente: 10mA
- Presión max: 0.8MPa
- Caudal de trabajo: 0.3 a 0.6L

Este sensor envía una señal de onda cuadrada cada vez que se completa una revolución, esta onda es recibida por una interrupción en la tarjeta principal y es empleada como retroalimentación para conocer el caudal suministrado.

2.3.3. Selección de actuadores

Las magnitudes físicas pueden ser convertidas en otro tipo de magnitudes con propiedades que pueden interactuar con el entorno; al final, estas propiedades se perciben como un cambio de estado en el sistema. Las variables tomadas en cuenta suelen ser de fuerza, posición, velocidad y aceleración. Los dispositivos que llevan a cabo esta conversión de magnitudes se los conoce como actuadores.[21]

Para el sistema hidropónico necesitamos dos bombas hidráulicas, la primera será la encargada de recircular la solución nutritiva del depósito hacia las raíces de las plantas y la segunda se encargará de dosificar la cantidad necesaria de solución diácida para regular el Ph en el depósito.

2.3.3.1. Bomba hidráulica de recirculación de solución nutritiva

Cuadro 2.6: Criterios ponderados para selección de bomba hidráulica de solución.

	Aqua 30W	Bomba 12V DC
Caudal	10	5
Altura de trabajo	10	10
Tamaño de conexiones	10	5
Facilidad de control	10	10
Disponibilidad	10	5
	50	35

10 = cumple
5 = cumple regularmente
0 = no cumple

Seleccionamos la bomba Aqua 30W debido a que la mejor y se adecua a los requerimientos del sistema.



Figura 2.8: Bomba hidráulica Aqua 30W. [28]

Características:

- Potencia: 30 W
- Alimentación: 127 V
- Flujo max: 20.6 l/min
- Resistencia al agua: Si
- Altura max: 1.99 m
- Protección: IP68

2.3.3.2. Bomba hidráulica dosificadora de ácido

Cuadro 2.7: Criterios ponderados para bomba dosificadora de solución diácida.

	Bomba de diafragma R385	Bomba sumergible 5V
Caudal	10	5
Resistente al ácido	10	0
Elevación máxima	10	5
Facilidad de control	10	10
Disponibilidad	10	10
	50	30

10 = cumple

5 = cumple regularmente
0 = no cumple

Seleccionamos la bomba de diafragma R385 debido a que es la que mejor se adecua a los requerimientos del sistema.



Figura 2.9: Bomba hidráulica de diafragma R385. [29]

Características:

- Material: ABS, silicona y metal
- Alimentación: 6-12 V
- Corriente: 1 A
- Potencia: 6 W/h
- Caudal: 2.1 L/min

2.3.3.3. Selección de controlador para tarjeta principal

Es el encargado de la adquisición de datos y de la activación de actuadores a partir de las ordenes que recibe de la unidad de control, trabaja en paralelo y su funcionamiento es independiente, esto quiere decir que, en caso de que ocurra un problema en la unidad de control, esta pueda seguir operando.

Cuadro 2.8: Criterios ponderados para la selección de controlador de la tarjeta principal.

	Arduino nano	Arduino mega
USB	10	10
Pines I/O	10	5
Frecuencia de trabajo	10	10
Procesador/uC	10	10
Arquitectura	5	5
Facilidad de integración en curcuito impreso:	10	0
Alimentación	10	10
Precio	10	5
Disponibilidad	10	10
	85	65

10 = cumple
 5 = cumple regularmente
 0 = no cumple

Después de realizarse una evaluación por criterios ponderados, se seleccionó la tarjeta arduino nano por adaptarse a los requerimientos del sistema.

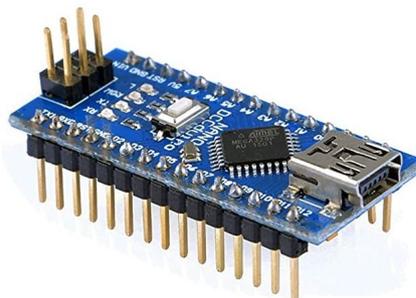


Figura 2.10: Tarjeta Arduino nano. [30]

Características:

- Microcontrolador: ATmega 328
- Arquitectura: AVR
- Voltaje de operación: 5V
- Memoria: 32 KB
- SRAM: 2 KB
- Velocidad del reloj: 16 MHz

- Pines analógicos: 8
- EEPROM: 1 KB
- Voltaje de entrada: 7-12 V
- Pines digitales I/O: 22
- Salidas PWM: 6
- Tamaño: 18 x 45 mm
- Peso: 7 g

2.3.3.4. Selección de unidad para tarjeta de control

Es la encargada de gestionar la comunicación IOT con la nube y realizar todas las funciones de Internet de las cosas. Realiza las funciones de control de riego calibración de sondas y configuración del sistema, la unidad de control obtiene los datos de la tarjeta principal a través de comandos que son enviados a esta y recibe en respuesta la información, también realiza la activación de actuadores por medio de estos comandos. Tiene la característica de ejecutar las funciones de IOT de forma paralela a las funciones principales del sistema permitiendo que se ejecuten correctamente incluso si hay problemas con la red de Internet, para esto es necesario que la unidad de control tenga diferentes hilos, por lo cual surge la necesidad de buscar un dispositivo que sea multinúcleo.

Cuadro 2.9: Criterios ponderados para la selección de la unidad de tarjeta de control.

	Raspberry pi 3 B+	Node MCU ESP8266	ESP32
USB	10	5	5
Pines I/O	10	10	10
Frecuencia de trabajo	10	5	5
Procesador/uC	10	5	5
Lenguaje de programación	10	5	5
Arquitectura	10	5	5
Soporte multihilo	10	0	5
Alimentación	10	10	10
Precio	5	10	10
Disponibilidad	10	10	10
	95	65	70

10 = cumple
5 = cumple regularmente
0 = no cumple

Después de realizarse una evaluación por criterios ponderados, se selecciona el dispositivo Raspberry Pi 3 B+ para utilizarse como unidad de tarjeta de control por adaptarse mejor a los requerimientos del sistema.

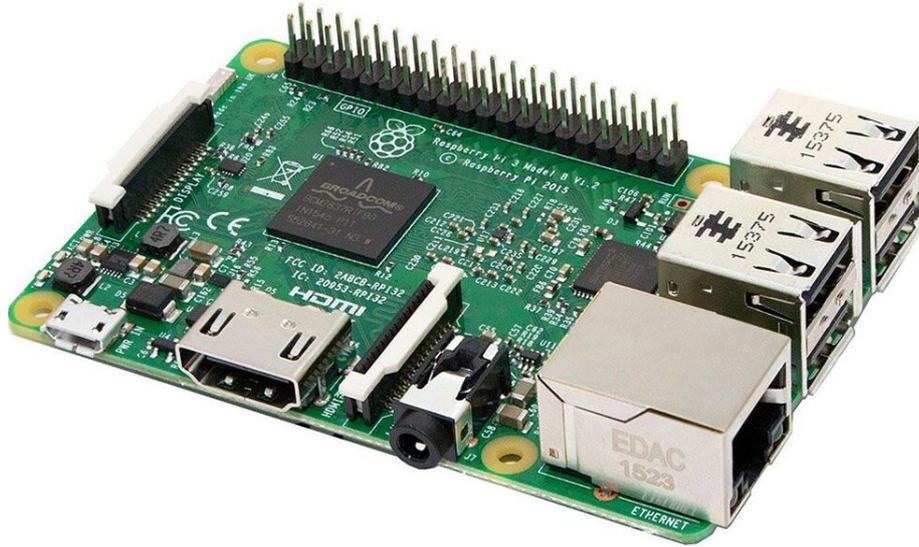


Figura 2.11: Tarjeta Raspberry Pi 3 B+. [31]

Características:

- Procesador: Broadcom BCM2837
- Conectividad inalámbrica: 2.4GHz/5GHz
- Voltaje de operación: 5V/2.5A DC
- Memoria: 1 GB LPDDR2 SDRAM
- Conectividad de red: Gigabit Ethernet over USB 2.0
- Velocidad del reloj: 1,4 GHz
- Pines GPIO: 40

2.3.4. Arquitectura del hardware

La arquitectura del hardware corresponde a toda parte electrónica del sistema de supervisión implementado sobre la estructura del cultivo hidropónico. De forma general, el hardware cumple con el propósito de realizar todas las acciones de monitoreo y control, comunicación IOT y ser capaz de informar al operador del estado del sistema. Para este proyecto se divide

el hardware en: subsistema de adquisición de datos y control de actuadores, unidad de control, fuente de alimentación y subsistema de visualización.

