



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 HIDROPÓNICO VERTICAL DE FLUJO LAMINAR

DE NUTRIENTES AUTOMATIZADO”

AUTOR: SEBASTIAN ALEXANDER CAMPOVERDE FRANCO

DIRECTOR: CARLOS XAVIER ROSERO CHANDI

IBARRA

MAYO, 2021



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA AUTORIZACION DE USO Y PUBLICACIÓN A

FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, realizo la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DEL AUTOR			
CÉDULA DE IDENTIDAD:		0302704408	
APELLIDOS Y NOMBRE:		SEBASTIAN ALEXANDER CAMPOVERDE FRANCO	
DIRECCIÓN		MACAS-LUISA JARAMILLO	
E-MAIL		sacampoverdef@utn.edu.ec	
TELÉFONO FIJO	(02)2306748	TELÉFONO MÓVIL	0987182948

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	SISTEMA HIDRÓPONICO VERTICAL DE FLUJO LAMINAR DE NUTRIENTES AUTOMATIZADO
AUTOR (ES):	SEBASTIAN ALEXANDER CAMPOVERDE FRANCO
FECHA DD/MM/AA	17/08/2021
PROGRAMA	PREGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA	INGENIERO EN MECATRÓNICA
ASESOR/DIRECTOR	CARLOS XAVIER ROSERO CHANDI

2. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra de la presente autorización es original y se la desarrollo 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 esta y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 17 días del mes de agosto de 2021

A handwritten signature in blue ink, consisting of several loops and a long horizontal stroke at the end.

SEBASTIAN ALEXANDER CAMPOVERDE FRANCO

C.I. 0302704408



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERIA EN CIENCIAS APLICADAS
CERTIFICADO

En calidad de director del trabajo de grado “**SISTEMA HIDROPÓNICO VERTICAL DE FLUJO LAMINAR DE NUTRIENTES AUTOMATIZADO**”, presentado por el egresado **SEBASTIAN ALEXANDER CAMPOVERDE FRANCO**, para optar por el título de Ingeniero en Mecatrónica, certifico que el mencionado proyecto fue realizado bajo mi dirección.

Ibarra, 17 de agosto de 2021



Firmado electrónicamente por:
**CARLOS XAVIER
ROSERO CHANDI**

CARLOS XAVIER ROSERO CHANDI

DIRECTOR DE TESIS

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto no hubiera sido posible sin el apoyo que he tenido por parte de mis padres: Homero Campoverde y Mónica Franco que desde mi ingreso a la Universidad han sido un pilar fundamental en mi carrera universitaria al brindarme todo lo necesario para poder continuar día a día, así como también darme palabras de aliento en los peores momentos, por creer y confiar en mis capacidades.

Agradezco a mis hermanos por siempre brindarme su cariño y motivarme a continuar siempre hacia adelante, además a mis familiares que han aportado a mi desarrollo durante los años de carrera que han forjado en mí un carácter más profesional gracias a sus consejos.

También darles las gracias a mis compañeros tesisistas Jorge Fuentala y Esthefanny Salas, que, a pesar de las dificultades presentadas, entre todos como grupo pudimos sacar adelante el trabajo de grado de la mejor manera siempre apoyándonos los unos a los otros.

De manera especial agradezco a Estefy por ser una persona muy importante para mí tanto en la carrera como en mi vida personal, siendo no solo mi compañera en la lucha diaria por cumplir esa gran meta de culminar nuestra carrera universitaria sino a su vez ser la persona que me brindaba amor y ánimos de siempre seguir adelante, una de las cosas más representativas de la vida universitaria fue conocerte y siempre serás muy especial para mí.

Agradezco a mi director Xavier Rosero por brindarme su guía durante este proceso y por los grandes pensamientos que compartía durante el desarrollo de sus clases que causaron un impacto positivo en mi manera de ver las cosas.

Sebastian Campoverde

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mis padres que fueron mis guías en el amplio camino que recorrí hasta la culminación de mi carrera universitaria, por su apoyo incondicional en cada momento incluso en los más difíciles y por brindarme siempre su amor que me motivo a continuar hasta el final para lograr mis metas académicas.

A su vez a mis hermanos, familiares y amigos que fueron una parte fundamental en mi vida estudiantil, que se alegran al ver que culmine con mis estudios y me convierta en un profesional.

Sebastian Campoverde

RESUMEN

La agricultura como muchos otros campos prácticos dentro del país cada vez tienden a incluir la tecnología a sus métodos para mejorar la calidad de sus productos o aumentar la eficiencia de sus procesos, el presente trabajo se centra en el diseño e implementación de un módulo de cultivo hidropónico por técnica de película de nutrientes (NFT), que incluye como principal desarrollo tecnológico un sistema de iluminación artificial automatizado.

El presente trabajo de grado contiene la información necesaria para el diseño de un sistema hidropónico orientado al cultivo de fresas, con los cálculos para determinar la inclinación de los canales, así como obtener la capacidad del reservorio, el diámetro de la tubería principal que transporta la solución nutritiva y la selección de la bomba.

Con las especificaciones técnicas recabadas mediante el análisis del sistema hidropónico con la metodología de la casa de la calidad (QFD) y los cálculos, se implementa el módulo hidropónico en donde se realizan las pruebas en un cultivo hidropónico de fresas.

Se reúne información de los trabajos que aplican iluminación artificial a sistemas hidropónicos, se procede a incluir el sistema de iluminación artificial al módulo hidropónico, se observa la respuesta de los cultivares de fresa al inducir un fotoperiodo mediante una luminaria LED de espectro completo diseñada para plantas, que se activa y ajusta su intensidad en base al valor de dos sensores que miden la intensidad de luz que entrega el sol al cultivo.

Los resultados que se observa principalmente son las diferencias morfológicas de los especímenes que recibieron la iluminación complementaria al no haber presencia del sol y los que no recibieron la misma. Otro resultado que se obtiene es que el sistema de iluminación artificial debido al periodo de lluvias aportó casi la mitad de la energía lumínica en las distintas etapas de desarrollo de la planta.

ABSTRACT

Agriculture, like many other practical fields within the country, increasingly tend to include technology in their methods to improve the quality of their products or increase the efficiency of their processes, the present work focuses on the design and implementation of a cultivation module. Hydroponic by nutrient film technique (NFT), which includes an automated artificial lighting system as its main technological development.

This degree work contains the necessary information for the design of a hydroponic system oriented to the cultivation of strawberries, with the calculations to determine the inclination of the channels, as well as to obtain the capacity of the reservoir, the diameter of the main pipe that transports the nutrient solution and pump selection.

With the technical specifications obtained through the analysis of the hydroponic system with the quality house methodology (QFD) and the calculations, the hydroponic module is implemented where the tests are carried out in a hydroponic strawberry crop.

Information is gathered from the works that apply artificial lighting to hydroponic systems, the artificial lighting system is included in the hydroponic module, the response of strawberry cultivars is observed when inducing a photoperiod by means of a full spectrum LED luminaire designed for plants. , which is activated and adjusts its intensity based on the value of two sensors that measure the intensity of light delivered by the sun to the crop.

The results that are mainly observed are the morphological differences of the specimens that received complementary lighting in the absence of the sun and those that did not receive it. Another result that is obtained is that the artificial lighting system, due to the rainy season, provides almost half of the light energy in the different stages of development of the plant.

Índice general

Índice de Figuras.....	XIII
Índice de Tablas	XVI
Introducción	1
Objetivos	2
Justificación.....	4
Alcance.....	6
1. Revisión Literaria	7
1.1. Antecedentes de hidroponía en el Ecuador.....	7
1.2. Hidroponía	8
1.3. Sistemas hidropónicos	8
1.3.1. Sistema de técnica por flujo laminar de nutrientes (NFT).....	9
1.3.2. Sistema de raíz flotante	10
1.3.3. Sistema de cultivo NGS	11
1.4. La fresa en el cultivo hidropónico	11
1.4.1. Morfología de la planta de fresa	12
1.4.2. Variedades de fresa más empleadas en cultivos hidropónicos	13
1.5. Sistemas hidropónicos adecuados para el cultivo de fresas.....	14
1.5.1. Sistema de tubos de PVC.....	14
1.5.2. Sistema de canaletas elevadas.....	14

1.5.3.	Sistema vertical de macetas hidropónicas.....	15
1.5.4.	Bolsa plástica simple.....	15
1.6.	Iluminación artificial en plantas.....	16
1.6.1.	Fotorreceptores en las plantas.....	16
1.6.2.	Calidad de luz y colores del espectro.....	17
1.6.2.1.	Ultravioleta.....	19
1.6.2.2.	Azul.....	19
1.6.2.3.	Verde.....	19
1.6.2.4.	Rojo.....	20
1.6.2.5.	Rojo-Lejano.....	20
1.6.3.	El fotoperiodo.....	20
2.	Metodología.....	22
2.1.	Requerimientos del sistema hidropónico.....	22
2.1.1.	Análisis QFD.....	22
2.1.1.1.	Requerimientos del usuario (la voz del cliente).....	22
2.1.1.2.	La voz del ingeniero.....	23
2.1.2.	Canal de cultivo.....	24
2.1.3.	Reservorio.....	25
2.1.4.	Soporte para las plantas.....	25
2.2.	Dimensionamiento del sistema.....	26
2.2.1.	Canales de cultivo.....	26
2.2.2.	Bomba sumergible para el reservorio.....	29
2.2.2.1.	Caudal recomendado.....	29

2.2.2.2.	Cálculo del diámetro de la tubería principal	29
2.2.2.3.	Altura manométrica.....	31
2.2.2.4.	Cálculo de potencia de la bomba.....	37
2.2.3.	Capacidad del reservorio.....	38
2.3.	Diseño del sistema hidropónico	40
2.4.	Sistema de iluminación artificial	42
2.4.1.	Microcontrolador	42
2.4.2.	Iluminación LED	47
2.4.3.	Sensores de luz.....	51
2.4.4.	Pantalla para la interfaz humano-maquina.....	52
2.4.5.	Relevador de potencia.....	55
2.4.6.	Reloj de tiempo real (RTC).....	55
2.5.	Descripción general del sistema.....	56
2.6.	Programación	58
2.7.	Esquema de conexiones	60
2.8.	Diagrama eléctrico-electrónico.....	61
2.9.	Interfaz HMI	62
2.9.1.	Pantalla Principal	62
2.9.2.	Pantalla secundaria - Configuración modo automático	63
2.9.3.	Pantalla secundaria - Alarmas del sistema.....	64
3.	Implementación y pruebas	65
3.1.	Invernadero para el sistema hidropónico	66
3.2.	Implementación del sistema de iluminación.....	66

3.3.	Pruebas de funcionamiento del sistema de iluminación	69
3.3.1.	Medición de la luminosidad ambiente	69
3.3.2.	Medición de rayos UV	73
3.3.3.	Medición de las dos variables de forma simultanea	75
3.4.	Análisis de la respuesta de un cultivo de fresas en el módulo hidropónico proporcionando la iluminación	77
3.4.1.	Etapa 1 - Germinación	77
3.4.2.	Etapa 2 - Maduración	79
3.4.3.	Etapa 3 - Floración	82
3.5.	Costos de fabricación	85
4.	Conclusiones y trabajo futuro.....	88
4.1.	Conclusiones	88
4.2.	Trabajo futuro	89

Indicé de Figuras

Figura 1.1. Sistema NFT básico, las flechas indican el recorrido de la solución nutritiva por los canales del sistema hasta retornar al reservorio [21].....	10
Figura 1.2. Sistema de raíz flotante, las raíces se encuentran sumergidas todo el tiempo [22].	10
Figura 1.3. Sistema NGS, compuesto por capas de bolsas de polietileno [23].....	11
Figura 1.4. Tasas de absorción relativa de diferentes fotorreceptores en las plantas [13].....	17
Figura 2.1. Maceta para hidroponía número 8, ideal para el soporte de plantas que dan frutos.	26
Figura 2.2. Diseño del canal de cultivo de PVC, con capacidad de 6 plantas [Autor].	27
Figura 2.3. Inclinación del canal de cultivo, en base al cálculo del gradiente [Autor].	28
Figura 2.4. Acople de reducción de 4 pulgadas a 2 pulgadas.	28
Figura 2.5. Acumulación en el canal por reducción de 4 a 2 pulgadas [Autor].	28
Figura 2.6. Bomba sumergible seleccionada de 25W.	38
Figura 2.7. Diseño final de la estructura: a) Canales de cultivo, b) Abrazaderas de soporte, c) Bomba sumergible 25W, d) Panel para elementos de control, e) Reservorio con 50L de capacidad, f) Tubería principal [Autor].	41
Figura 2.8. Arduino Mega Atmega 2560 [39].	43
Figura 2.9. Tarjeta de desarrollo ELEGOO MEGA 2560 [40].	44
Figura 2.10. Raspberry Pi 3 B+ [41].	45
Figura 2.11. Wills LED 600W [42].	48
Figura 2.12. Briignite LED 96W [43].	49