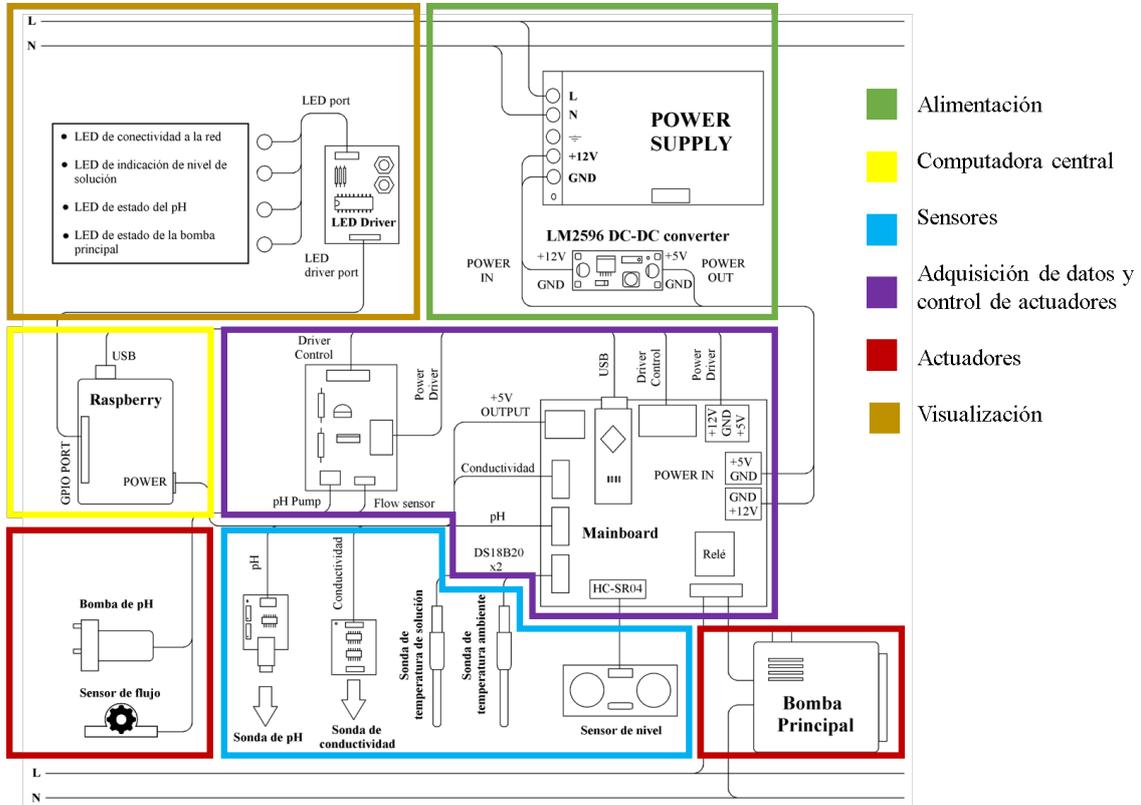


Figura 2.12: Diagrama de arquitectura de hardware.

2.3.4.1. Subsistema de adquisición de datos y control de actuadores

Este subsistema pertenece a la tarjeta principal donde su principal función es la de recolectar la información de los sensores y pre-procesarla para su uso por parte de la unidad de control. También controla la activación y desactivación de la bomba principal y regula la actividad de la bomba dosificadora de solución reguladora de pH en base a parámetros establecidos desde la unidad de control. Tiene como característica principal su funcionamiento autónomo e independiente de la unidad de control permitiéndole operar de forma continua incluso durante casos de fallos en la unidad de control. La tarjeta principal recibe ordenes de la unidad de control por medio de comandos enviados a través de USB. Estos comandos se pueden ver en la tabla 2.10

Cuadro 2.10: Comandos de comunicación para la tarjeta principal.

Descripción	Comando	Parámetro	Respuesta tarjeta principal	Confirmación de recepción
Obtiene los valores de los sensores de temperatura y de nivel	R	Ninguno	Temperatura solución, temperatura ambiente, nivel de solución	r
Obtiene los valores de los sensores de Ph y de conductividad	H	Ninguno	Ph de solución, conductividad de solución	h
Enciende la bomba de riego	P	O	Activación de relé de la bomba	po
Apaga la bomba de riego	P	F	Desactivación del relé de la bomba	pf
Activa la dosificación hasta alcanzar un valor de referencia	-	Valor de referencia (1 - 9999)	Activación de driver de la bomba de dosificación	c
Error de comunicación				E

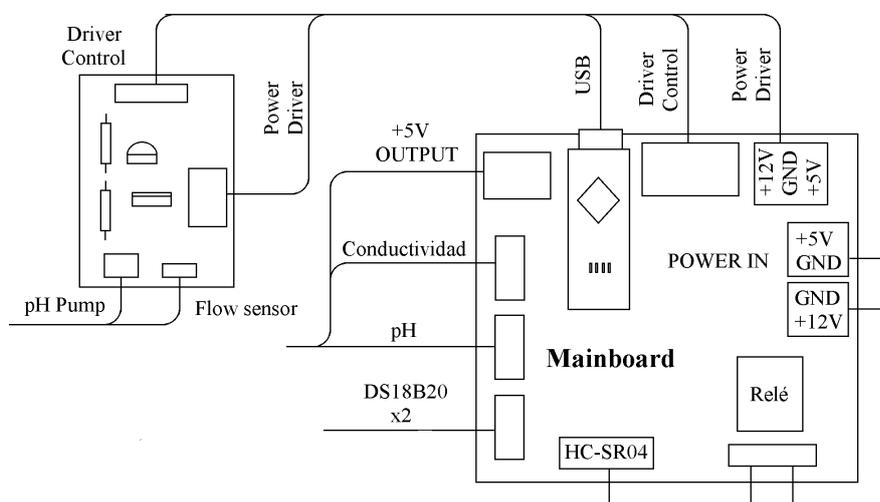


Figura 2.13: Esquema de la tarjeta principal.

2.3.4.2. Unidad de control

La unidad de control es la encargada de realizar las funciones de control de riego, calibración de sondas, configuración del sistema, control de la visualización de estados y gestión de la comunicación IOT. Su funcionamiento se basa en una computadora Raspberry PI 3 B+ conectada a una red inalámbrica WI-FI y con la tarjeta principal. La unidad de control inicia automáticamente cuando recibe voltaje de alimentación y cuenta con características de funcionamiento continuo sin conexión y reconexión automática a la red.

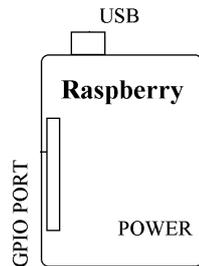


Figura 2.14: Unidad de control.

2.3.4.3. Alimentación

La alimentación del sistema de supervisión es provista por una fuente de 12V a 3A, empleada para alimentar a los circuitos de los actuadores. A su vez, cuenta con un regulador de tipo Buck para disminuir el voltaje a 5V necesarios para la operación de los circuitos lógicos. La distribución de los voltajes de operación se realiza en la tarjeta principal, la cual cuenta con borneras específicas para todos los módulos del sistema.

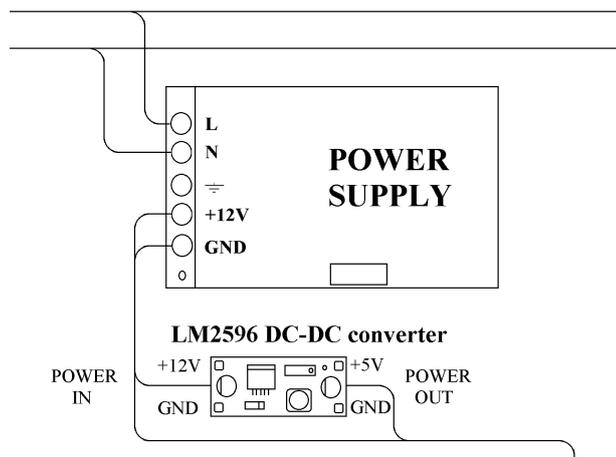


Figura 2.15: Sistema de Alimentación.

2.3.4.4. Visualización

La visualización es un método por el cual se informa al operador sobre el estado del sistema de manera local. Se realiza por medio de cuatro luces que se pueden observar en la Figura 3.9 asociadas a un parámetro específico, las cuales se encienden de acuerdo con una combinación de color y parpadeo específico según sea el caso. La tabla 2.11 muestra los parámetros a visualizar y sus respectivas combinaciones de colores y parpadeos.

Cuadro 2.11: Código de indicadores de luz.

	Formato de visualización	
Indicador de nivel	Nivel normal	Indicador color verde
	Nivel medio	Indicador color amarillo
	Nivel bajo	Indicador color rojo
	Nivel crítico	Indicador color rojo con parpadeo cada 500 ms
Indicador de pH	pH elevado	indicador color azul con parpadeo cada 1 s
	pH normal	Indicador color azul
	pH crítico	indicador color rojo con parpadeo cada 500 ms
Indicador de conexión de internet	Conectado	Indicador color verde
	Reconectado	Indicador color amarillo con parpadeo cada 250 ms
	Sin conexión	Indicador color rojo con parpadeo cada 500 ms
Indicador de bomba principal	Bomba encendida	Indicador color verde con parpadeo cada 1 s
	Bomba apagada	Indicador color rojo
	Bomba desactivada (fin de ciclo de riego)	Indicador color amarillo

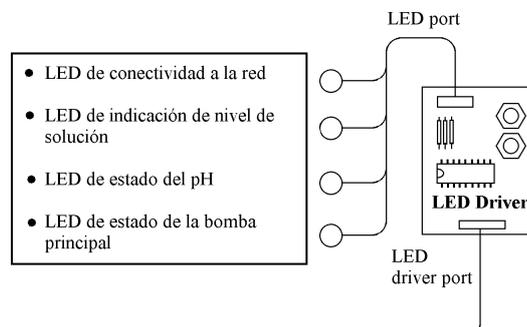


Figura 2.16: Sistema de Visualización.

2.4. Software

2.4.1. Software de la tarjeta principal

El software de la tarjeta principal es una máquina de estados finitos que emplea el tiempo de ejecución como mecanismo para determinar la ejecución de sus funciones. La descripción de cada estado es la siguiente:

- **Estado 0:** Función que inicializa las variables del programa y establece el estado inicial de sensores y actuadores.
- **Estado 1:** Actualización de tiempos de programa: Actualiza las variables de tiempo empleadas para la ejecución del programa.
- **Estado 2:** Respuesta serial: Se encarga de coordinar la comunicación serial empleada para la ejecución de órdenes y envío de datos desde y hacia la computadora principal.
- **Estado 3:** Lectura de sensores: Lee los datos de los sensores y se almacenan en la memoria del programa.
- **Estado 4:** Cálculo de la conductividad y pH: Función que calcula el valor real de la conductividad y del pH debido al tiempo de estabilización necesario para la correcta lectura de los valores de las sondas.

El siguiente diagrama grafcet permite visualizar la estructura de la máquina:

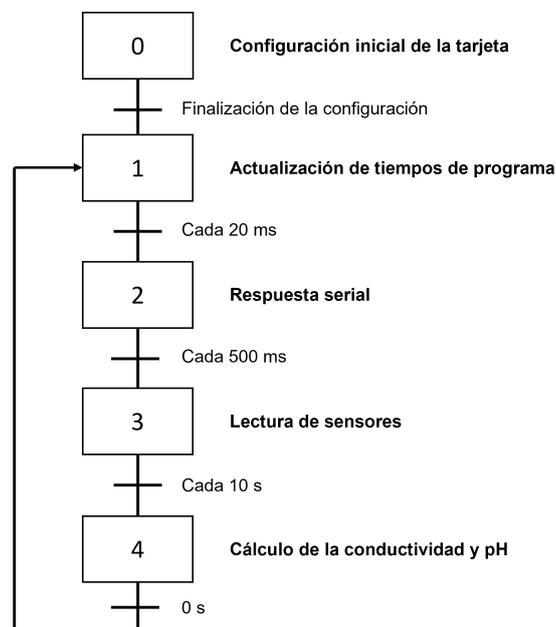


Figura 2.17: Diagrama grafcet de la tarjeta principal.

2.4.2. Software de control de visualización de alertas

Es un programa instalado sobre un microcontrolador PIC16F628A que se encarga de realizar la visualización de los estados del sistema por medio de 4 indicadores LEDs los cuales se iluminan y parpadean de acuerdo a la tabla 2.11. Este programa se comunica con la computadora principal por medio del hardware serial del microcontrolador, empleando para ello protocolo SPI y una lista de comandos que se describen a continuación:

Cuadro 2.12: Comandos soportados por el controlador LED. [22]

bit 0	bit 1	bit 2	bit 3	bit 4	bit 5	bit 6	bit 7	Comando
0	0	0	X	X	X	X	X	Clear
0	0	1	LS.1	LS.0	B	G	R	Set color
0	1	0	X	LM1.1	LM1.0	LM0.1	LM0.0	Mode 0-1
0	1	1	X	LM3.1	LM3.0	LM2.1	LM2.0	Mode 2-3

- **Comando clear:** Apaga todos los indicadores y desactiva el modo de parpadeo.
- **Comando Set color:** Establece un color de acuerdo a la codificación que se puede ver en la tabla 2.14. El indicador al cual se le asigna el color es seleccionado de acuerdo a la tabla 2.13.
- **Comando modo de parpadeo 0-1:** Establece la tiempo de parpadeo para los indicadores 0 y 1. El modo de parpadeo se selecciona mediante la tabla 2.15.
- **Comando modo de parpadeo 2-3:** Establece la tiempo de parpadeo para los indicadores 2 y 3. El modo de parpadeo se selecciona mediante la tabla 2.15.

Cuadro 2.13: Selección de LED para asignación de color. [22]

LS.1	LS.0	LED Seleccionado
0	0	LED 0
0	1	LED 1
1	0	LED 2
1	1	LED 3

Cuadro 2.14: Asignación de colores. [22]

B	G	R	Color
0	0	0	Blanco
0	0	1	Turquesa
0	1	0	Magenta
0	1	1	Azul
1	0	0	Amarillo
1	0	1	Verde
1	1	0	Rojo
1	1	1	Apagado

Cuadro 2.15: Modos de parpadeo. [22]

LED 3		LED 2		LED 1		LED 0		
LM3.1	LM3.0	LM2.1	LM2.0	LM1.1	LM1.0	LM0.1	LM0.0	Efecto
0	0	0	0	0	0	0	0	Sin efecto
0	1	0	1	0	1	0	1	Parpadeo cada 250 mS
1	0	1	0	1	0	1	0	Parpadeo cada 500 mS
1	1	1	1	1	1	1	1	Parpadeo cada 1000 mS

2.4.3. Software de la computadora principal

El programa de la computadora principal basa su funcionamiento en una máquina de estados finitos la cual cuenta con 13 funciones fundamentales encargadas del control de los ciclos de riego, la gestión de la comunicación IOT y el control de la tarjeta principal para la adquisición de datos y control de salidas. Las funciones pueden ser agrupadas de acuerdo con el tipo de transición que las desencadena, existiendo dos tipos: Transiciones basadas en tiempo y transiciones basadas en condiciones.

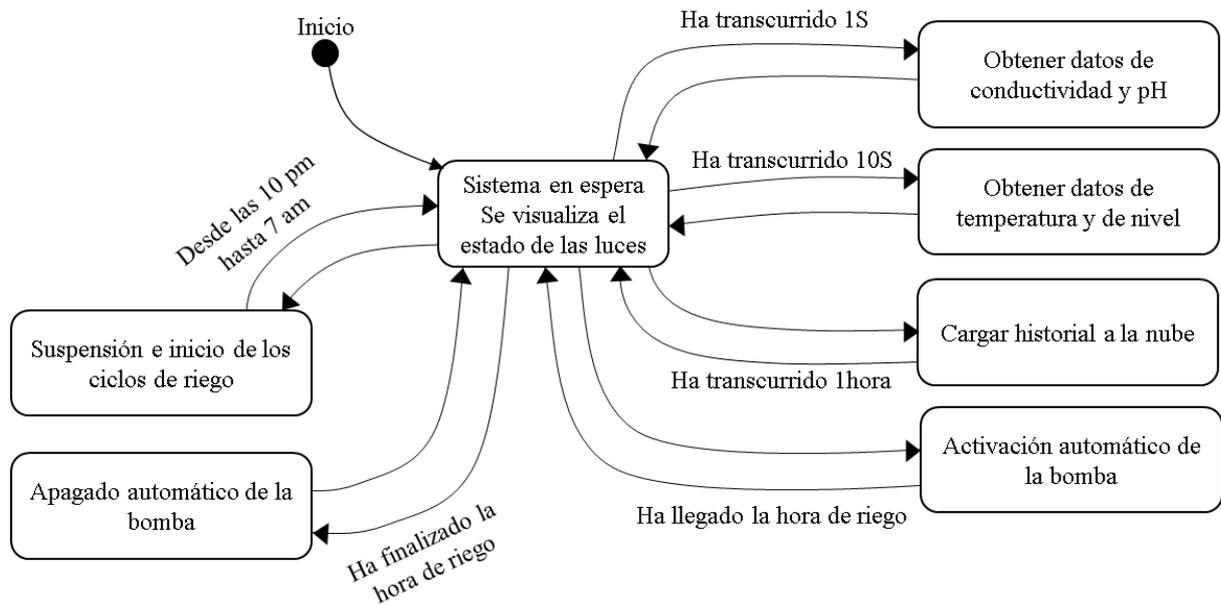


Figura 2.18: Máquina de estados de la computadora principal, sección controlada por tiempos.

Las funciones con transiciones basadas en tiempo emplean como estado inicial una función que calcula el tiempo de ejecución del programa. Por medio de esta información, determinan el momento correcto para ejecutarse.