Figura 2.13. Wills LED 1000W [44].	50
Figura 2.14. Sensor seleccionado CQRobot de luminosidad ambiente [44].	51
Figura 2.15. Comimark sensor de rayos UV [45].	52
Figura 2.16. 3,5-inch LCD TFT shield [46].	53
Figura 2.17. Nextion 3,5-inch LCD TFT UART [47].	54
Figura 2.18. Modulo relé 5v Arduino [48].	55
Figura 2.19. Módulo RTC DS1302 [49].	56
Figura 2.20. Diagrama de bloques del sistema de iluminación artificial [Autor].	57
Figura 2.21. Diagrama de flujo sistema de iluminación [Autor].	59
Figura 2.22. Esquema de conexiones del sistema de iluminación [Autor].	60
Figura 2.23. Esquema de conexiones eléctricas-electrónicas del sistema [Autor].	61
Figura 2.24. Diseño de la pantalla principal del HMI [Autor].	63
Figura 2.25. Diseño de la pantalla secundaria: Configuración modo automático [Autor].	63
Figura 2.25. Diseño de la pantalla secundaria: Alarmas del sistema [Autor].	64
Figura 3.1. Módulo de cultivo hidropónico NFT [Autor].	65
Figura 3.2. Invernadero para el módulo hidropónico [Autor].	66
Figura 3.3. Luminaria Led Wills instalada en el módulo hidropónico [Autor].	67
Figura 3.4. Motor a pasos colocado en la perilla de la luminaria Wills [Autor].	67
Figura 3.5. Caja de acrílico para sensores [Autor].	68
Figura 3.6. Panel de control local en el módulo hidropónico [Autor].	68
Figura 3.7. Código internacional de colores del índice UV [53].	73
Figura 3.8. Mini invernadero con primeros brotes de las semillas [Autor].	77

Figura 3.9. Mini invernadero para obtención de plántulas con iluminación artificial [Autor].	78
Figura 3.10. Horas de funcionamiento del sistema durante el periodo de germinación [Autor].	79
Figura 3.11. Trasplante de plántula a maceta hidropónica [Autor].	80
Figura 3.12. Verificación del estado de las raíces [Autor].	81
Figura 3.13. Primera flor en una planta de fresa hidropónica [Autor]......	81
Figura 3.14. Horas de funcionamiento del sistema durante el periodo de maduración [Autor].	82
Figura 3.15. Desarrollo de flores en las fresas hidropónicas [Autor].	83
Figura 3.16. Horas de funcionamiento del sistema durante el periodo de floración [Autor].	84
Figura 3.17. Primeros frutos de las plantas [Autor]......	84

Índice de Tablas

Tabla 1. Tabla comparativa de sistemas empleados para el cultivo de fresas [Autor].	15
Tabla 2. Equivalencias según diversas fuentes sobre las longitudes de onda [Autor].	18
Tabla 3. Especificaciones Técnicas [Autor].	24
Tabla 4. Velocidades usuales de diferentes fluidos.	30
Tabla 5. Propiedades del agua en función de la temperatura.	33
Tabla 6. Valores de rugosidad absoluta.	34
Tabla 7. Coeficiente para diferentes accesorios.	36
Tabla 8. Matriz de priorización para la selección del microcontrolador [Autor].	46
Tabla 9. Matriz de priorización para la selección de iluminaria LED [Autor].	50
Tabla 10. Resultado matriz de priorización Pantalla HMI [Autor].	54
Tabla 11. Valores de muestra medidos con el sensor de luminosidad ambiente [Autor].	70
Tabla 12. Factores de conversión de PPFD a Lux en distintos casos.	72
Tabla 13. Máximos de luminosidad ambiente [Autor].	73
Tabla 14. Valores de índice UV medidos con el sensor [Autor].	74
Tabla 15. Parámetros para el ajuste del sistema de iluminación artificial [Autor].	76
Tabla 16. Recursos para la solución nutritiva [Autor].	80
Tabla 17. Diferencias morfológicas observadas entre los especímenes [Autor].	85
Tabla 18. Costos del sistema hidropónico [Autor].	86
Tabla 19. Costos del sistema de iluminación artificial [Autor].	87
Tabla 20. Costo total de fabricación [Autor].	87

Introducción

Los sistemas hidropónicos han tomado impulso en los últimos años en nuestro país, principalmente para obtener cultivos con un alto nivel de calidad. Son muchas las empresas que han aplicado este sistema para mejorar sus técnicas de cultivo, a pesar de esto las personas aun no conocen mucho sobre el tema en especial los pequeños productores.

En el desarrollo de estos sistemas es importante tomar en cuenta ciertas restricciones para el diseño, que en este caso es aplicado para el cultivo de fresa de tal forma que el sistema logre satisfacer las condiciones del fruto; el uso eficiente de un sistema hidropónico le da buen soporte al cultivo y a la vez le provee nutrientes de manera eficiente [1], [2]. Al mismo tiempo, el sistema ayuda a combatir con las plagas propias que atacan a la fresa y las enfermedades producidas por virus, hongos o patógenos, esto es posible gracias al control que provee el sistema. Estos beneficios ayudan a obtener un cultivo eficiente, que evita problemas como el aumento de los costos de producción al perder una cosecha entera de fresas por una enfermedad, esto incluso ha hecho que los productores abandonen el cultivo de fresas por las exigencias de la planta.

El control de la intensidad de la luz que se provee al sistema es uno de los factores importantes para el cultivo intensivo de fresas, permitiendo obtener de 3 a 4 cosechas por año al dejar de depender de las condiciones climáticas [3]. El objetivo principal de este proyecto es implementar un sistema hidropónico óptimo para el cultivo de fresa con un

control aceptable y que permita inducir una respuesta fotoperiódica en el fruto mediante un sistema de iluminación LED.

Objetivos

Objetivo general

- Desarrollar un sistema hidropónico con procesos automatizados que proporcione una respuesta fotoperiódica mediante iluminación artificial en las fresas.

Objetivos específicos

- Determinar todas las variables, condiciones y restricciones para la implementación del sistema hidropónico.
- Desarrollar el sistema de respuesta fotoperiódica con iluminación variable.
- Analizar las respuestas del cultivo en el sistema y la respuesta fotoperiódica.

Problema

La agricultura es una de las principales fuentes de ingreso para el país como indica la Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua (ESPAC). Debido a que esta actividad genera ingresos muy lucrativos, cada vez más personas incursionan en ella. Sin embargo, existen fracasos por algunas razones como los terrenos no adecuados para el cultivo y el clima inestable en varias regiones de nuestro medio [4].

La demanda de alimentos cada vez es más grande, debido a que la población en el país crece exponencialmente. Tan solo en la provincia de Imbabura son 29.324 hectáreas

las que tienen cultivos tradicionales con distintos tipos de productos, entre los cuales el aguacate es el más destacado por su potencial para la exportación [5].

Por otro lado, tenemos la técnica de hidroponía que básicamente es la técnica de cultivo sin tierra, utilizando en su lugar una solución nutritiva para las raíces ubicadas en un sustrato o sumergidas en la misma solución [5]. A pesar de los beneficios de la hidroponía, esta no ocupa un lugar significativo en la provincia de Imbabura, puesto que solo se han realizado investigaciones, como en el cantón Antonio Ante con lechugas hidropónicas [6]. Una de las muestras más grandes de hidroponía se encuentra en los campos de la empresa Green Lab (San Vicente, Manabí), contando con una producción de 30 toneladas de lechugas hidropónicas al mes, la empresa ha tenido un gran éxito con este producto [7].

Las personas que quieren incursionar en el mundo de la agricultura y no cuentan con el espacio o terreno adecuado, desisten y mucho más al vivir en ciudades grandes, razón por la cual con el desarrollo de un sistema hidropónico vertical que no ocupe un espacio significativo para ser ubicado en un patio o terraza y sea de bajo costo, se puede potenciar el desarrollo de cultivos en el área de Imbabura con fresas de calidad, que según Zambrano [8] la importancia económica de la frutilla se da en la distribución local, a nivel nacional destaca Imbabura, Tungurahua y Pichincha como las provincias donde se concentra la producción de este y que en conjunto superan las 400 hectáreas de cultivo destinadas a este fruto, no existen muchos datos estadísticos pero se presume que en solo en Pichincha se producen de 5000 a 6000 cajas de diarias de fresas, como indica el Comercio son muchos los pequeños agricultores que se dedican a cultivar frutillas por ser

un cultivo rentable según María Puma “Estima que en media hectárea (10 200 plantas) invierte 1 500 dólares y cada semana obtiene 50 dólares por la venta de la cosecha.” [9].

Solo en el cantón de Ibarra son 189 puestos en los 4 mercados locales existentes que se dedican a la venta de la fresa [10], razón por la cual con el desarrollo de un sistema hidropónico que no ocupe un espacio significativo y cuente con los sistemas necesarios para lograr un cultivo óptimo de fresas, se puede potenciar el desarrollo por este método de cultivo en el área de Imbabura obteniendo fresas de calidad, fruto que cuenta con una gran demanda en la zona sobre todo en pastelerías y heladerías como “Los Helados de la Colon” [11].

Justificación

La hidroponía es una técnica con bastante investigación, debido a que se ha desarrollado a lo largo de los años, donde los países asiáticos y europeos han sido los más involucrados. China es un claro ejemplo de la adaptación de este sistema, por la necesidad de abastecer a toda su población [12]. Estas son las bases de que la demanda de este tipo de sistemas vaya en aumento estos últimos años en países latinoamericanos, generando diversos mercados atractivos tanto para consumidores como agricultores. A pesar de ello, en nuestro medio es muy bajo el conocimiento sobre estas técnicas lo que ha impedido su desarrollo y adaptación.

La implementación de nuevas tecnologías a la hidroponía es importante y más cuando se trata de un fruto que exige muchas características del medio en el que se cultiva como es el caso de la fresa, y es por esto que la cantidad de iluminación que recibe el fruto en su proceso de cultivo definen factores importantes como el color,

tamaño, aroma y dulzor, la luz es un factor importante pues desencadena la función fotosintética misma que se logra por el fotoperiodo de la planta que como indica el, artículo técnico, Iluminación Artificial en la Agricultura, “ el fotoperiodismo se denomina al efecto de la duración del día sobre la floración, es decir, se trata de la respuesta biológica de las plantas a las proporciones de horas de luz y de oscuridad que ocurren diariamente, y que varían a lo largo del año” [13].

En base a lo antes expuesto se han realizado diversas investigaciones, con el fin de saber cuáles son las longitudes de onda de luz que se debe aplicar al cultivo de fresas en cada una de sus etapas de crecimiento, un ejemplo de esto que se obtiene de un artículo en el que se expone un experimento hecho a dos variedades de fresas cultivadas en un medio hidropónico en el cual se probaron distintas longitudes de onda en la etapa de enraizamiento y plántula, donde obtuvieron que la intensidad de luz debe ser de $90 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y $270 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ respectivamente para la mayor producción en estas etapas. [14] Es por esta razón que empresas como Hoogstraten Strawberries con su técnica de iluminación artificial han logrado obtener hasta 4 cosechas de frutos de una misma planta de fresa en un año, debido a que ya no dependen de la duración del día en la estación del año en la que se encuentren [15].

Es relevante aplicar este sistema hidropónico para el desarrollo de cultivos. Debido a sus ventajas como son que podría ser aplicado en cualquier sitio sin necesidad de un terreno físico grande pues si se implementan canales o plataformas de cultivo estos pueden tener distintas alturas y ser escalables, se obtienen resultados más eficientes en comparación de la forma tradicional pues las plantas no compiten por los nutrientes del

suelo, sino que se le aportan individualmente gracias a una solución nutritiva de abonos y fertilizantes. Se ahorra tiempo y dinero al menorar los gastos empleados en pesticidas o químicos para el óptimo desarrollo de la planta, esto se debe a que en el cultivo hidropónico no existen las malas hierbas y se puede tener mayor control de plagas lo que otorga más calidad al producto final. El agua se aprovecha de una manera más optima al recorrer el sistema que no debe tener filtraciones para su recirculación, mientras que al cultivar en tierra el agua se filtra por la capa del suelo y no es aprovechada en su totalidad por las plantas [16].

Alcance

El sistema hidropónico constara con 2 canales con una capacidad para 6 plantas en cada uno. Además, integra un sistema de recirculación de solución nutritiva mediante una bomba de agua implementada en un reservorio, el retorno será por efecto de la gravedad dado que la disposición de los canales será levemente inclinada. Integrará un sistema de iluminación LED en el que se puedan variar las longitudes de onda para generar una respuesta fotoperiódica en las fresas y se incluirá un sistema de supervisión para los distintos parámetros por medio de un HMI.

Capítulo 1

1. Revisión Literaria

En el presente capítulo se expone los conceptos que se toman en cuenta para implementar un sistema hidropónico orientado al cultivo de fresas, partiendo de lo que se realiza en el Ecuador en el ámbito de la hidroponía. Además, se busca analizar la importancia de aplicar luz artificial como medio de ayuda para el desarrollo de las plantas, con la finalidad de lograr identificar la mejor metodología para cumplir con el objetivo del trabajo de grado.

1.1. Antecedentes de hidroponía en el Ecuador

Una de las muestras más grandes de hidroponía se encuentra en los campos de la empresa Green Lab (San Vicente, Manabí), contando con una producción de 30 toneladas de lechugas hidropónicas al mes, la empresa ha tenido un gran éxito con este producto llegando a generar ventas mensuales de \$30000, comercializando su producto en supermercados importantes como Corporación favorita y Mi Comisariato [17]. Otro ejemplo es una firma llamada “La Parcela” que tiene una experiencia de 15 años en el cultivo de lechuga por medio de técnicas hidropónicas y que debido a la alta calidad que manejan desde hace unos años sus productos se empaican y comercializan por todos los locales de la cadena de supermercados Supermaxi, para esto generan alrededor de 15000 kilos de lechugas al mes, con sumo cuidado y solo de este producto obtienen la cantidad de \$3000. Otra firma “La Comarca” que se ubica en la provincia del Pichincha, tiene una

producción de 70000 unidades de lechuga y las distribuyen por las provincias del Guayas, Azuay y Pichincha [18].

Por otro lado, también últimamente han surgido pequeños productores que utilizan la hidroponía para cultivar sus productos y ofrecerlos en el mercado local como es el caso de Marcelo Javier Garcés Quilambaqui, productor independiente, que tiene una producción de 5000 unidades en su invernadero hidropónico utilizando la técnica NFT y que se establece en la terraza de su vivienda, en la parroquia El Cambio [19].