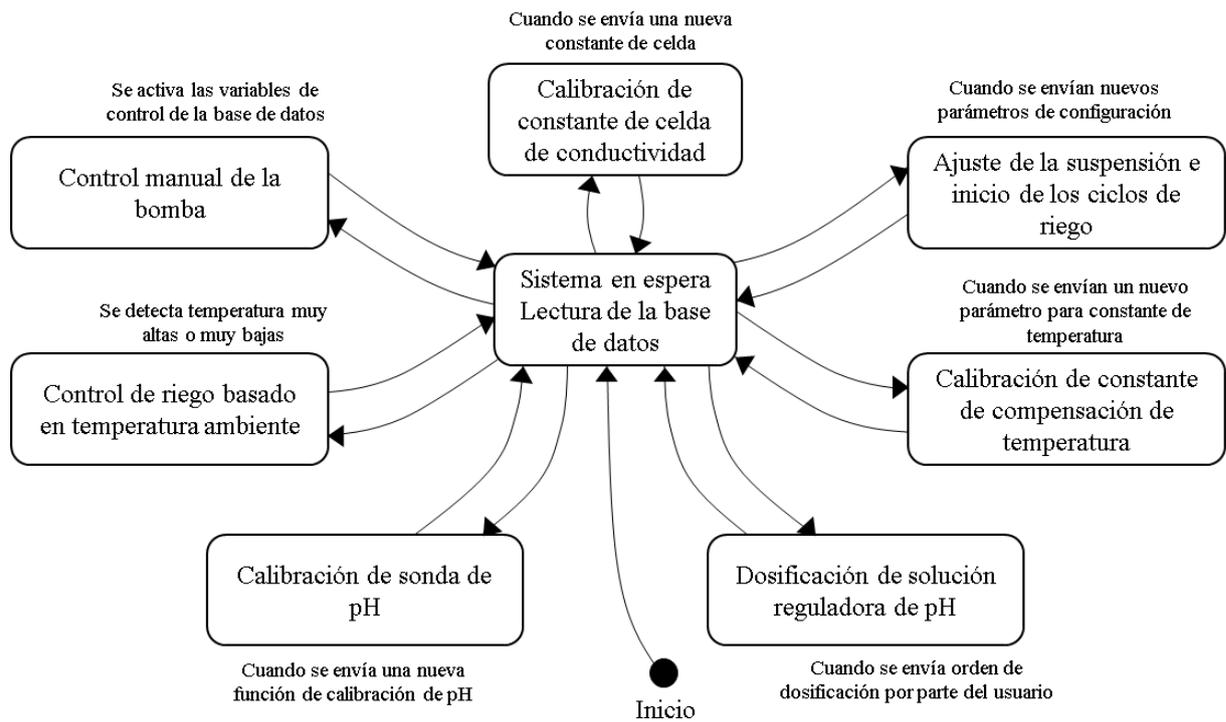


Figura 2.19: Máquina de estados de la computadora principal, sección controlada por condiciones.

Las funciones con transiciones basadas en condiciones emplean variables que sirven como desencadenadoras para su ejecución. La actualización de estas variables se realiza por medio de una función inicial que recibe información tanto de la nube como de los sensores.

2.4.4. Control del sistema de regulación de pH

El control de la bomba de dosificación de la solución diácida encargada de regular el pH del sistema de cultivo se realizará en lazo cerrado con el caudalímetro YF-S402 previamente seleccionado. El diseño del controlador se generó realizando pruebas experimentales para obtener la relación entre un giro completo del rotor y el caudal desplazado obteniendo así una ecuación de correlación lineal y se integró en el programa de la computadora principal. Para realizar esta regulación, primero la computadora principal se encarga de convertir a pulsos el caudal de la solución a suministrar para que la tarjeta principal proceda a encender la bomba hasta alcanzar el conteo de pulsos calculado.

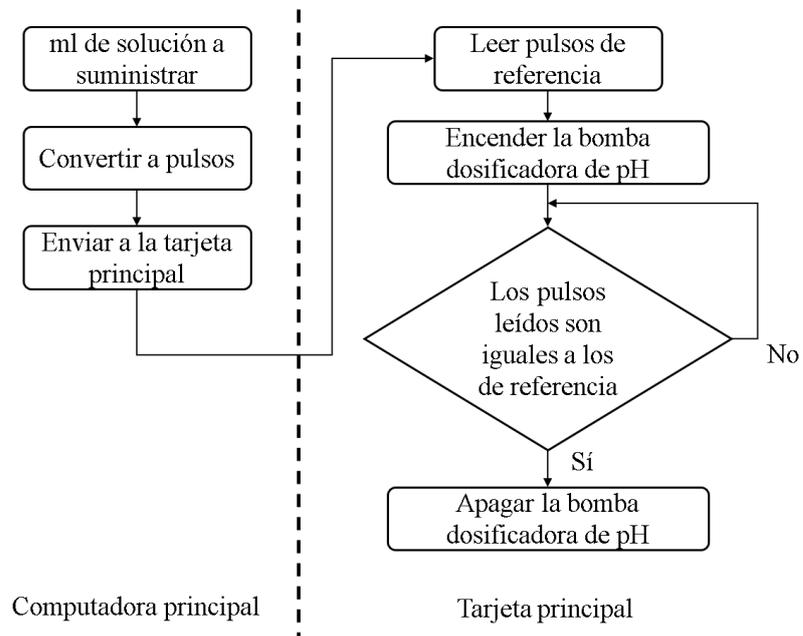


Figura 2.20: Control de la bomba dosificadora de pH. [22]

Capítulo 3

Implementación y Resultados

3.1. Construcción del cultivo hidropónico NFT

La implementación del proyecto del cultivo hidropónico se llevó a cabo en dos partes. La primera corresponde a la construcción de un invernadero con el propósito de mantener las condiciones ambientales adecuadas para el crecimiento de las plantas y la segunda se refiere a la construcción del sistema de cultivo como tal.

3.1.1. Contrucción del invernadero

Para la construcción del invernadero se hizo uso de un diseño plano, sus dimensiones son de $2,10m \times 2,1m \times 2,1m$, cuya estructura se realizó en madera y cubierta con plástico. Para evitar la fuerte incidencia de la luz solar en las plantas, se recubrió el techo con sarán de opacidad al 60%.



Figura 3.1: Fotografía del invernadero.

3.1.2. Construcción de la estructura física

Para la estructura física se hizo uso del diseño mostrado en la Fig. 3.2. La estructura del sistema fue construida empleando perfil L ranurado ASTM-A36. Las uniones entre piezas forman ángulos de 90, para garantizar la integridad y forma de la estructura se implementaron escuadras metálicas. Todas las piezas se unieron empleando pernos M8 × 1in y sus respectivas tuercas.



Figura 3.2: Estructura física del sistema de cultivo hidropónico.

El armario que contiene la electrónica del sistema se ubica en un lateral de la estructura física y se unió con pernos a los ángulos.



Figura 3.3: Armario que contiene la electrónica.

Los tubos que soportan a las plantas son de PVC de 4in y su longitud es de 3m de largo con 5 perforaciones de 5 cm separados una distancia de 20 cm. Los tubos se unieron a la estructura física empleando correas de amarre plasticas.



Figura 3.4: Tubos de PVC.

La bomba y el depósito se instaló debajo de toda la estructura física en caso de algún accidente no afecte a la electrónica y se conectaron al resto del sistema por medio de tuberías plásticas.



Figura 3.5: Depósito y bomba de solución nutritiva.

3.2. Implementación del hardware del cultivo hidropónico

3.2.1. Construcción de la tarjeta principal

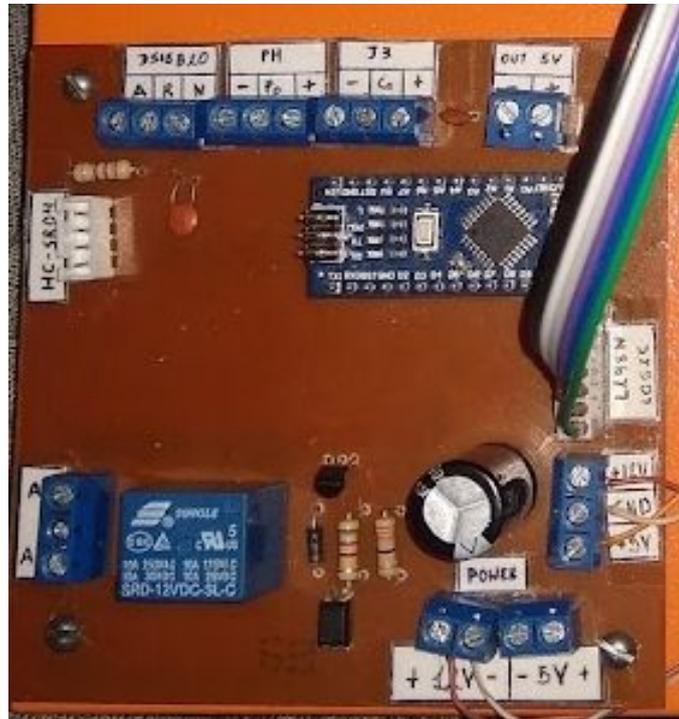


Figura 3.6: Tarjeta Principal.

La tarjeta principal fue diseñada en un software computacional y se construyó sobre una baquelita virgen de dimensiones 10 x 10cm a la que se le impregno el diseño de la placa y se colocaron los diferentes componentes electrónicos donde el principal componente es la tarjeta programable Arduino nano.

3.2.2. Construcción del driver de la bomba reguladora de pH

El driver del controlador de la bomba de pH se construyó sobre una baquelita de 5 x 7 cm. Está lleva un MOSFET que controla la activación y desactivación de la bomba. Para la alimentación y salida a la bomba se emplearon borneras y conectores para facilitar la conexión con la tarjeta principal y el sensor de flujo. Se realizaron 4 perforaciones en las esquinas del driver en los cuales se instalaron los tornillos de sujeción al tablero eléctrico.



Figura 3.7: Tarjeta encargada de controlar la bomba reguladora de pH.

3.2.3. Construcción de la tarjeta de visualización

La tarjeta de visualización se construyó sobre una baquelita de 5 x 10 cm con la técnica de transferencia térmica del diseño previamente elaborado en un software computacional. La tarjeta esta comandada por un microcontrolador PICF16F628A el cual controla los LEDs RGB con las instrucciones recibidas de la Raspberry pi. Los LED RGB se conectaron a través de un conector de 7 pines. La comunicación y alimentación del circuito se realiza por medio de un conector de 5 pines.

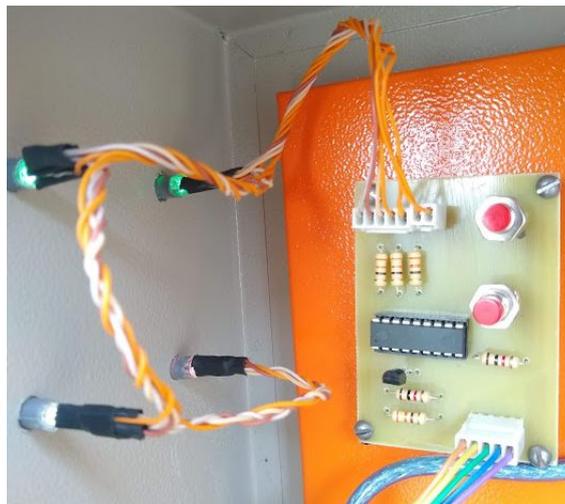


Figura 3.8: Tarjeta que controla los indicadores visuales LED RGB.



Figura 3.9: Sistema de visualización local por medio de luces.

3.2.4. Instalación y conexión de circuitos

Para la instalación de la tarjeta principal, la tarjeta de visualización, el driver de la bomba de pH y demás módulos, se emplearon tornillos de 3mm con separadores para evitar el contacto directo con el tablero electrónico de esta manera evitando cortocircuitos. La computadora se instaló en el tablero empleando cinta doble faz sobre la carcasa protectora.

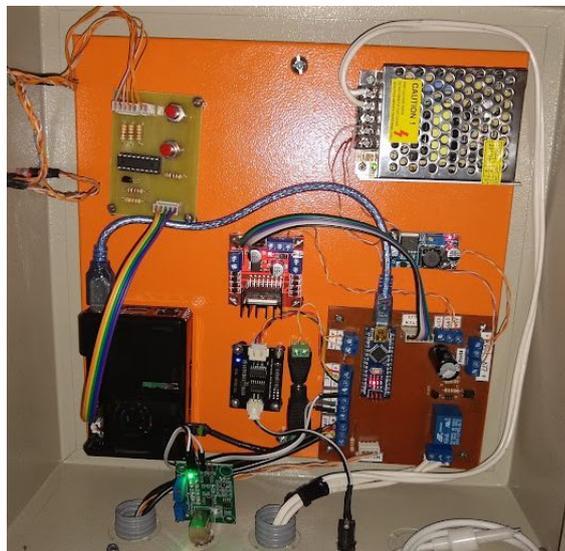


Figura 3.10: Tablero con la conexión de todos los componentes electrónicos del sistema.

3.3. Puesta en marcha del sistema de cultivo hidropónico

3.3.1. Preparación del sistema de cultivo hidropónico

Antes de montar el sistema, se debe realizar una limpieza para eliminar cualquier agente infeccioso que pueda interferir con el crecimiento normal de las plantas. La limpieza se debe realizar lavando los tubos y los canales con una mezcla de jabón de manos y agua, con la equivalencia de 5ml de jabón por galón de agua. Se debe realizar esta limpieza siempre al finalizar un ciclo de cultivo e iniciar uno nuevo.

3.3.2. Trasplante de las plantulas de lechuga

Las plántulas fueron adquiridas de un proveedor local las cuales, al momento de su compra, contaban con alrededor de 5 semanas de haber germinado. Previamente al trasplante al cultivo hidropónico, las plántulas son preparadas limpiando el soluto de sus raíces para evitar taponamientos en los conductos en el sistema. Posteriormente se las coloca en canastillas y son insertadas en los orificios de los tubos de PVC.



Figura 3.11: Trasplante de plantulas al sistema de cultivo hidropónico NFT.

3.3.3. Tanque de solución, mezcla de nutrientes y regulación de pH

La preparación de la solución nutritiva se realizó en el tanque de solución el cual se llenó con 40 litros de agua potable que se emplearon como base. En primer lugar, se ajustó los nutrientes de la solución. Para ello se dosificó las soluciones A, B y C en proporciones de 5,2,2 respectivamente. De forma inicial se suministraron 15ml de solución A, 6 ml de solución B y 6ml de solución C, respetando la proporción antes mencionada, y se realizó una medición de control para verificar el valor de la conductividad. El proceso de dosificación se repitió hasta alcanzar el valor de conductividad deseado de 1200uS. A continuación, se reguló el nivel de pH de la solución nutritiva empleando la solución di-ácida para reducir el nivel de pH. La regulación del primer ciclo de cultivo se realizó de forma manual, dosificando cantidades de 5ml de solución, seguida de una medición de pH. El proceso se repitió hasta alcanzar el valor deseado de 5.5 de pH. Posteriormente se realizó un segundo ciclo de cultivo que el proceso de regulación de pH se realizó de forma automática por el sistema.



Figura 3.12: Contenedores de las soluciones nutritivas A, B y C.

3.3.4. Configuración de los ciclos de riego

Se configuró normal del sistema se estableció empleando los parámetros previamente mencionados de 10 min de riego cada hora. La configuración de los límites del riego por temperatura se mantuvo en 23 grados para la temperatura máxima y 21 grados para la mínima. El ajuste de estos valores se realizó por medio de una aplicación de control diseñada por [22].



Figura 3.13: Captura aplicación de configuración de control de riego. [22]



Figura 3.14: Captura aplicación de configuración de riego por temperatura. [22]

3.3.5. Ciclo diario de riego

La hora de inicio de los ciclos de riego para este proyecto se estableció a las 7h00, momento en el cual el sistema pone en marcha todos los controles de riego configurados. Los ciclos de riego finalizan una vez alcanzada las 22h00, deshabilitándose el sistema de riego durante el resto del tiempo. El estado de riego no activo puede ser visualizado por medio del indicador correspondiente a la bomba principal y por medio de la aplicación de control.



Figura 3.15: Captura aplicación de configuración de ciclo de riego diario. [22]

3.3.6. Calibración de la sonda de pH

Para la obtención de lecturas correctas y precisas de la sonda de pH, es necesario calibrar una función de conversión de voltaje propia de esta sonda. Para ello se hace uso de tres soluciones de referencia de valores:

- 4 pH
- 8,86 pH
- 9,18 pH

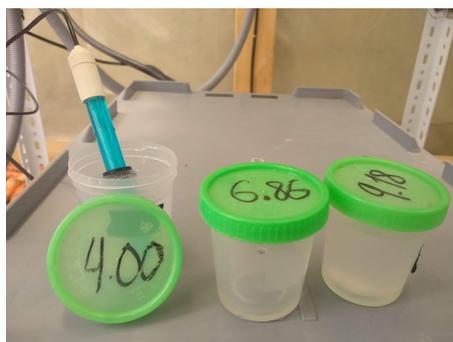


Figura 3.16: Soluciones de calibración de sensor de pH.

Con las mediciones obtenidas de estas soluciones de referencia, se trazó una gráfica lineal de la cual se obtuvo la función de calibración.

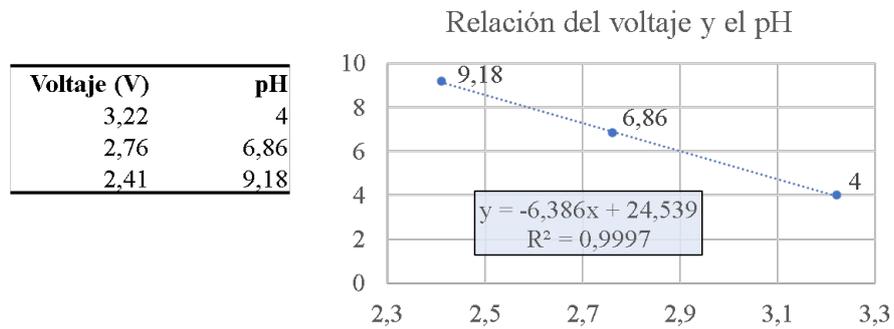


Figura 3.17: Regresión lineal de los valores de voltaje y pH de referencia. [22]

3.3.7. Calibración de la sonda de conductividad

La calibración de la sonda de conductividad se realiza en su mayor parte por el propio software de la computadora principal y se divide en dos partes. La primera parte corresponde a la calibración de la constante de celda de la sonda de conductividad, un parámetro que relaciona la conductividad de la solución con el voltaje medido. Para ello se usa una solución de calibración 1413 uS a 25°C.



Figura 3.18: Calibración conductividad. [22]

Una vez calibrada la constante de celda, se debe ajustar la constante de compensación de temperatura. Para ello se tuvo que ajustar el valor de la conductividad de la solución nutritiva a una temperatura de referencia de 25°C. Posteriormente se ajusta la constante de compensación de temperatura a través de la aplicación de control. Para ello se tuvo que asegurar que la temperatura actual difiera de la de referencia, esto debido a que el algoritmo de calculo necesita una diferencia de temperatura para trabajar.