A pesar de los beneficios de la hidroponía, esta no ocupa un lugar significativo en la provincia de Imbabura, puesto que solo se han realizado investigaciones como la tesis desarrollada por un estudiante de nuestra propia Universidad, en el cantón Antonio Ante con lechugas hidropónicas [6].

1.2. Hidroponía

Para empezar, es importante definir que la técnica de hidroponía es básicamente el cultivo de plantas sin la necesidad de tierra, utilizando en su lugar una solución nutritiva que alimentara las raíces, mismas que estarán ubicadas en sustrato o en su lugar sumergidas en la misma solución, la cual contiene los componentes que necesita la planta para su crecimiento y donde las raíces quedan suspendidas gracias a utilizar distintos soportes como espuma, cortezas o inclusive grava [20].

1.3. Sistemas hidropónicos

Los sistemas para el cultivo de plantas sin la necesidad del suelo no solo se limitan a los hidropónicos sino se dividen en 3 grupos:

- Cultivos en agua (con solución nutritiva).
- Cultivos en aire(aeropónicos).
- Cultivos en Sustrato con solución nutritiva.

A pesar de que los sistemas de cultivo sin suelo tienen el mismo principio están estructurados de distintas maneras, dentro de los grupos de sistemas que existen se trabaja con los primeros de cultivos en agua (con solución nutritiva) donde se encuentran los siguientes tipos de sistemas:

1.3.1. Sistema de técnica por flujo laminar de nutrientes (NFT)

Tiene como base para su funcionamiento la circulación continua o intermitente de la solución nutritiva como se observa en la figura 1.1, esta solución forma en el espacio de los canales donde circula una fina capa que atraviesa las raíces de las plantas o el sustrato, para esto en los canales deben existir aberturas en donde se inserten las plantas con una canastilla que sirva de soporte al espécimen, es un sistema que se centra en la reducción del espacio en donde se implemente. La recirculación se genera gracias a la implementación de una bomba que desde el reservorio o recipiente lleva toda la solución nutritiva a través del sistema, fomentando la oxigenación de las raíces [21].

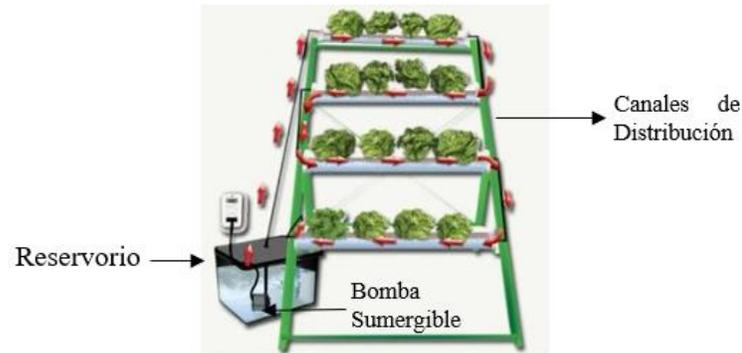


Figura 1.1. Sistema NFT básico, las flechas indican el recorrido de la solución nutritiva por los canales del sistema hasta retornar al reservorio [21].

1.3.2. Sistema de raíz flotante

Este sistema es el más adecuado para plantas pequeñas como las lechugas y algunas plantas aromáticas como se representa en la figura 1.2, donde el tiempo de cosecha se ve muy acelerado debido a que las plantas están todo el tiempo en contacto con la solución nutritiva, misma que no requiere mucho cuidado si el proceso es automatizado. En este sistema las plantas se ubican en planchas de un material flotante como el unigel, espuma o madera de balsa de manera que queden solo las raíces sumergidas en el contenedor que contiene la solución nutritiva misma que es oxigenada por un sistema de bombeo [22].

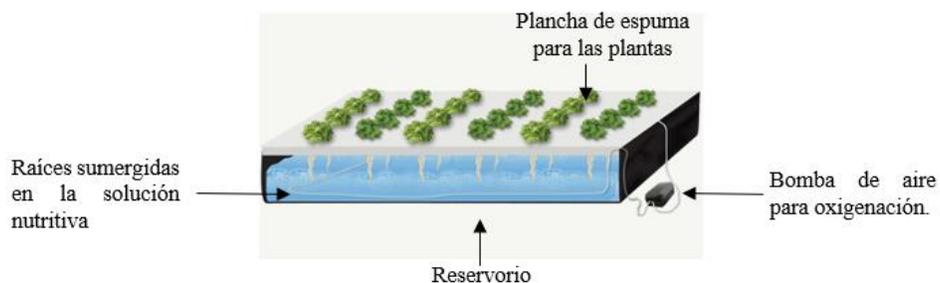


Figura 1.2. Sistema de raíz flotante, las raíces se encuentran sumergidas todo el tiempo [22].

1.3.3. Sistema de cultivo NGS

El nuevo sistema de cultivo o NGS por sus siglas en inglés, es un sistema hidropónico puro, en el que la planta desarrolla sus raíces en un medio líquido sin utilizar ningún tipo de sustrato sólido como se observa en la figura 1.3 .Esta instalado en un circuito cerrado, se encuentra suspendido en estructuras metálicas, y consiste en un conjunto de bolsas de polietileno colocadas una dentro de otra, por las que fluye una solución nutritiva desde la primera hasta la última capa, que sirve de recogida y conducción de agua hacia una tubería de drenaje que desemboca en un depósito, de manera que el agua y los nutrientes sobrantes que ella contiene se reutilizan [23].



Figura 1.3. Sistema NGS, compuesto por capas de bolsas de polietileno [23].

1.4. La fresa en el cultivo hidropónico

Al tener claro los distintos sistemas hidropónicos que existen, se profundiza en la morfología de la planta seleccionada y cuáles son las variedades más utilizadas en cultivos hidropónicos:

1.4.1. Morfología de la planta de fresa

Esta planta esta provista por un tallo engrosado corto, llegando a tener de 2 a 3 cm de longitud, encontrándose comprimido en una roseta basa cubierta por hojas basales o estipuladas solapadas, tratándose en realidad de un rizoma, comúnmente llamada corona misma que produce hojas en muy estrechos intervalos, sus flores se desarrollan en la posición terminal y en su base tiene raíces [24].

El sistema radical de la fresa es fibroso, poco profundo, se estima que del 73% al 90% del peso de las raíces se encuentran en los primeros 15cm del medio de cultivo.

Las hojas son alternas, trifoliadas, con su borde aserrado, largamente pecioladas, tienden a formar una roseta cerca del suelo y su color es verde [25].

En las axilas de las hojas suelen desarrollarse yemas o meristemos axilares. Estas yemas, dependiendo de factores como el estado nutricional y las condiciones ambientales, se desarrollan de distinta manera: Permanecen aletargadas o desarrollan estolones, ramas o escapos florales [24]. Estos estolones, conocidos también como tallos rastreros, producen raíces adventicias, de las que pueden surgir eventualmente nuevas plantas.

El tallo que porta la inflorescencia recibe el nombre de escapo floral y el tallo que soporta a cada una de las flores se llama pedúnculo floral. El conjunto de estos elementos de la planta será el ramo floral [24].

En cuanto a la flor de la fresa, *F. x Ananassa Duch.*, como indica Lopez en [24] “la flor es hermafrodita. El receptáculo floral se desarrolla y engrosa por encima del cáliz, colmándose de sustancias azucaradas y aromas perfumados, a ese conjunto se le llama

impropia y familiarmente fruto. Los verdaderos frutos, llamados erróneamente semillas, son los aquenios, dispuestos en alveolos de profundidad/prominencia variable. El tamaño de lo que se suele llamar fruto depende de diversos factores genéticos, fisiológicos y ambientales. Existe una correlación positiva entre el tamaño de la flor y del fruto.”

1.4.2. Variedades de fresa más empleadas en cultivos hidropónicos

En las variedades de fresa (*Fragaria x ananassa* Duch.) se presentan diferentes tipos de respuesta a la longitud del día (fotoperíodo) y a las temperaturas (termoperíodo). En base a esto se tiene la primera de las variedades conocida como de día corto o variedad de cosecha única, con yemas florales cuando los días llegan a ser cortos y las temperaturas son bajas a finales de verano o principio de otoño. Las fases de su crecimiento tienden a estar diferenciadas: floración, fructificación y emisión de estolones en esta secuencia.

Las variedades “reflorecientes” (o remontantes) presentan yemas de flor más libremente en días largos por lo general en el verano.

Otra variedad es la de día neutro que son poco afectadas por el fotoperíodo y por el termoperíodo, llegan a obtener frutos mientras las temperaturas sean lo suficientemente elevadas para mantener el crecimiento.

Según señala López, en [24] “La fresa necesita satisfacer unas necesidades concretas de horas de frío, entendidas como horas por debajo de los 7°C, que varían de unas variedades a otras, y que conlleva el paso de la planta por viveros en altura, donde tiene lugar la producción de estolones.”

1.5. Sistemas hidropónicos adecuados para el cultivo de fresas

De los diferentes tipos de sistemas expuestos que utilizan solución nutritiva y en base al análisis de la planta de fresa uno de los más utilizados en el cultivo de fresas para principiantes es el NFT, este sistema a su vez viene en distintas configuraciones de las cuales existen 4 tipos que ya han sido probados para este fruto y se exponen a continuación:

1.5.1. Sistema de tubos de PVC

Son los más usados para diversas aplicaciones incluso por grandes productores, debido a que este sistema cuenta con mucho respaldo investigativo y es de fácil implementación. Por otro lado, provee buena iluminación a la planta, con la posibilidad de volverse escalable [26].

1.5.2. Sistema de canaletas elevadas

La principal característica de este sistema es contar con un contenedor donde se coloque el sustrato, incorpora una manguera que realiza un riego por goteo de la solución nutritiva y en la parte inferior de dicho contenedor se adhieren canaletas que recolectan la solución nutritiva que es drenada del sustrato por efecto de la gravedad, la desventaja de este sistema es que la recirculación se hace compleja por la presencia del sustrato [26].

1.5.3. Sistema vertical de macetas hidropónicas

Este es uno de los sistemas más complejos, ya que se debe evitar que las plantas queden expuestas a la sombra de las otras plantas, debido a que la configuración de este sistema se basa en tener contenedores sobrepuestos ya sea macetas, tubos de PVC u otro medio. En este caso la bomba impulsa la solución nutritiva a la parte superior de las columnas mediante tuberías de distribución desde el contenedor [26].

1.5.4. Bolsa plástica simple

Es el sistema más simple de todos, se trata de individualizar el comportamiento de la planta al tratarse de una bolsa plástica rellena con sustrato, en la cual se siembra una sola planta de fresa y el riego se realiza por goteo, las ventajas son que es un método económico pues se le pueden aplicar muchos sensores para analizar el comportamiento del desarrollo de la planta de manera aislada y con todas las condiciones idóneas que queramos implementar [27].

En la tabla 1 expuesta a continuación se presenta un resumen comparativo de los 4 tipos de sistemas adecuados para el cultivo de fresas:

Tabla 1. Tabla comparativa de sistemas empleados para el cultivo de fresas [Autor].

Tipo de sistema	Capacidad para varias plantas	Fácil construcción	Escalabilidad	Recirculación de solución nutritiva
Sistemas de tubos PVC.	sí	sí	sí	sí
Sistema de canaletas elevadas.	sí	no	sí	no
Vertical de macetas hidropónicas.	sí	sí	no	sí
Bolsa plástica simple.	no	sí	no	no

1.6. Iluminación artificial en plantas

Los sistemas de iluminación artificial son cada vez más usados por diversas empresas dedicadas al cultivo hidropónico o incluso por agricultores con cultivos grandes o pequeños, esto se debe a que por diversas circunstancias climáticas las plantas no llegan a recibir la cantidad necesaria de luz que deberían absorber diariamente para potenciar su crecimiento. Llega a ser este un factor para que en temporadas de lluvia o de invierno ciertos cultivares no lleguen a presentar frutos o no se desarrollen durante dichos periodos por la ausencia de luz natural. Con estos sistemas se puede llegar a obtener cultivos fuera de temporada y en un menor tiempo, lo que en hidroponía significa un menor gasto en insumos para el desarrollo de la planta como: solución nutritiva, cuidado, mantenimiento entre muchos otros.

Se necesita definir diversos conceptos para entender la importancia de la iluminación en el desarrollo de las plantas:

1.6.1. Fotorreceptores en las plantas

Las plantas utilizan el espectro de luz similar al que se percibe por el ojo humano, con longitudes de onda entre 400 nm y 700 nm, pero con la diferencia de que ellas captan principalmente la luz roja y azul. El proceso de absorber la luz y utilizar su energía para transformar el agua y el dióxido de carbono en oxígeno y moléculas complejas se da gracias a la clorofila, misma que es un fotorreceptor (receptor de fotones) que se encuentra en los cloroplastos de las plantas y dan la coloración verde a las plantas. En las plantas superiores se presentan dos tipos de clorofilas, la clorofila a y la clorofila b que difieren un poco entre ellas y esto hace que capten diferentes longitudes de onda [13].

Además de la clorofila existen otros pigmentos que se denominan accesorios (carotenoides, xantofilas) y sustancias fenólicas (flavonoide, antocianinas, flavones y flavonoides) estos captan otras longitudes de onda que se encargan de proporcionar las coloraciones de las frutas y flores de la planta, a la vez la protegen de la radiación excesiva.

Todo esto nos indica que además de la fotosíntesis que produce el crecimiento de la planta, las otras funciones de la planta como la germinación o la floración dependen también de la luz, pero no de la cantidad sino de las diferentes longitudes de onda en cantidades suficientes para generar un efecto concreto [3], esto se ve reflejado en la figura 1.4 que indica en que longitud de onda del espectro cada uno de los fotorreceptores tiene mayor tasa de absorción.