Cuadro 3.1: Tabla del fabricante para calibración por compensación de temperatura.

Temperatura (°C))	Temperatura (°F)	(uS)
5	41.0	896
10	50.0	1020
15	59.0	1147
16	60.8	1173
17	62.6	1199
18	64.4	1225
19	66.2	1251
20	68.0	1278
21	69.8	1305
22	71.6	1332
23	73.4	1359
24	75.2	1386
25	77.0	1413
26	78.8	1440
27	80.6	1467
28	82.4	1494
29	84.2	1521
30	86.0	1548
31	87.1	1575

3.4. Resultados

3.4.1. Evolución de las plantulas de lechuga durante el ciclo de producción

El ciclo de producción considerado en este proyecto toma en cuenta solo el tiempo que las plántulas permanecieron en el cultivo hidropónico. Las plántulas de lechuga experimentaron un crecimiento acelerado el cual se pudo percibir incluso de un día para otro. Se realizaron dos ciclos de cultivos. El primero cultivo correspondió a una etapa de control manual de nutrientes y de pH que tuvo el propósito de establecer una metodología de trabajo adecuada para la aplicación de un control automático el cual fue aplicado para el segundo cultivo. Sin embargo, solo se

automatizo la regulación del valor de pH de la solución, por lo que aun fue necesario controlar los nutrientes de forma manual.

Ciclo de cultivo 1: cultivo manual

- **Semana 1 y 2:** En las primeras dos semanas las plántulas, las raíces incrementaron su tamaño y se desarrollaron las primeras hojas.
- **Semana 3:** A partir de la tercera semana, el aumento en tamaño de las hojas fue considerable, llegando a chocarse entre ellas por falta de espacio.
- **Semana 4:** A final de la cuarta semana, se consideró que las plantas de lechuga habían alcanzado el tamaño adecuado para la cosecha.

Ciclo de cultivo 2: Cultivo con implementación de control de pH El control de pH de la solución nutritiva se basó en la medición de este valor en la solución y la corrección por medio de la dosificación de solución di-ácida. Para ello el usuario cuenta con un botón con el cual pone en marcha este mecanismo. La ventaja que presenta este método de control es que el usuario ya no necesita medir y calcular la cantidad de solución reguladora de pH, si no, que se realiza por si mismo.



(a) Semana 1.



(b) Semana 2.



(c) Semana 3.



(d) Semana 4.

Figura 3.19: Evolución de las plantas de lechuga por semanas.

3.4.2. Consumo de la solución nutritiva durante el ciclo de producción

- **Primera semana:** Muy bajo consumo debido a que las plántulas estaba aun en fase de germinación.
- **Segunda semana:** A mitad de la segunda semana el consumo de solución nutritiva empezó a incrementarse de forma constante.
- **Tercera semana:** Existió un incremento en la pendiente de consumo de solución, disminuyendo el nivel mucho más rápido que antes
- **Cuarta semana:** El consumo de solución incremento considerablemente. El nivel disminuyo en picada.



Figura 3.20: Gráfico de nivel de consumo en el ciclo de cultivo manual.

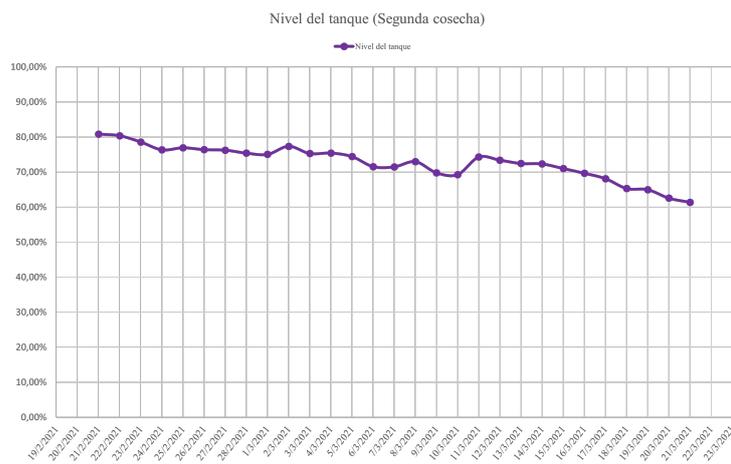


Figura 3.21: Gráfico de nivel de consumo en el ciclo de cultivo con control de pH.

En el segundo ciclo de cultivo se obtuvo un menor consumo de solución nutritiva. Durante las primeras 2 semanas se puede apreciar que el consumo permaneció casi constante rondando los valores de 70% y 80%. A partir de la tercera semana se incrementó el consumo de solución nutritiva y a su vez también aumentó la velocidad de crecimiento de las plantas.

3.4.3. Tamaño de raíces y hojas al finalizar los ciclos de cultivo

En las tablas 3.2 y 3.3 se pueden apreciar los resultados que se obtuvieron al finalizar los ciclos de cultivo hidropónico tanto manual como el que lleva implementado el control de pH.

Cuadro 3.2: Resultados Cosecha 1 manual.

# Planta	Largo Hoja (cm) max - min (cm)	Largo Raíz (cm) (cm)	Peso (g) (g)
1	22 - 14	20	120
2	22 - 15	18	120
3	27 - 17	26	320
4	23 - 14	19	210
5	27 - 16	22	280
6	26 - 17	22	370
7	24 - 16	21	150
8	29 - 19	28	250
9	26 - 17	26	250
10	28 - 12	30	270
11	28 - 13	20	310
12	22 - 16	17	160
13	27 - 18	22	310
14	30 - 17	24	180
15	26 - 20	19	190
Promedio	25.8 - 16.1	22.27	212.67

Cuadro 3.3: Resultados Cosecha 2 con control de pH.

# Planta	Largo Hoja (cm) max - min (cm)	Largo Raíz (cm) (cm)	Peso (g) (g)
1	35 - 19	21	310
2	28 - 15	20	230
3	27 - 17	26	250
4	29 - 16	22	250
5	27 - 17	22	320
6	31 - 20	21	310
7	29 - 16	20	320
8	32 - 21	25	320
9	34 - 18	26	270
10	28 - 17	25	290
11	28 - 16	26	350
12	31 - 19	19	200
13	27 - 18	22	220
14	30 - 20	26	370
15	33 - 22	15	360
Promedio	29.9 - 18.7	23.07	291.33

Capítulo 4

Conclusiones y trabajo futuro

4.1. Conclusiones

Se consiguió reproducir satisfactoriamente un prototipo de sistema de cultivo hidropónico NFT, construido netamente con hardware libre y materiales que pueden ser fácilmente encontrados en el mercado local. También cuenta con programación de software libre, esta característica ofrece una ventaja para que se continúe trabajando y mejorando este prototipo en futuros proyectos.

Se determinó cuáles son las variables y los elementos que determinan el óptimo funcionamiento de un sistema de cultivo hidropónico, gracias a esto se pudo determinar el hardware necesario para el desarrollo del proyecto por medio del análisis de las características de diferentes sensores, actuadores y sistemas de control que se pueden encontrar a nivel nacional, seleccionando los que mejores de acuerdo con los criterios mencionados en el capítulo 2.

Como principales ventajas encontradas en el proyecto, se puede mencionar la facilidad de adquisición de los diferentes componentes que conforman el sistema de cultivo hidropónico, permitiendo su reproducción sin un alto nivel de dificultad y el acceso a repuestos necesarios en casos de mantenimiento. Su fácil uso permite que personas con un conocimiento mínimo y el espacio necesario, puedan operar el sistema y aprovechar los beneficios que ofrece el cultivo en hogares.

El crecimiento de las plantas con la implementación del control de pH fue significativamente mayor comparado al caso donde no existió ningún tipo de automatización, llegando incluso a incrementos de hasta 5 de centímetros en el tamaño de las hojas y 80 gramos más de peso en sus valores promedios, datos que se pueden observar en la figura 4.1 y 4.2, siendo estas dimensiones suficientes para entrar en el rango de las lechugas comerciales. Por otro lado, la función de riego por temperatura se encargó de ajustar los intervalos de riego de acuerdo con la temperatura ambiente, a lo cual se le puede atribuir parte de los resultados finales obtenidos. Esto se debe a que el riego por temperatura brinda una dinámica de riego mucho más adaptable

a las circunstancias de crecimiento de las plantas.

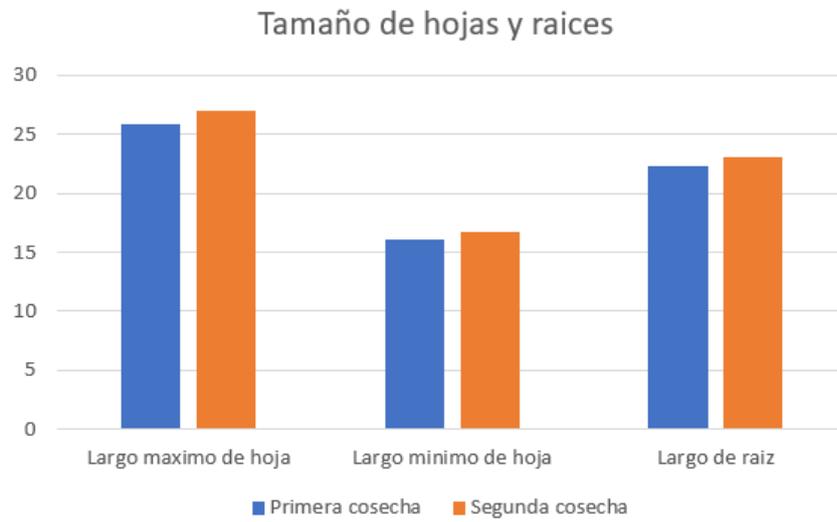


Figura 4.1: Comparación del promedio de largo de hoja máximo y mínimo y largo de raíz.