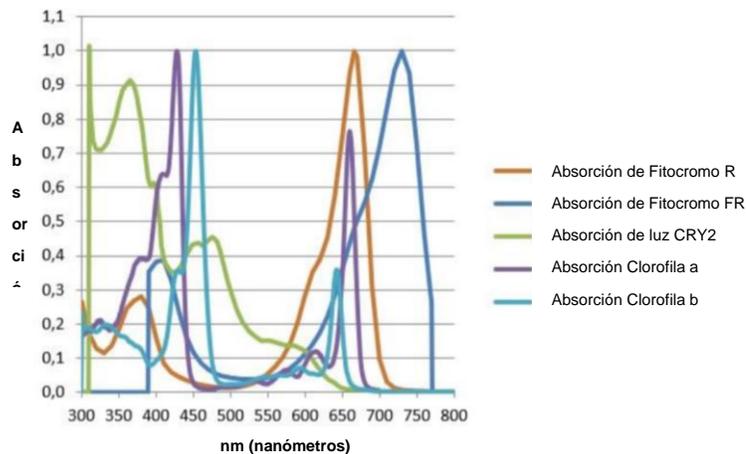


Figura 1.4. Tasas de absorción relativa de diferentes fotorreceptores en las plantas [13].

1.6.2. Calidad de luz y colores del espectro

Como se dijo en el inciso anterior las plantas utilizan el mismo espectro de luz que percibe el ojo humano, esta luz entre 400 nm y 700nm que usan las plantas se

denomina radiación PAR o radiación fotosintéticamente activa, pero como indica Bures, en [13] “el desarrollo y crecimiento vegetal no se consigue solo mediante la fotosíntesis, es decir que hay información vital tanto dentro de la zona PAR como más allá del PAR, en el intervalo de UV-B y UV-A(ultravioleta, 280 nm – 400 nm) y también en el área del rojo lejano, por encima de los 700 nm”. Además, existen respuestas en las combinaciones de onda que proporcionan a las plantas información de su entorno, como por ejemplo los cambios de relación de luz roja a luz roja lejana permite a una planta detectar a las plantas vecinas y activar la elongación del tallo para capturar más luz [13].

Las longitudes de onda que componen el espectro se definen por sus colores y es por esto por lo que existen diferentes definiciones de cuáles son los rangos de cada color según cada una de las normas en este caso ISO o los parámetros de foto-biólogos que han estudiado la influencia de la luz en las plantas, en la tabla 2 expuesta a continuación se presentan estas equivalencias.

Tabla 2. Equivalencias según diversas fuentes sobre las longitudes de onda [Autor].

Longitud de onda (nm)	ISO 2007	Sellaro et al. (2010)	Smith (1982)
UV-B	280-315		
UV-A	315-400		
Púrpura	360-450		
Azul	450-500	420-490	
Verde	500-570	500-570	
Amarillo	570-591		
Naranja	591-610		
Rojo	610-760	620-680	650-670
Rojo lejano		700-750	720-740

Es imperativo definir los efectos de cada longitud de onda sobre las plantas:

1.6.2.1. Ultravioleta

La definición de este rango según Bures, en [13] “La luz UV-B es captada por el fotorreceptor UVR8. A grandes dosis es perjudicial para las plantas, puesto que degrada el ADN. Sin embargo, a pequeñas dosis, tanto la UV-B como la UV-A aumentan la tolerancia al estrés de las plantas. En general, las plantas cultivadas bajo luz ultravioleta tienen hojas gruesas y tallos y entrenudos cortos.”

1.6.2.2. Azul

Continuando al siguiente color del espectro Bures define, en [13] que “La luz azul es percibida por los fotorreceptores de luz azul, las fototropinas y los criptocromos. Las fototropinas median en la regulación estomática y el movimiento de la planta hacia la luz. Los criptocromos regulan muchas respuestas fotomorfogénicas, tales como la inhibición del alargamiento del tallo. Las plantas que crecen bajo una irradiación con elevada luz azul tienen entrenudos cortos, alto contenido de materia seca y baja temperatura de la hoja (transpiración eficiente).”

1.6.2.3. Verde

De la misma manera Bures indica, en [13] que “La luz verde es percibida al menos parcialmente por fototropinas y criptocromos (receptores de luz azul). La mayoría de la luz verde se refleja o penetra a través del dosel vegetal. Sin embargo, la luz verde contiene información valiosa sobre el entorno de la planta, guiando así el hábito de crecimiento de esta. Las plantas cultivadas bajo la luz verde tienen pecíolos y entrenudos largos y elevada temperatura en las hojas.”

1.6.2.4. Rojo

Podemos observar que Bures, en [13] señala que “La luz roja es percibida por los fitocromos. Los fitocromos absorben tanto la luz roja como la roja lejana, y son los principales reguladores de la respuesta del síndrome de huida de la sombra. La luz roja convierte los fitocromos a su estado inactivo, Pr, que tiene un pico de absorción a 660 nm. La forma Pr del fitocromo se sintetiza en la oscuridad o en condiciones e luz roja lejana. Cuando el Pr absorbe la luz roja, se convierte en la forma de absorción del rojo lejano, Pfr, que tiene el pico de absorción a 730 nm. La conversión de Pr a Pfr puede revertirse con la aplicación de luz roja lejana y oscuridad.”

1.6.2.5. Rojo-Lejano

Para finalizar con el espectro Bures afirma, en [13] que “La luz roja lejana es absorbida por los fitocromos. Los fitocromos absorben tanto la luz roja como la roja lejana, y son los principales reguladores de la respuesta del síndrome de huida de la sombra. La luz roja lejana causa la floración prematura de muchas especies, y la elongación de tallo y pecíolos.”

1.6.3. El fotoperiodo

La luz juega un rol primordial en el crecimiento de las plantas. De hecho, existen tres procesos que dependen de la luz:

- El fototropismo, que son los movimientos hacia la luz y que dependen principalmente de la luz azul.

- El fotoperiodismo, que depende de la relación entre el color rojo y el rojo lejano y que es la respuesta a la longitud del día en las diferentes estaciones del año.
- La fotomorfogénesis, que es el crecimiento y desarrollo vegetal que está directamente controlado por la luz, en especial por la luz azul.

El efecto de la duración del día sobre la floración se denomina fotoperiodismo. Se trata de la respuesta biológica de las plantas a las proporciones de horas de luz y de oscuridad que ocurren diariamente, y que varían a lo largo del año [13].

Aunque las investigaciones relacionadas con los efectos de la luz son relativamente nuevas, lo que sí se sabe desde hace unos años es que hay plantas que florecen cuando el día se acorta (plantas de día corto) y las hay que lo hacen cuando el día se alarga (plantas de día largo). Además, existen otras que son de día neutro, es decir, que florecen independientemente de la longitud del día y aún existen unas más que necesitan un período fijo, o intermedio, de horas de luz para florecer [13].

Entre las plantas de día corto están los crisantemos, las fresas, las judías, las camelias, las primaveras y las poinsetias. Entre las de día largo están las lechugas o las espinacas. Entre las de día neutro están el pepino o el guisante. En sí, las plantas no calculan las horas de luz, sino que captan más bien las horas de oscuridad. En el transcurso de las horas de oscuridad algunas sustancias que inhiben la floración, y que se acumulan en los tejidos vegetales durante el día se destruyen, esto hace que las plantas reciban la señal de florecer [13].

Capítulo 2

2. Metodología

En el presente capítulo se dará a conocer las estrategias a ejecutar para el desarrollo tanto del sistema hidropónico, así como del sistema de iluminación artificial que llevaron a la culminación del proyecto.

2.1. Requerimientos del sistema hidropónico

El sistema se estructura de forma que su construcción cumpla con el análisis de despliegue de la función de calidad o QFD por sus siglas en inglés, pero que a la vez cumpla con parámetros óptimos para cultivares de fresa provenientes de artículos técnicos.

2.1.1. Análisis QFD

El análisis QFD tiene como resultado los requerimientos para la implementación del sistema hidropónico, mediante encuestas que van dirigidas a los involucrados en el proyecto de investigación se obtiene las demandas de los usuarios (o la voz del cliente) que mediante este análisis serán interpretadas como los requerimientos técnicos para el diseño del sistema [28].

2.1.1.1. Requerimientos del usuario (la voz del cliente)

Estas especificaciones se obtienen mediante una encuesta aplicada a los involucrados en el proyecto principalmente a los integrantes del grupo con el que se

realizó el proyecto, ver Anexo 1. Como resultado se infieren los siguientes requerimientos:

- El sistema hidropónico debe estar diseñado para el cultivo de fresas.
- Debe contar con un espacio amplio para la colocación del reservorio y los elementos que controlaran el mismo.
- Los canales deben estar a una altura óptima para la visualización del cultivo.
- Los canales deben estar diseñados para mantener un caudal uniforme en su interior y proveer la cantidad necesaria de solución nutritiva a la planta.
- Debe contar con un panel para instalar los elementos de control local.
- La construcción del sistema no debe ser muy compleja y debe ser resistente.
- Fácil transporte del sistema.

2.1.1.2. La voz del ingeniero

Para lograr traducir la voz del cliente a la voz del ingeniero y obtener las especificaciones técnicas del producto final se hace uso del análisis mediante la casa de la calidad, ver Anexo 2. Donde se obtiene una ponderación de los requisitos de diseño por orden de prioridad, como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Especificaciones Técnicas [Autor].

Proyecto: Sistema Hidropónico Vertical de Flujo Laminar de Nutrientes Automatizado			
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS			
Concepto	Propone	R/D	Descripción
Ergonomía	I	D	Los canales deben encontrarse a una altura óptima para la observación y manipulación de las plantas.
Espacio para componentes	C	R	Espacio amplio para la colocación del reservorio y los elementos que controlaran el mismo.
Diseño para cultivo fresas	C+I	R	Espaciado uniforme entre plantas.
Caudal uniforme	I	R	Los canales mantienen un caudal uniforme en su interior y proveen la cantidad necesaria de solución nutritiva a la planta.
Panel de control	C+I	D	Panel para instalar los elementos de control local.
Fácil construcción y resistencia	C	D	La fabricación del sistema no debe tener mayor complicación debido a la falta de herramientas por la crisis sanitaria.
Transporte	C	R	El sistema debe contar con ruedas para facilitar su traslado de un lugar a otro.
Costo	C	R	El costo está limitado a los materiales en el mercado local y de menor costo.

Propone: C=Cliente, I=Ingeniero. Parámetro: R=Requerimiento, D=Deseo.

En base a esta tabla se desarrolló el sistema hidropónico, y a continuación se detalla cada uno de los requerimientos de los principales elementos del sistema:

2.1.2. Canal de cultivo

Por lo general los sistemas NFT se realizan en tuberías PVC, este es el medio por donde circula la solución nutritiva. El diámetro del tubo seleccionado es de 4 pulgadas debido a que la fresa es una planta rastrera que necesita un soporte adecuado. Además, los orificios para colocar las canastillas que darán soporte a la planta para su crecimiento y permitirán a las raíces extenderse deben tener una separación de 25cm entre ellos, esto se debe a que la fresa puede generar raíces con un largo de máximo 30cm [24].

Los frutos de la fresa por lo general tienden a colgarse, razón por la cual los canales deben estar a una altura considerable del suelo con la finalidad de proveer una observación y cosecha ergonómica para una persona al implementar un cultivo en el sistema hidropónico.

2.1.3. Reservorio

Es el contenedor tipo tanque que alberga la solución nutritiva, también será el lugar a donde retornara esta una vez recorra el sistema, al mismo tiempo es el espacio donde se realizará el control de los parámetros necesarios para que la solución nutritiva cumpla con su función y no afecte a las plantas.

Se debe tomar en consideración el volumen de solución nutritiva que cada uno de los canales transportara al estar activo el ciclo de circulación para calcular la capacidad en litros que debe tener el tanque.

2.1.4. Soporte para las plantas

El soporte se lo realiza mediante canastillas con sustrato, como se puede observar en la figura 2.1 tienen 8cm de diámetro y un largo de 8cm debido a que son las más grandes disponibles en el mercado local que pueden ser colocadas en el tubo de PVC seleccionado, esta área es considerable en sistemas hidropónicos y proveerá a la planta la facilidad de extender sus raíces.



Figura 2.1. Maceta para hidroponía número 8, ideal para el soporte de plantas que dan frutos.

2.2. Dimensionamiento del sistema

En base al inciso anterior se toma las decisiones sobre las dimensiones y ubicación de cada una de las partes que componen el sistema hidropónico, en este apartado se detallan las acciones implementadas en base a criterios propios presentados en el análisis QFD y los cálculos realizados para diseñar el sistema:

2.2.1. Canales de cultivo

Se plantea que el sistema hidropónico albergue un total de 12 plantas y cuente con dos canales, es decir que cada canal contará con 6 orificios. Se utilizará un tubo de PVC de 4 pulgadas, en base al criterio del anterior inciso cada planta debe tener una distancia de 25cm, adicional a esto en cada extremo del tubo se agregará esta misma distancia como un sobrante para sujetar el canal a la estructura por lo que la longitud total del canal será de 1.75m obteniendo un tubo como el de la figura 2.2.

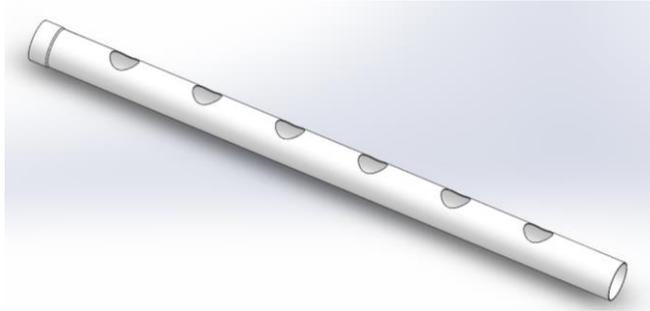


Figura 2.2. Diseño del canal de cultivo de PVC, con capacidad de 6 plantas [Autor].

El canal debe estar ligeramente inclinado para permitir la recirculación de la solución nutritiva, la relación entre la distancia del tubo con el gradiente de inclinación del canal que cumpla con el objetivo de mantener un flujo constante que según Daikage, en [29] “es deseable dar al canal NFT un gradiente "1:40" (gradiente de 25 mm por 1 m).”:

Ecuación 2-1: Gradiente inclinación canal de cultivo (Daikage)

$$X = \frac{1.75m \cdot 25mm}{1m} \quad (2.1)$$

$$X = 43.75mm$$

De la ecuación 2.1 se obtiene que el gradiente será de 43.75mm, como se observa en la figura 2.3 en el sistema se añadirá esta inclinación con ayuda de las abrazaderas que estarán colocadas en el ángulo correspondiente al cálculo.

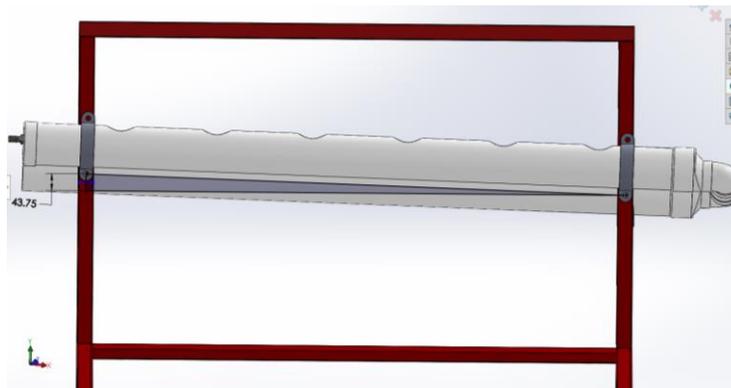


Figura 2.3. Inclínación del canal de cultivo, en base al cálculo del gradiente [Autor].

Con la finalidad de mantener un caudal constante en los canales y no sufrir pérdidas por reducciones muy grandes del diámetro con una manguera, se optó por utilizar un acople de reducción de 4 pulgadas a 2 pulgadas con salida descentrada, ver figura 2.4.



Figura 2.4. Acople de reducción de 4 pulgadas a 2 pulgadas.

Gracias a esto el canal se llenará hasta cerca de la mitad de su capacidad y empapará aún más a las raíces de las plantas como se aprecia en la figura 2.5, al humedecer de esta manera al sustrato se logra beneficiar a la bomba pues deberá activarse por menos tiempo.

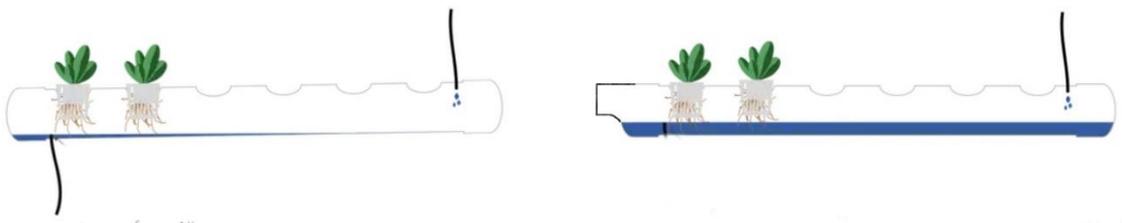


Figura 2.5. Acumulación en el canal por reducción de 4 a 2 pulgadas [Autor].

Para finalizar la altura a la que se encuentra el canal del suelo es aproximadamente 1.50m esta medida es adecuada pues facilita la colocación de

especímenes en el sistema hidropónico, brindando ergonomía para el agricultor o la persona que quiera trabajar en este sistema al no tener que agacharse debido a que la observación del desarrollo de la planta será más cómoda, así como su mantenimiento, una vez la planta de frutos la cosecha se hará sin mayor dificultad.

2.2.2. Bomba sumergible para el reservorio

La bomba es la encargada de llevar la solución nutritiva hacia todo el sistema y hacer que esta recircule, un requisito fundamental es que esta bomba sea sumergible y pueda anclarse al reservorio, la potencia de la bomba se calculó en función del caudal recomendado, el diámetro de la tubería principal y la altura manométrica:

2.2.2.1. Caudal recomendado

Se requiere que sea una bomba de baja potencia debido a que es imperativo contar con un flujo constante y de baja velocidad, como indica Antonius, en [30] “El caudal ideal debe estar entre 1,25 y $1,5 \frac{L}{min}$ medido al final de los canales que deben tener un máximo de 1 m de longitud”. Como nuestro canal supera la longitud de un metro se toma el valor de $1,5 \frac{L}{min}$ como referencia.

2.2.2.2. Cálculo del diámetro de la tubería principal

Tomando en cuenta que la velocidad en los fluidos va acorde a su rugosidad, el valor ideal que debe tener un fluido para no generar flujos perjudiciales es de $0,5 - 1,5 \frac{m}{s}$, este valor evita que con el tiempo las partículas se asienten y obstruyan el área efectiva del tubo.

Para la selección de la velocidad nos centraremos en la tabla 4 que muestra las velocidades usuales de los fluidos bajo ciertas condiciones [31].

Tabla 4. Velocidades usuales de diferentes fluidos.

FLUIDO	MÁQUINA	CONDUCTO	VELOCIDAD (m/s)	NOTAS
AGUA	Bombas volum. de émbolos	Succión	0.5 a 1.0	
		Expulsión	1.0 a 2.0	
	Bombas rotodinámicas	Succión	0.5 a 2.5	
		Expulsión	1.5 a 3.0	Baja presión
	Turbinas Hidráulicas	Expulsión	3.0 a 4.5	Alta presión
		Succión y expulsión	2.5 a 3.5	Tubería larga
AIRE	Compresor de émbolos	Succión y expulsión	4.0 a 6.0	Tubería corta
		Succión	16.0 a 20.0	
	Turbocompresor	Expulsión	25.0 a 30.0	
		Succión y expulsión	20.0 a 25.0	
	Mots. pequeños Comb. interna	Cond. de alimentación	10.0 a 15.0	Conducto largo
		Mots. grandes Comb. Int.	Cond. de alimentación	15.0 a 20.0
VAPOR DE AGUA	Máquinas de émbolo	Cond. de alimentación	20.0	Conducto corto
		Mots. de combustión	Cond. de alimentación	20.0
	Turbinas de vapor	Cond. de alimentación	10.0 a 15.0	Conducto largo
		Cond. Altm. grande	15.0 a 20.0	Conducto largo
	Máquinas de émbolo	Cond. Altm. pequeño	30.0 a 50.0	Vapor recalentado
		Cond. de expulsión	50.0 a 80.0	Vapor recalentado
PRODUCTOS DE COMBUSTIÓN	Máquinas de émbolo	Cond. de expulsión	25.0 a 30.0	Salida libre
		Cond. de expulsión	40.0 a 90.0	Al condensador
	Motores grandes de baja velocidad	Cond. de alimentación	25.0 a 30.0	Vapor saturado
		Cond. de alimentación	40.0 a 55.0	Vapor recalentado
	Motores grandes de alta velocidad	Cond. de alimentación	30.0 a 50.0	Vapor recalentado
		Cond. de alimentación	50.0 a 80.0	Vapor recalentado
GAS	Mots. comb.: conductos de alimentación	Cond. de alimentación	25.0 a 30.0	2 tiempos
		Cond. de alimentación	30.0 a 40.0	4 tiempos
	Gasoductos de baja presión	Cond. de alimentación	29.0 a 32.0	2 tiempos
		Cond. de alimentación	30.0 a 40.0	4 tiempos
	Gasoductos de alta presión	Cond. de alimentación	7.0 a 10.0	2 tiempos
		Cond. de alimentación	12.0 a 8.0	2 tiempos
ACEITE	Tuberías de succión – sistemas de lubric.		0.5 a 1.2	

Fuente: Kuszczewski (2004, 89).

Se selecciona la siguiente velocidad debido a que el sistema necesita de una bomba de succión para llevar la solución nutritiva desde el reservorio hacia los canales:

$$V = 1 \frac{m}{s}$$

Con el caudal recomendado $Q = 1,5 \frac{L}{min} = 1500 \frac{cm^3}{min}$, podemos calcular el diámetro de tubería a utilizar, aplicando la ecuación del caudal en tuberías y reemplazando el área se tiene:

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} * V \quad (2.2)$$

$$1500 \frac{cm^3}{min} * \frac{1m^3}{1x10^6 cm^3} * \frac{1min}{60s} = \frac{\pi D^2}{4} * 1 \frac{m}{s}$$

$$0,00024 \frac{m^3}{s} = \frac{\pi D^2}{4} * 1 \frac{m}{s}$$

$$\frac{0,00024m^2 * 4}{\pi} = D^2$$

$$D = 0,0174m \cong 1,7cm \cong 0,66 \text{ pulgadas}$$

En el mercado local encontramos tuberías en diámetros por pulgadas, por lo que al obtener 0,66 pulgadas seleccionamos la tubería de media pulgada que se encuentra comercialmente en la ferretería, para la línea principal.

2.2.2.3. Altura manométrica

Esta es la presión en la tubería expresada en metros de columna de agua (m.c.a) que debe superar la bomba para superar alturas de aspiración, desniveles, perdidas primarias, perdidas secundarias [32].

Ecuaciones para la carga primaria en la red principal:

Entre las diversas expresiones de origen experimentales que existen para representar las pérdidas de carga en las tuberías, una de las más utilizadas son de Darcy Weisbach y Hazen Williams representada en la ecuación 2-3[33].

Ecuación 2-3: Pérdidas primarias (Darcy Weisbach)

$$H_{rp} = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (2.3)$$

Donde:

- H_{rp} = pérdida de carga (m.c.a)
- f = coeficiente de pérdida de carga primaria (adimensional), depende de la rugosidad de la tubería y numero de Reynolds.
- L = longitud de la tubería (m)
- D = diámetro de la tubería (m)

- V= velocidad media del fluido (m/seg)
- g= aceleración (9,81 m/s²)

Como indica Mott, en [34] “El coeficiente de fricción de Darcy en tuberías circulares es un valor adimensional, se encuentra en función del número de Reynolds para un flujo laminar, mientras que para un flujo turbulento involucra el número de Reynolds y también la rugosidad del material de la tubería.”

El número de Reynolds como es sabido es un número adimensional, viene dado por el cociente de las fuerzas de inercia y por las fuerzas debidas a la viscosidad. La ecuación 2-4 sirve para el cálculo de número de Reynolds para tuberías circulares en flujo de tubería llena [34].

Ecuación 2-4: Cálculo de número de Reynolds

$$Re = \frac{VDp}{n} = \frac{VD}{\nu} \quad (2.4)$$

Donde:

- Re= número de Reynolds
- D= diámetro interno (m)
- V= velocidad media (m/seg)
- ν = viscosidad cinemática (m² /seg)
- p= densidad del fluido (kg/m³)
- n = viscosidad absoluta (Kg. Seg/m²)

Como señala Mott, en [34] “El número de Reynolds indica si el fluido tiene flujo laminar o turbulento, de esta forma tenemos: si $Re < 2000$ (el flujo es laminar) y si $Re > 4000$ (el flujo es turbulento) y si Re se encuentra entre 2000 y 4000 se dice que el flujo está en una región crítica, cabe indicar que para cálculos se involucra los rangos laminares y turbulentos.”

Tabla 5. Propiedades del agua en función de la temperatura.

Temperatura (°C)	Peso específico γ (kN/m ³)	Densidad ρ (kg/m ³)	Viscosidad dinámica η (Pa·s)	Viscosidad cinemática ν (m ² /s)
0	9.81	1000	1.75×10^{-3}	1.75×10^{-6}
5	9.81	1000	1.52×10^{-3}	1.52×10^{-6}
10	9.81	1000	1.30×10^{-3}	1.30×10^{-6}
15	9.81	1000	1.15×10^{-3}	1.15×10^{-6}
20	9.79	998	1.02×10^{-3}	1.02×10^{-6}
25	9.78	997	8.91×10^{-4}	8.94×10^{-7}
30	9.77	996	8.00×10^{-4}	8.03×10^{-7}
35	9.75	994	7.18×10^{-4}	7.22×10^{-7}
40	9.73	992	6.51×10^{-4}	6.56×10^{-7}
45	9.71	990	5.94×10^{-4}	6.00×10^{-7}
50	9.69	988	5.41×10^{-4}	5.48×10^{-7}
55	9.67	986	4.98×10^{-4}	5.05×10^{-7}
60	9.65	984	4.60×10^{-4}	4.67×10^{-7}
65	9.62	981	4.31×10^{-4}	4.39×10^{-7}
70	9.59	978	4.02×10^{-4}	4.11×10^{-7}
75	9.56	975	3.73×10^{-4}	3.83×10^{-7}
80	9.53	971	3.50×10^{-4}	3.60×10^{-7}
85	9.50	968	3.30×10^{-4}	3.41×10^{-7}
90	9.47	965	3.11×10^{-4}	3.22×10^{-7}
95	9.44	962	2.92×10^{-4}	3.04×10^{-7}
100	9.40	958	2.82×10^{-4}	2.94×10^{-7}

Fuente: Robert Mott (2006, Tabla A.1).