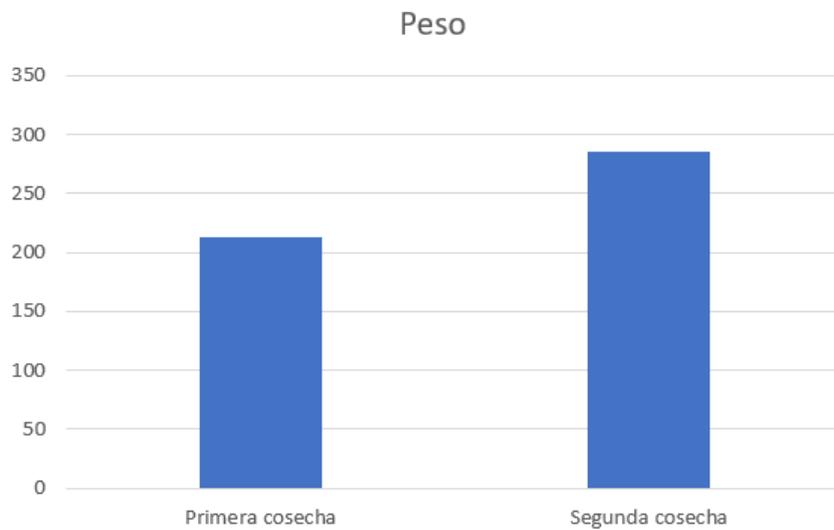


Figura 4.2: Comparación del promedio de peso de las lechugas.

4.2. Trabajo futuro

Este prototipo tiene la facilidad de implementar nuevas funcionalidades y mejoras, por lo tanto como trabajo futuro se presentan las siguientes propuestas:

- Implementar un agitador con el propósito de automatizar la tarea de mezcla de nutrientes y solución diácida en el sistema, evitando que este sea dependiente de un usuario humano para realizar esta actividad.
- Implementar un mecanismo de dosificación de nutrientes paralelo y compatible con el dosificador de pH. Esto debido a problemas que se presentaron en la medición simultánea de conductividad y pH, impidiendo la instalación de un sistema de control automático para nutrientes.
- Como posible mejora, se puede implementar métodos de automatización en el invernadero que permitan mejorar la calidad ambiental para el crecimiento del cultivo. Se propone la apertura automática de ventanas para el ingreso de aire fresco en casos de temperaturas elevadas.
- Se puede mejorar el diseño del cultivo hidropónico para la implementación de una mayor cantidad de plantas, puesto que el sistema lo permite. Los posibles cambios que se proponen son: incrementar el largo de los tubos de PVC para aumentar la cantidad de plantas a cultivar y utilizar un método de cultivo hidropónico vertical que permita aprovechar mejor el espacio disponible.
- Probar el sistema con un tipo diferente de cultivo, utilizando para ello los nutrientes y parámetros de mezcla de nutrientes adecuados.

Anexos

Materiales

Cuadro 4.1: Materiales utilizados para la construcción de la electrónica del sistema.

Cantidad	Descripción
1	Arduino nano
1	Raspberry Pi 3 B+
1	Fuente de alimentación 12V, 3A
1	Regulador de voltaje LM2596
1	Sonda de pH + acondicionador
1	Sonda de conductividad + acondicionador
8	Cable gemelo #14
1	PIC16F628A
-	Resistencias
-	Condensadores
1	Baquelita virgen 5×7cm
6	Bornera 3 pines
5	Bornera 2 pines
1	Transistor 3904
1	Transistor 3906
1	Transistor IRFZ44N
2	Sensores digitales de temperatura TS18B20
4	LED RGB
1	Integrado PC1817
1	Sensor de caudal YF-401
1	Bomba de diafragma R385
1	Bomba hidraulica Aqua 30W
1	Sensor ultrasónico HC-SR04

Cuadro 4.2: Materiales utilizados para la construcción de la estructura del sistema.

Cantidad	Descripción
4	Perfil L ranurado (3 metros)
4	Patas de caucho
16	Escuadras
2	Tornillo M8 con anillo y tuerca (libra)
1	Depósito plástico 40 litros
1	Canastilla 3/4"
1	Unión reductora hembra 3/4"×1/2"
2	Adaptador dentado 16mm×1/2"macho
5	Manguera PE ciega 14-bar (metro)
2	Conector dentado reductor 16mm×12mm
6	Conector inicial 12mm
6	Codo dentado 12mm
4	Codo dentado 16mm
4	T dentada 16×12×16mm
3	Válvula dentada 12×12
1	Tubo PVC (6metros)
6	Tapón hembra PVC
6	Amarres plásticos

Cuadro 4.3: Materiales utilizados para la construcción del invernadero.

Cantidad	Descripción
14	Tablas
1	Grapas (caja)
7	Plástico invernadero (metros)
6	Saran negro 65 % (metros)
2	Tornillos madera 1in (libra)

4.3. Fotografías



Figura 4.3: Corte a medida deseada del perfil L ranurado.



Figura 4.4: Construcción del invernadero.

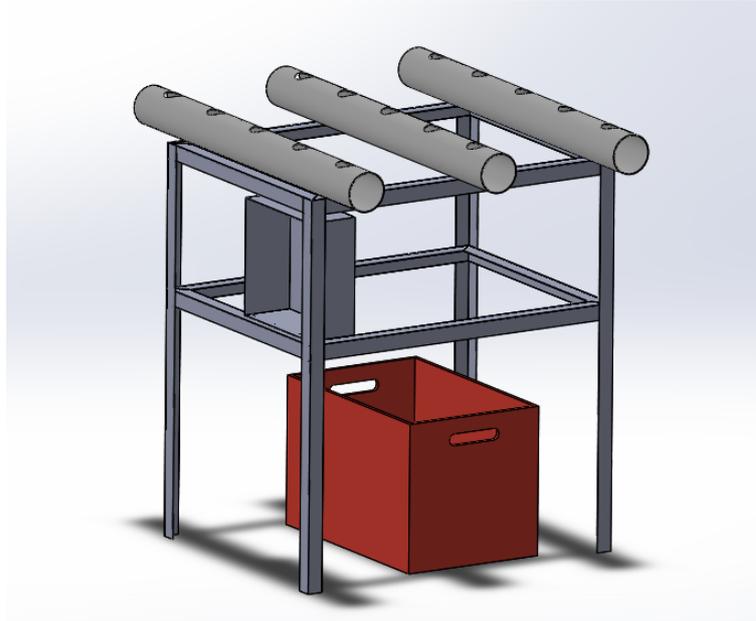


Figura 4.5: Captura del modelo diseñado en software de modelado 3D.



Figura 4.6: Construcción del sistema de distribución de solución nutritiva.



Figura 4.7: Válvulas reguladoras del paso de solución nutritiva.



Figura 4.8: Lechuga cosechada.



Figura 4.9: Tablero de electrónica.



Figura 4.10: Toma de datos de lechugas cosechadas.

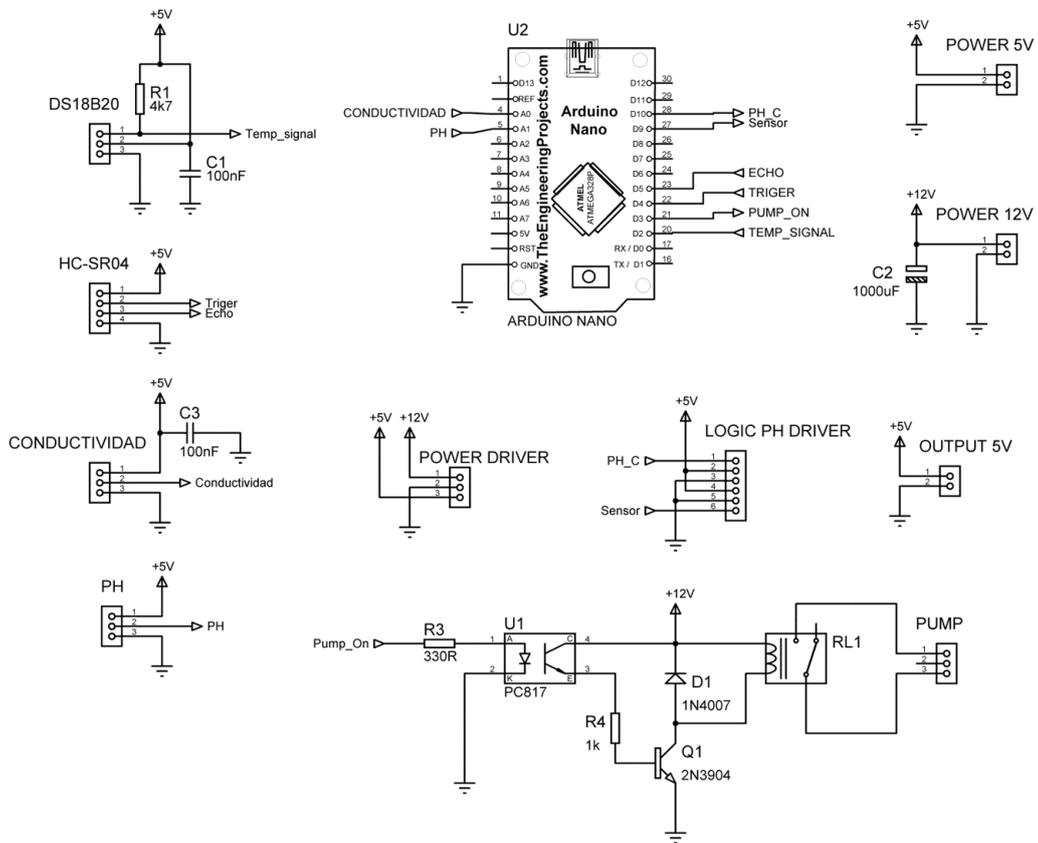


Figura 4.11: Diagrama de circuito de la tarjeta principal.