La rugosidad viene dada por dos factores, el primero que depende del material y el segundo del estado de conservación de este, partiendo de este criterio se tiene a la rugosidad relativa como la relación entre la rugosidad absoluta y el diámetro interno de la tubería [35].

Ecuación 2-5: Rugosidad Relativa

$$\text{Rugosidad Relativa} = f\left(Re, \frac{K}{D}\right) \quad (2.5)$$

Donde:

- K= longitud que mide el grado de rugosidad
- D= diámetro de la tubería
- Re= número de Reynolds

Tabla 6. Valores de rugosidad absoluta.

Material de construcción	Rugosidad (k: mm)
<u>Tuberías de plástico</u>	
Polietileno (P.E.).....	0,002
Cloruro de polivinilo (PVC)	0,02
<u>Tuberías metálicas</u>	
Tuberías estiradas, sin soldaduras de latón, cobre, plomo.....	0,0015 - 0,01
Aluminio.....	0,015 - 0,06
<u>Acero estirado sin soldaduras:</u>	
Nuevas.....	0,02 - 0,10
Después de muchos años en servicio.....	1,2 - 1,5
<u>Acero galvanizado:</u>	
Nuevas, buena galvanización.....	0,07 - 0,10
Galvanización ordinaria.....	0,10 - 0,15
<u>Fundición:</u>	
Nuevas.....	0,25 - 1,00
Nuevas con revestimiento bituminoso.....	0,10 - 0,15
Asfaltadas.....	0,12 - 0,30
Después de varios años en servicio.....	1,00 - 4,00
<u>Hormigón y fibrocemento:</u>	
- <u>Hormigón:</u>	
Superficie muy lisa.....	0,3 - 0,8
Condiciones medias.....	2,5
Superficie rugosa.....	3 - 9
Hormigón armado.....	2,5
- <u>Fibrocemento (F.C.):</u>	
Nuevas.....	0,05 - 0,10
Después de varios años en uso.....	0,60

Fuente: Rocha (2007, 94).

Con las fórmulas descrita anteriormente y los datos calculados se puede encontrar el coeficiente de Darcy. Para ello también haremos uso de las tablas 5 y 6 de donde obtenemos dos valores.

Cálculo de coeficiente de Darcy (f):

Datos:

- $V = 1$ m/seg
- $D = 0.0127$ m (diámetro interno)
- $v = 1.15 \times 10^{-6}$ m²/seg (Tabla 5, temperatura media de 15 °C)
- $K = 0.002$ mm (Tabla 6, Tubería considerado como plástico)

$$Re = \frac{1 * 0,0127}{1.15 * 10^{-6}} = 11043,4 = 1,1 * 10^4$$

$$rugosidad\ relativa = \frac{0,002mm}{12,7mm} = 0,00015$$

Para poder continuar con los cálculos es necesario utilizar la ecuación 2-6 de Blasius que como indica Mott, en [34] “Esta ecuación es aplicable para tuberías consideradas lisas y con números de Reynolds entre 3000 y 100000.”

Ecuación 2-6: Blasius

$$f = \frac{0,316}{Re^{0,25}} \quad (2.6)$$

$$f = \frac{0,316}{(1,1 * 10^4)^{0,25}}$$

$$f = 0,0308$$

Perdida de carga en la red principal, al reemplazar en los datos en la ecuación 2-3:

Datos:

- L=1,75m
- D=0,0127m
- $f = 0,0308$

$$H_{rp} = 0,0308 \frac{1,75m}{0,0127m} \frac{(1 \frac{m}{s})^2}{(2 * 9,81 \frac{m}{s^2})}$$

$$H_{rp} = 0,22 \text{ m.c.a}$$

Perdida en línea principal por accesorios utilizados:

Tabla 7. Coeficiente para diferentes accesorios.

Accesorios	L/D	Diámetro nominal (en pulgadas)												
		1/2	3/4	1	1 1/4	1 1/2	2	2 1/2, 3	4	6	8-10	12-16	18-24	
Válv.de compuerta(abierta)	8	0.22	0.2	0.18	0.18	0.15	0.15	0.14	0.14	0.12	0.11	0.1	0.1	
Válv.de globo(abierta)	340	9.2	8.5	7.8	7.5	7.1	6.5	6.1	5.8	5.1	4.8	4.4	4.1	
Válv.de retención horizontal(check)	100	2.7	2.5	2.3	2.2	2.1	1.9	1.8	1.7	1.5	1.4	1.3	1.2	
Válv.de retención horizontal oscilatoria(check)	50	1.4	1.3	1.2	1.1	1.1	1.0	0.9	0.9	0.75	0.7	0.65	0.6	
Válv.de pie de disco(de huso)con colador	420	11.3	10.5	9.7	9.3	8.8	8.0	7.6	7.1	6.3	5.9	5.5	5.0	
Válv.de pie de disco con bisagra	75	2	1.9	1.7	1.7	1.7	1.4	1.4	1.3	1.1	1.1	1.0	0.9	
Codos estándar	90°	30	0.81	0.75	0.69	0.66	0.63	0.57	0.54	0.51	0.45	0.42	0.39	0.36
	45°	16	0.43	0.4	0.37	0.35	0.34	0.3	0.29	0.27	0.24	0.22	0.21	0.19
	90° radio largo	16	0.43	0.4	0.37	0.35	0.34	0.3	0.29	0.27	0.24	0.22	0.21	0.19
	180°	50	1.35	1.25	1.15	1.10	1.05	0.95	0.9	0.85	0.75	0.7	0.65	0.6
Curvas de 90°	20	0.54	0.5	0.46	0.44	0.42	0.38	0.36	0.34	0.3	0.28	0.26	0.24	
T en línea (con derivación en la línea principal y lateral cerrada)	20	0.54	0.5	0.46	0.44	0.42	0.38	0.36	0.34	0.3	0.28	0.26	0.24	
T en línea (con circulación por derivación)	60	1.62	1.5	1.38	1.32	1.26	1.14	1.08	1.02	0.9	0.84	0.78	0.72	

Fuente: Robert Mott (2006, Tabla A.3).

Para la línea principal se utilizó los siguientes accesorios y se obtiene sus valores de la tabla 7:

- Dos codos de 90° roscado de 1/2 pulgada (0,81)
- Una unión roscada de 1/2 pulgada (k=0,004)
- Una curva de 90° en la manguera de 1/2 pulgada(k=0,54)

$$K_t = (2 * 0,81 + 0,004 + 0,54) \tag{2.7}$$

$$K_t = 2,164$$

Ecuación 2-8: Ecuación fundamental de pérdidas de cargas secundarias.

$$H_{rs} = K_t \frac{v^2}{2g} \tag{2.8}$$

$$H_{rsp} = 2,164 \frac{(1 \frac{m}{s})^2}{(2 * 9,81 \frac{m}{s^2})} = 0,11 m. c. a$$

Pérdida total del Sistema:

$$Perdidas Totales = H_{rp} + H_{rsp} + L \tag{2.9}$$

$$Perdidas Totales = 0,22 + 0,11 + 1,75 = 2,08 m. c. a$$

Para la presión de trabajo de la tubería principal, se debe considerar el valor calculado, además se debe tener en cuenta que la manguera al no ser rígida puede taponarse por varios factores, por tal razón se debe aumentar un 10% al valor de pérdidas de sistema.

Al considerar este valor, obtenemos que el valor puede fluctuar de 2,08 a 2,28 m.c.a.

Utilizando una equivalencia de unidades 1 m.c.a =1,422 PSI para calcular la presión de trabajo para el sistema con pérdidas de 2,28 m.c.a que en este caso será de 3,253 PSI.

2.2.2.4. Cálculo de potencia de la bomba

En base a los datos obtenidos calculamos la potencia de la bomba con la ecuación 2-10 de la siguiente manera:

Ecuación 2-10: Potencia de la bomba

$$Pb = \frac{Qb * Hb}{0,76 * N} \quad (2.10)$$

Donde:

- Pb= potencia de la bomba y del motor (HP)
- Qb= caudal de bombeo (lt/seg)
- Hb= altura manométrica total (m)
- N= Eficiencia del sistema de bombeo (n=motor bomba)

$$Pb = \frac{0,5 * 2,28}{76 * 0,75} = 0,02 \text{ HP} = 14,91W \cong 15 \text{ Watts}$$

Al no encontrar una bomba sumergible de 15W en el mercado local se optará por adquirir una de 25W que cumple con todas las especificaciones para generar la circulación de la solución nutritiva y tiene las siguientes especificaciones técnicas:



Figura 2.6. Bomba sumergible seleccionada de 25W.

- Potencia 25W y flujo de 1800LPH.
- Bajo Ruido: No existe una bomba de agua completamente silenciosa, hemos estado trabajando para reducir el ruido, la tecnología aplicada ha hecho que el ruido de la bomba sumergible sea mucho más pequeño que otras marcas.
- Flujo de agua ajustable: La entrada de agua de la bomba de acuario es ajustable, usted puede ajustar el flujo de agua.
- Bajo consumo de energía y alta elevación de cabeza: La máxima altura de la bomba circulación es 3 metro, y con el eje de buena calidad su consumo de energía es muy bajo.

2.2.3. Capacidad del reservorio

De preferencia se requiere obtener un depósito rectangular, debido a que esta geometría provee mayor facilidad para implementar los sensores, el cálculo del reservorio se realiza en base a ciertos factores importantes, el primero es que el canal se va a llenar hasta aproximadamente la mitad de su capacidad para humedecer el sustrato de las plantas que se encuentran en las canastillas:

Datos:

- Diámetro interno de la tubería PVC 4 pulgadas, $D_i = 10,6\text{cm}$
- Largo de la tubería, $L = 175\text{cm}$

Se calcula el área del semicírculo con la ecuación 2-11:

Ecuación 2-11: Área del semicírculo

$$A = \frac{\pi * (\frac{Di}{2})^2}{2} \quad (2.11)$$

$$A = \frac{\pi * (\frac{10,6cm}{2})^2}{2} = 44,12cm^2$$

El volumen que ocupará la solución nutritiva en uno de los canales de cultivo será:

$$Vt = A * L \quad (2.12)$$

$$Vt = 44,12cm^2 * 175cm = 7721cm^3$$

Por lo tanto, para abastecer los dos canales se necesitan:

$$Vc = Vt * 2 = 7721cm^3 * 2 = 15442cm^3 \cong 15,5L \quad (2.13)$$

El segundo factor para tomar en cuenta es el volumen de agua que consume la fresa durante su periodo de desarrollo desde que es trasplantada, que en este caso se tomara como referencia un periodo de 30 días antes de que se deba ajustar la solución nutritiva.

Como indica Rodrigues de Miranda, en [36] “Durante el ciclo de la fresa (274 días), el consumo total de solución nutritiva fue de 101 L/planta y 98 L/planta para los sistemas de canaletas y bolsas de cultivo respectivamente.”, el sistema se asemeja al de bolsa de cultivo por lo tanto el total de litros consumido por cada ejemplar durante su ciclo fue de 98L. Obtenemos el consumo diario de cada planta por día:

$$Cp = \frac{98L}{274 \text{ días}} = 0,357 \frac{L}{\text{día}} \quad (2.14)$$

En otra investigación de la universidad de Arizona, según el Dr. Mike Evans, en [37] “Para evitar una gran fluctuación del contenido de humedad, regamos con frecuencia con una cantidad muy pequeña (33 ml por planta a la vez), en lugar de solo uno o dos grandes eventos de riego por día.” El realizo 8 a 12 de estos eventos de riego por lo que el

volumen de agua requerido por las plantas en su investigación como el señala fue de 200ml a 400ml por plantas por día.

Como podemos ver ambos valores se corresponden, y basando en el sistema de riego programado del Dr. Evans decidimos realizar 5 riegos en el día por lo que el consumo por día sería de 330ml.

$$Vp = 330 \frac{ml}{dia} * 30dias = 9900ml \cong 9.9L \quad (2.15)$$

Para finalizar se debe tomar en cuenta que la bomba no puede quedarse sin solución o podría dañarse, en el inciso anterior se seleccionó la bomba que tiene una altura de 6,5cm y en base a los depósitos rectangulares disponibles en el mercado local vemos que su máxima área es de 55cm x 35cm, en base a esto el volumen necesario para mantener a la bomba siempre sumergida es de:

$$Vb = 60cm * 35cm * 6,5cm = 12512,5cm^3 \cong 12,5L \quad (2.16)$$

Para finalizar sumamos todos los valores obtenidos para saber el volumen mínimo que debe tener el reservorio para su correcto funcionamiento:

$$Vt = Vc + Vp + Vb \quad (2.17)$$

$$Vt = 15,5L + 9,9L + 12,5L = 37,9L$$

2.3. Diseño del sistema hidropónico

En base a todos los volúmenes, medidas y distancias calculadas en el inciso anterior, se diseña un sistema hidropónico cuya construcción no sea de mayor complejidad pero que cumpla con los requerimientos técnicos que se presentan en el análisis QFD. Como se puede visualizar en la figura 2.7 la estructura tiene un alto aproximado de 2m y ocupa un área total de 1.55m x 0.9 m, se basa en madera de pino

principalmente, para los pilares estructurales que sostendrán los canales de cultivo, las plantas y el sistema de iluminación se utilizó vigas de pino de 10cmx4cm.

Se busco realizar un espacio que mantenga a la solución nutritiva protegida de factores externos, donde se implementaran los sensores y bombas que actuaran sobre dicha solución, sobre este espacio se encuentra el panel de control local, para sostener esta parte de la estructura se utilizó vigas de 4cmx4cm. El reservorio adquirido cuenta con una capacidad de 50L, sobre todo se buscó que pueda albergar a los sensores que actuaran sobre la solución nutritiva.