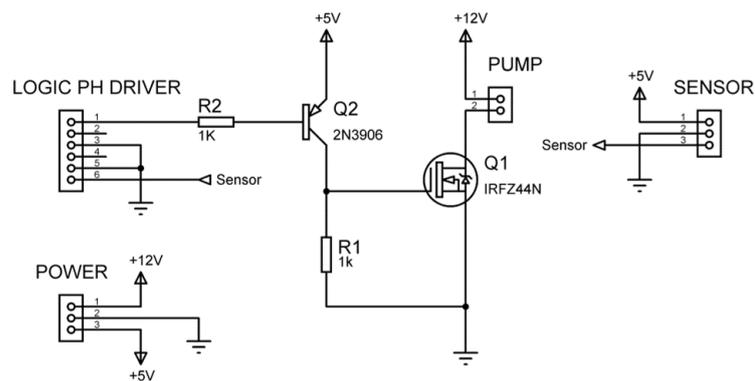


Figura 4.12: Diagrama de circuito del driver de control de pH.

Bibliografía

- [1] El telégrafo, «La producción del campo mejora con la tecnología,» 07 septiembre 2019. [En línea]. Available: <https://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/economia/4/produccion-tecnologiaecuador-ministerio-agricultura>. [Último acceso: 14 mayo 2020].
- [2] J. J. Prado, J. P. Erráez, I. Cilio , D. Godoy y N. Granizo, «Desempeño de actividades económicas seleccionadas en Ecuador periodo 2002Q1 - 2018Q3,» Boletín Macroeconómico, p. 20, 21 enero 2019.
- [3] Instituto Nacional de Estadística y Censo, «Censo Nacional Agropecuario,» 2018. [En línea]. Available: https://www.ecuadorencifras.gob.ec//documentos/webinec/Estadisticas_agropecuarias/CNA/Resul_Nac_resu_Prov_CNA.zip. [Último acceso: 20 mayo 2020].
- [4] C. d. s. a. y. fertilizantes, «CASAFE,» [En línea]. Available: <https://www.casafe.org/elcamino-de-las-verduras-en-el-mercado/>. [Último acceso: 28 abril 2020].
- [5] O. M. d. l. Salud, «Organización Muandial de la Salud,» mayo 2016. [En línea]. Available: <https://www.who.int/features/qa/87/es/>. [Último acceso: 30 abril 2020].
- [6] A. Markowitz, «AARP,» 4 mayo 2020. [En línea]. Available: <https://www.aarp.org/espanol/salud/vida-saludable/info-2020/el-mundo-despues-del-coronavirus.html>. [Último acceso: 20 mayo 2020].
- [7] E. Jácome, «El Comercio,» 17 mayo 2020. [En línea]. Available:<https://www.elcomercio.com/actualidad/convivencia-mercados-quito-municipiocoronavirus.html>. [Último acceso: 20 mayo 2020].
- [8] M. Vargas, «Academia,»[En línea]. Available:https://www.academia.edu/26199520/Implementacion_de_una_Huerta_Hidroponica_en_el_Hogar. [Último acceso: Mayo 2020].
- [9] P. Hidroponía, «hidroponia.mx,» Hydro Enviroment, 5 noviembre 2014. [En línea]. Available: <https://hidroponia.mx/beneficios-de-la-hidroponia-casera/>. [Último acceso: 28 abril 2020].

- [10] J. Beltrano y D. O. Gimenez, Cultivo en hidroponía, Buenos Aires: Editorial de la Universidad de la Plata, 2015.
- [11] S. Baissetto, «Técnica de película nutritiva NFT,» [En línea]. Available: <https://cultivohidroponico.info/sistemas/tecnica-de-pelicula-nutritiva-nft/>.
- [12] C. Rubio Mena, «Repositorio Institucional Universidad Politécnica Salesiana,» Agosto 2017. [En línea]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/14533>. [Último acceso: Mayo 2020].
- [13] G. Ochoa, «Prezi,» 19 noviembre 2012. [En línea]. Available: https://prezi.com/ljqrs350ir2_/sobreexplotacion-del-suelo-y-degradacion-fisica/.
- [14] J. Douglas, Hidroponía: como cultivar sin tierra., Buenos Aires: El Ateneo, 2011.
- [15] R. D. Huacon Coello, «Desarrollo morfológico y rendimiento de tres variedades de fresa mediante un sistema hidropónico NFT cantón Guayaquil, Guayas,» Universidad Agraria del Ecuador, Guayaquil, 2020.
- [16] J. Martínez Jimeno, «Desarrollo de un sistema de monitorización de temperaturas en tiempo real para intercambiador de calor de doble tubo con sondas sumergibles de temperatura DS18B20 usando el miconcontrolador Arduino,» 11 04 2018. [En línea]. Available: <http://hdl.handle.net/10317/6932>. [Último acceso: 25 07 2021].
- [17] E. S. Oña Paucar, «Repositorio Digital UTN,» 07 10 2020. [En línea]. Available: <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/10622>. [Último acceso: 23 7 2021].
- [18] M. Máximo Gutierrez, «Repositorio Digital UPCT,» 12 2020. [En línea]. Available: <http://hdl.handle.net/10317/9038>. [Último acceso: 29 07 2021].
- [19] F. J. G. Díaz, «Universidad Autónoma del Estado de Morelos,» 02 2018. [En línea]. Available: <http://riaa.uaem.mx/handle/20.500.12055/1721>. [Último acceso: 25 07 2021].
- [20] M. d. C. Samaniego Armijos y H. J. Moreno Medina, «Universidad Estatal de Quevedo Repositorio Digital,» 2015. [En línea]. Available: <http://repositorio.uteq.edu.ec/handle/43000/1492>. [Último acceso: 24 07 2021].
- [21] L. Corona, G. Abarca y J. Mares, Sensores y actuadores, aplicaciones con Arduino, Azcapotzalco: Grupo Editorial Patria, S.A. de C.V., 2014.
- [22] B. S. Cañarte Delgado, «Repositorio Digital Universidad Técnica del Norte,» 20 julio 2021. [En línea]. Available: <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/11320>. [Último acceso: 16 Agosto 2021].
- [23] N. MECHATRONICS, «NAYLAMP MECHATRONICS,» [En línea]. Available: <https://naylampmechatronics.com/sensores-temperatura-y-humedad/16-sensor-de-temperatura-digital-ds18b20.html>. [Último acceso: 2021].

- [24] U. ELECTRONICS, «UNIT ELECTRONICS,» [En línea]. Available: <https://uelectronics.com/producto/sensor-de-ph-liquido/>. [Último acceso: 2021].
- [25] E. Electrostore, «ES Electrostore,» [En línea]. Available: <https://grupoelectrostore.com/shop/sensores/agua/modulos-sensor-analogo-de-conductividad-tds/>. [Último acceso: 2021].
- [26] N. MECHATRONICS, «NAYLAMP MECHATRONICS,» [En línea]. Available: <https://naylampmechatronics.com/sensores-proximidad/10-sensor-ultrasonido-hc-sr04.html>. [Último acceso: 2021].
- [27] ArduinoVe.com, «ArduinoVe-com,» [En línea]. Available: http://www.arduinove.com/index.php?route=product/product&product_id=325. [Último acceso: 2021].
- [28] Liverpool, «Liverpool,» [En línea]. Available: <https://www.liverpool.com.mx/tienda/pdp/bomba-para-fuente-evans-aqua-30w-110-volts/55753997>. [Último acceso: 2021].
- [29] A. Electronics, «AV Electronics,» [En línea]. Available: <https://avelectronics.cc/producto/mini-bomba-de-agua-sumergible-de-membrana-r385/>. [Último acceso: 2021].
- [30] Isaac, «Hardwarelibre,» [En línea]. Available: <https://www.hwlibre.com/arduino-nano/>. [Último acceso: 2021].
- [31] R. Desim, «Robotics Desim,» [En línea]. Available: <https://mitiendita.idesimproject.com/producto/raspberry-pi3-b/>. [Último acceso: 2021].