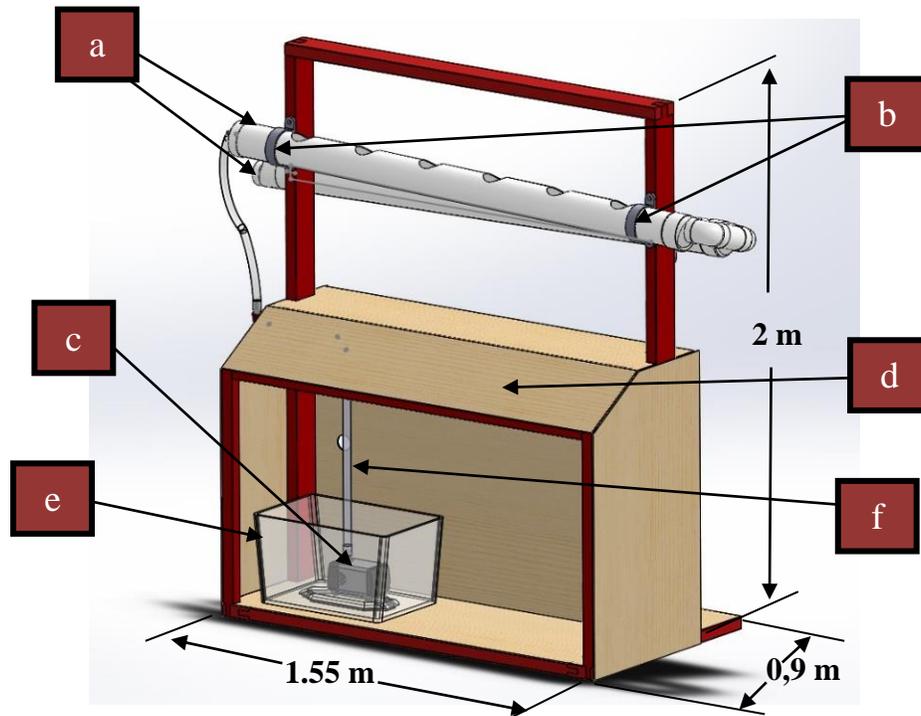


Figura 2.7. Diseño final de la estructura: a) Canales de cultivo, b) Abrazaderas de soporte, c) Bomba sumergible 25W, d) Panel para elementos de control, e) Reservorio con 50L de capacidad, f) Tubería principal [Autor].

2.4. Sistema de iluminación artificial

En este apartado se detalla los componentes eléctricos-electrónicos para el funcionamiento del sistema de iluminación artificial, lo que se busca es que mediante dos sensores uno de ellos de rayos UV y el otro de luminosidad ambiente se mida el nivel de intensidad de luz que las plantas del sistema están recibiendo durante el día. En caso de que por cualquier razón dejen de recibir menos del rango estipulado, se activa una luminaria LED de espectro completo diseñada para plantas en la intensidad que hace falta para no alterar el fotoperiodo.

Para manipular la intensidad de la lámpara existirán dos modos de funcionamiento uno automático y otro manual, todos los datos se presentarán de manera local en un HMI.

La selección del hardware para el sistema de iluminación se realizará mediante el uso de una matriz de priorización, que como indica Betancourt D, en [38] “La matriz de priorización consiste en una serie de criterios ponderados y utilizados para elegir entre un conjunto de opciones por medio de matemáticas simples.”. Donde el análisis se centrará en la medida de su beneficio para el sistema y el costo.

2.4.1. Microcontrolador

Para la selección de la tarjeta de control que se encargara de este sistema se tomaron en cuenta los siguientes criterios:

- Debe tener pines de conexión i2c para recibir la información de los sensores de luz UV y luz ambiente.
- Pines de salida para controlar la intensidad de la luminosidad de la lámpara LED y la pantalla desde donde se visualizarán los datos del sistema, además pines de entrada para la comunicación con los sensores de medición de luz.

- Pines PWM para aplicar un control PID del valor de intensidad de luz.
- Su entorno de programación debe contar con las librerías para la manipulación de los sensores.
- Que los elementos externos puedan ser fácilmente instalados en el controlador y su programación no sea muy compleja.

Arduino Mega:

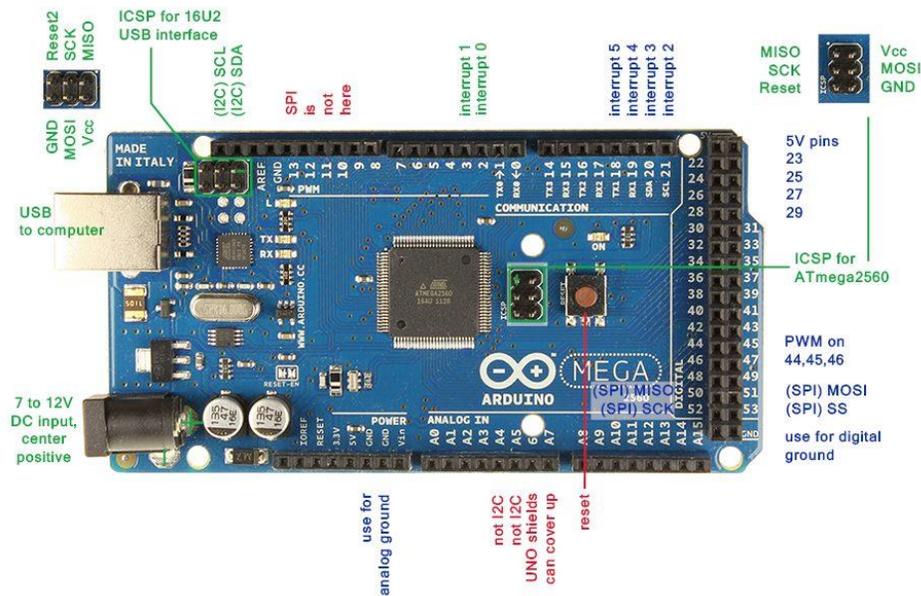


Figura 2.8. Arduino Mega Atmega 2560 [39].

Como se observa en la figura 2.8, esta tarjeta es un módulo que brinda facilidad en la programación de su microcontrolador y que cuenta con gran desarrollo por ser una plataforma de software libre.

Características técnicas:

- Microcontrolador: ATmega2560
- Voltaje Operativo: 5 V
- Voltaje de Entrada: 7 - 12 V
- Pines digitales de Entrada/Salida: 54 (15 con salida PWM)
- Pines analógicos de entrada: 16
- Corriente DC entregada en el Pin de 3.3V: 50 mA
- Memoria Flash: 256 KB

- SRAM: 8KB
- EEPROM: 4KB
- Clock Speed: 16 MHz
- Comunicación i2C

El microcontrolador viene preprogramado con un cargador de arranque (bootloader) que le permite cargar nuevo código en ella sin el uso de un programador de hardware externo. La placa Mega 2560 tiene una serie de facilidades para la comunicación con un ordenador, otra placa, u otros microcontroladores. Ofrece cuatro UART hardware para TTL (5V) para la comunicación serie [39].

ELEGOO MEGA:

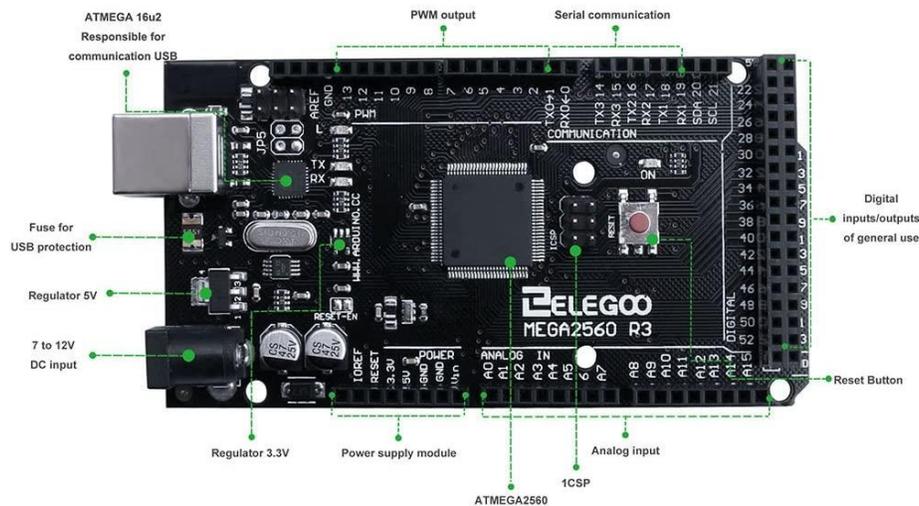


Figura 2.9. Tarjeta de desarrollo ELEGOO MEGA 2560 [40].

Este controlador diseñado por ELEGOO cumple con las mismas características técnicas que la tarjeta Arduino Mega 2560 y tiene un diseño similar como se observa en la figura 2.9, esta tarjeta usa cómo controlador el chip Atmega2560-16au y Atmega16u2 que es el mismo que el oficial de la tarjeta Arduino Mega 2560, además es 100% compatible con la plataforma de desarrollo Arduino IDE [40].

Raspberry Pi:



Figura 2.10. Raspberry Pi 3 B+ [41].

El módulo que se observa en la figura 2.10, es un computador con un tamaño compacto y de bajo costo con un sistema operativo Linux que tiene la habilidad de interactuar con el mundo exterior, se conecta a un monitor y se usa con un ratón y teclado, el lenguaje de programación usado para esta tarjeta es Python [41].

La Raspberry Pi 3 B+ cuenta con un GPIO de 40 pines, el cual permite el contacto con el mundo exterior, tanto por sensores como con actuadores, además cuenta con puertos de comunicación I2C, SPI y UART compatible con labview [41].

Características técnicas:

- CPU + GPU: Broadcom BCM2837B0, Cortex-A53 (ARMv8) 64-bit SoC @ 1.4GHz.
- RAM: 1GB LPDDR2 SDRAM.
- Wi-Fi + Bluetooth: 2.4GHz y 5GHz IEEE 802.11.b/g/n/ac, Bluetooth 4.2, BLE.
- Ethernet: Gigabit Ethernet sobre USB 2.0 (300 Mbps).
- GPIO de 40 pines.
- HDMI.
- 4 puertos USB 2.0
- Puerto CSI para conectar una cámara.
- Puerto DSI para conectar una pantalla táctil
- Salida de audio estéreo y vídeo compuesto

- Micro-SD
- Power-over-Ethernet (PoE)

Matriz de priorización para la selección del microcontrolador

En base a los criterios planteadas, cada una de las opciones presentadas puede obtener una puntuación de 1 a 5 por cada criterio, siendo 1 lo más bajo y 5 lo más alto.

Como resultado obtenemos la siguiente matriz, presentada en la tabla 8:

Tabla 8. Matriz de priorización para la selección del microcontrolador [Autor].

Opciones Criterios		Arduino Mega	ELEGOO Mega	Respberry Pi 3B+
Comunicación I2C	Ptos.	4	4	5
	Peso	15%	15%	15%
	Total	0.6	0.6	0.75
Pines de Entrada y Salida, pines analógicos	Ptos.	5	5	3
	Peso	15%	15%	15%
	Total	0.75	0.75	0.45
Pines PWM	Ptos.	5	5	4
	Peso	10%	10%	10%
	Total	0.5	0.5	0.4
Librerías para sensores	Ptos.	5	5	4
	Peso	25%	25%	25%
	Total	1.25	1.25	1
Precio Economico	Ptos.	3	5	2
	Peso	25%	25%	25%
	Total	0.75	1.25	0.5
Facil manejo y instalación	Ptos.	5	5	4
	Peso	10%	10%	10%
	Total	0.5	0.5	0.4
Total		3.6	4.1	3.05

Como podemos observar en la tabla 8, la tarjeta ELEGOO Mega será seleccionada para el control del sistema de iluminación artificial por obtener el mayor valor de priorización.

2.4.2. Iluminación LED

En este caso para la selección de la iluminación LED se tomó en cuenta el beneficio para las plantas y la capacidad para controlar la intensidad de la lámpara, siendo estos los criterios:

- Iluminación LED de Espectro Completo diseñada especialmente para plantas.
- Utilizable tanto en interiores como exteriores, resistente a la humedad.
- Buena disipación de calor, sin sonido.
- Intensidad de luz variable.
- Precio - Calidad LED.

Wills LED 600W regulable:

Las luces LED Wills que se aprecia en la figura 2.11, están especializadas para cultivo tanto en interior como exterior, ofrecen un reflector impermeable de espectro completo, es utilizada en sistemas hidropónicos [42].

Características técnicas:

- Espectro Completo Sunlike para todas las etapas de crecimiento: consta de luz blanca cálida, blanca fría y roja (3500K, 650K y 660nm).
- Disipador de calor de aluminio, sin ventilador.
- Perilla regulable para rendimiento de crecimiento en cada etapa de la planta.
- Consumo de 100W con 260 LEDs.
- Cobertura máxima de 32.8ft x 29.5 ft
- Controlador IP65 impermeable certificado para una larga vida útil.



Figura 2.11. Wills LED 600W [42].

Briignite LED 96W

Estas luces Briignite, ver figura 2.12 son diseñadas para cultivo en interiores disponen de espectro completo y una función de tiempo de funcionamiento ajustable, tienen un consumo eléctrico económico y cuenta con 4 luminarias móviles [43].

Características técnicas:

- Espectro completo en rangos de 380nm a 800nm, para cada etapa de crecimiento.
- 10 niveles de intensidad de luz.
- Cada iluminaria cuenta con 192LEDs con un consumo de 96W.
- Función de TIMER ajustables de 0 a 24 horas de funcionamiento.
- Seguridad contra fuego y protección contra el agua IP44.



Figura 2.12. Briignite LED 96W [43].

Wills LED 1000W:

En la figura 2.13 se aprecia otra iluminaria de la marca Wills que brinda un espectro completo con, diseñada para invernaderos hidropónicos por lo que incluye un termómetro de humedad ambiente [42].

Características técnicas:

- Espectro completo en rangos de 380nm-780nm, incluyendo UV, IR, rojo, azul y blanco.
- Consumo de 230W de alta eficiencia energética.
- 2 ventiladores integrados y un disipador de calor.
- Cobertura máxima de 3.3ft x 3.3ft.
- 2 switches para regulación de intensidad de luz.
- Kit de gancho colgable con sensor de humedad incorporado.



Figura 2.13. Wills LED 1000W [44].

Matriz de priorización para la selección de iluminación LED

Como se describió anteriormente, cada una de las opciones presentadas puede obtener una puntuación de 1 a 5:

Tabla 9. Matriz de priorización para la selección de iluminaria LED [Autor].

Opciones Criterios		Wills LED 600W	Brignite LED 96W	Wills LED 1000W
Espectro Completo	Ptos.	5	4	5
	Peso	25%	25%	25%
	Total	1.25	1	1.25
Resistencia Humedad	Ptos.	5	4	3
	Peso	15%	15%	15%
	Total	0.75	0.6	0.45
Disipación de Calor	Ptos.	5	3	5
	Peso	10%	10%	10%
	Total	0.5	0.3	0.5
Intensidad de Luz Variable	Ptos.	5	5	3
	Peso	25%	25%	25%
	Total	1.25	1.25	0.75
Precio-Calidad LED	Ptos.	4	5	3
	Peso	25%	25%	25%
	Total	1	1.25	0.75
Total		4	3.8	3.25

2.4.3. Sensores de luz

Debido a que hay muchos sensores de este tipo disponibles en el mercado con características similares entre sí y su precio no tiene diferencias significativas, la elección se la realizó a criterio personal, por lo que los dos sensores escogidos fueron:

CQ Robot TSL25911FN:

Es sensor de luz ambiental que se observa en la figura 2.14, es compatible con Raspberry Pi, Arduino y STM32, cuenta con un amplio rango dinámico detectando intensidades de luz hasta 88000 lux, su control es a través de interfaz I2C [44].

Características técnicas:

- TSL25911FN es un convertidor de luz a digital de muy alta sensibilidad que transforma la intensidad de la luz en una salida de señal digital capaz de interfaz I2C directa.
- El dispositivo combina un fotodiodo de banda ancha (visible más infrarrojos) y un fotodiodo de respuesta infrarroja en un único circuito integrado CMOS.
- Dos ADC integrados convierten las corrientes de fotodiodo en una salida digital que representa la irradiación medida en cada canal.
- Alta sensibilidad de hasta 188uLux, amplio rango dinámico de hasta 1,968.5 ft: 1.



Figura 2.14. Sensor seleccionado CQRobot de luminosidad ambiente [44].

Comimark UVM-30A

Como se puede observar en la figura 2.15, el Comimark es un sensor de rayos UV compatible con Arduino de alta precisión [45].

Características técnicas:

- Voltaje de funcionamiento: CC 3 – 5 V. Voltaje de salida: CC 0 – 1 V.
- Precisión de la prueba: ± 1 UV INDEX.
- Corriente: 0,06 mA (tipo), 0,1 mA (máximo).
- Longitud de onda de respuesta: 200 nm-370 nm.
- Temperatura de trabajo: -4.0 °F ~ 185.0 °F.
- Detecta la longitud de onda UV: 200-370 nm.

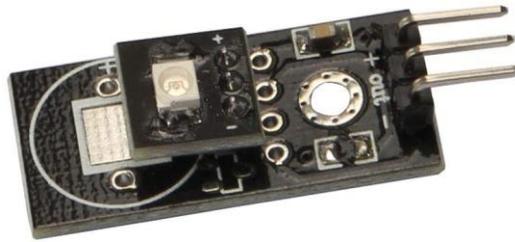


Figura 2.15. Comimark sensor de rayos UV [45].

2.4.4. Pantalla para la interfaz humano-maquina

Para la selección de la pantalla que hará de HMI del sistema de iluminación, principalmente se buscó que sea una pantalla táctil y que pueda conectarse con el microcontrolador seleccionado y otros criterios como:

- Pantalla táctil.
- Amplio rango de colores.
- Capacidad de edición de fondos para generar el HMI.
- Librerías compatibles con el software Arduino IDE.
- Fácil conexión con el microcontrolador.

3,5” LCD TFT shield:

Es una pantalla LCD TFT de 3,5 inch como se ilustra en la figura 2.16 que cuenta con un panel táctil capacitivo, además tiene la opción de usar el panel táctil o no usarla dependiendo de la aplicación [46].

Características Técnicas:

- Pantalla LCD TFT de 3,5" 480x320, pantalla de imagen de alta calidad y amplio ángulo de visión.
- Equipado con espacio de tarjeta SD y circuito SPI FLASH.
- Proporcione 12 ejemplos para Arduino y 3 ejemplos de STM32.
- Aplicable para Arduino UNO y MEGA 2560 microcontrolador de desarrollo.
- Compatible con UTFT / UTFT_Buttons / Utouch Library.



Figura 2.16. 3,5-inch LCD TFT shield [46].

Nextion 3,5" UART TFT:

Es una pantalla fácil de usar, para su edición cuenta con el software Nextion Editor, donde se puede crear fácilmente interfaces de usuario intuitivas sin tener mayor conocimiento en esta área, se pueden agregar fondo estáticos y botones de manera muy sencilla [47].

Características técnicas:

- Pantalla LCD TFT de 3,5" 480x320, pantalla de imagen de alta calidad y amplio ángulo de visión.

- Nextion funciona con cualquier placa que tenga capacidades de serie como Arduino, Raspberry Pi, ESP8266, ESP32, etc.
- Tiene un microcontrolador ARM incorporado que controla la pantalla, por ejemplo, se encarga de generar botones, crear texto, almacenar imágenes o cambiar de fondo.
- Equipado con espacio de tarjeta SD.



Figura 2.17. Nextion 3,5-inch LCD TFT UART [47].

Matriz de priorización para la selección de Pantalla HMI.

Cada una de las opciones presentadas puede obtener una puntuación de 1 a 5, expuesta en la tabla 10:

Tabla 10. Resultado matriz de priorización Pantalla HMI [Autor].

Opciones Criterios		3,5" LCD TFT Shield	Nextion 3,5" UART TFT
	Panel Táctil	Ptos.	5
Peso		25%	25%
Total		1.25	1.25
Rango de Colores	Ptos.	5	5
	Peso	15%	15%
	Total	0.75	0.75
Edición HMI	Ptos.	5	4
	Peso	25%	25%
	Total	1.25	1
Compatible con Arduino.	Ptos.	5	5
	Peso	25%	25%
	Total	1.25	1.25
Fácil Conexión	Ptos.	5	4
	Peso	10%	10%
	Total	0.5	0.4
Total		4.25	3.9

2.4.5. Relevador de potencia

Módulo formado por 1 relé (1 canal) especial para prototipado rápido con Arduino u otros controladores, representado en la figura 2.18. Muy fácil de conectar y programar, sin necesidad de librerías específicas de control, sólo necesita el voltaje de salida de un pin (TTL- 5 V) de una placa Arduino o similar para controlar su funcionamiento [48].

Características técnicas:

- Canales: 1 canal
- Alimentación y Control: 5VDC
- Corriente de activación 20mA por canal
- Tensión máxima en AC: 250V/10A por canal
- Tensión máxima en DC: 30V/10A por canal
- LEDs indicadores (1 por canal)

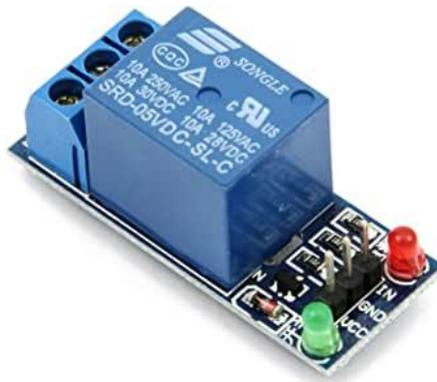


Figura 2.18. Modulo relé 5v Arduino [48].

2.4.6. Reloj de tiempo real (RTC)

El módulo RTC (Real Time Clock) o “Reloj de tiempo real” básicamente se compone de un circuito integrado que es alimentado por una batería, la función principal de este elemento electrónico es registrar la fecha, día de la semana y hora al igual que un reloj convencional [49].

El módulo RTC (DS1302) de la figura 2.19, utiliza una comunicación en serie síncrona y requiere de tres cables para comunicarse con el reloj CLK, I/O, RST [49]. opera con un voltaje que va desde 2.0V a 5.5V de igual forma cuenta con un socket para insertar una batería de 3V.



Figura 2.19. Módulo RTC DS1302 [49].

2.5. Descripción general del sistema

En el inicio de este inciso se dieron algunas generalidades sobre los parámetros para el funcionamiento del sistema de iluminación artificial, adentrándonos más a fondo podemos representar a este sistema mediante un diagrama de bloques, mismo que se aprecia en la figura 2.20 y su descripción es la siguiente:

- Adquisición de la información:

Permite obtener los datos del panel táctil por medio de la interfaz HMI. Además, se reciben los valores de ambos sensores, estos valores son importantes para la activación y ajuste automático de la iluminación LED. Para Finalizar se adquiere los datos de hora y fecha del módulo reloj (RTC) para saber cuál es la hora del día y en base a eso calcular el

fotoperiodo que debe recibir la planta al día, este dato es importante para saber hasta qué hora se podrá activar automáticamente la iluminación LED en el modo automático.

- Acondicionamiento de la información:

Toda la información que ingresa al microcontrolador es analizada y en base al código implementado se producen dos salidas, la primera de encendido o apagado de la iluminación LED mediante el uso del módulo relé y la segunda es la activación del motor a pasos que estará anclado a la perilla de intensidad de la iluminación LED, este motor a pasos se ajustará al valor de intensidad que se necesite en base a los datos captados por los sensores.

- Presentación de la información:

Como parte final del diagrama toda la información será presentada en la pantalla Nextion 3,5” LCD TFT.

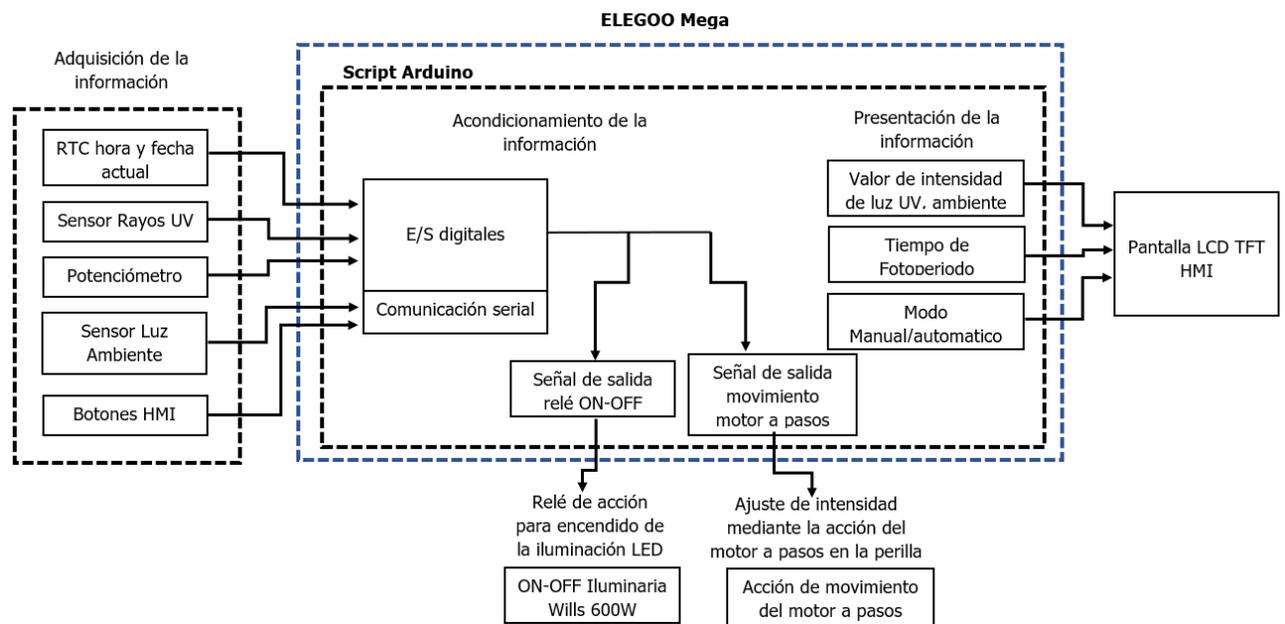


Figura 2.20. Diagrama de bloques del sistema de iluminación artificial [Autor].

2.6. Programación

El algoritmo de programación principalmente es dirigido por los datos enviados desde la interfaz del HMI y el valor de los sensores de intensidad de luz, para ello utiliza la comunicación serial I2C que sirve como un vínculo entre el Arduino Mega y los microcontroladores tanto de la pantalla, el sensor de luz ambiente y el módulo RTC.

La Figura 2.21 muestra el diagrama de flujo del algoritmo implementado al seguir los pasos que realiza el Arduino Mega para realizar el control de la intensidad de luz de la iluminación artificial por medio de un motor a pasos que está anclado a la perilla de la lampara Wills LED 600W, realizando el cálculo de intensidad de luz que debe proveer en base a los valores de intensidad presentes en el ambiente y el tiempo de fotoperiodo que se debe suministrar a las plantas. Además, considera las acciones ingresadas por el usuario en el HMI.

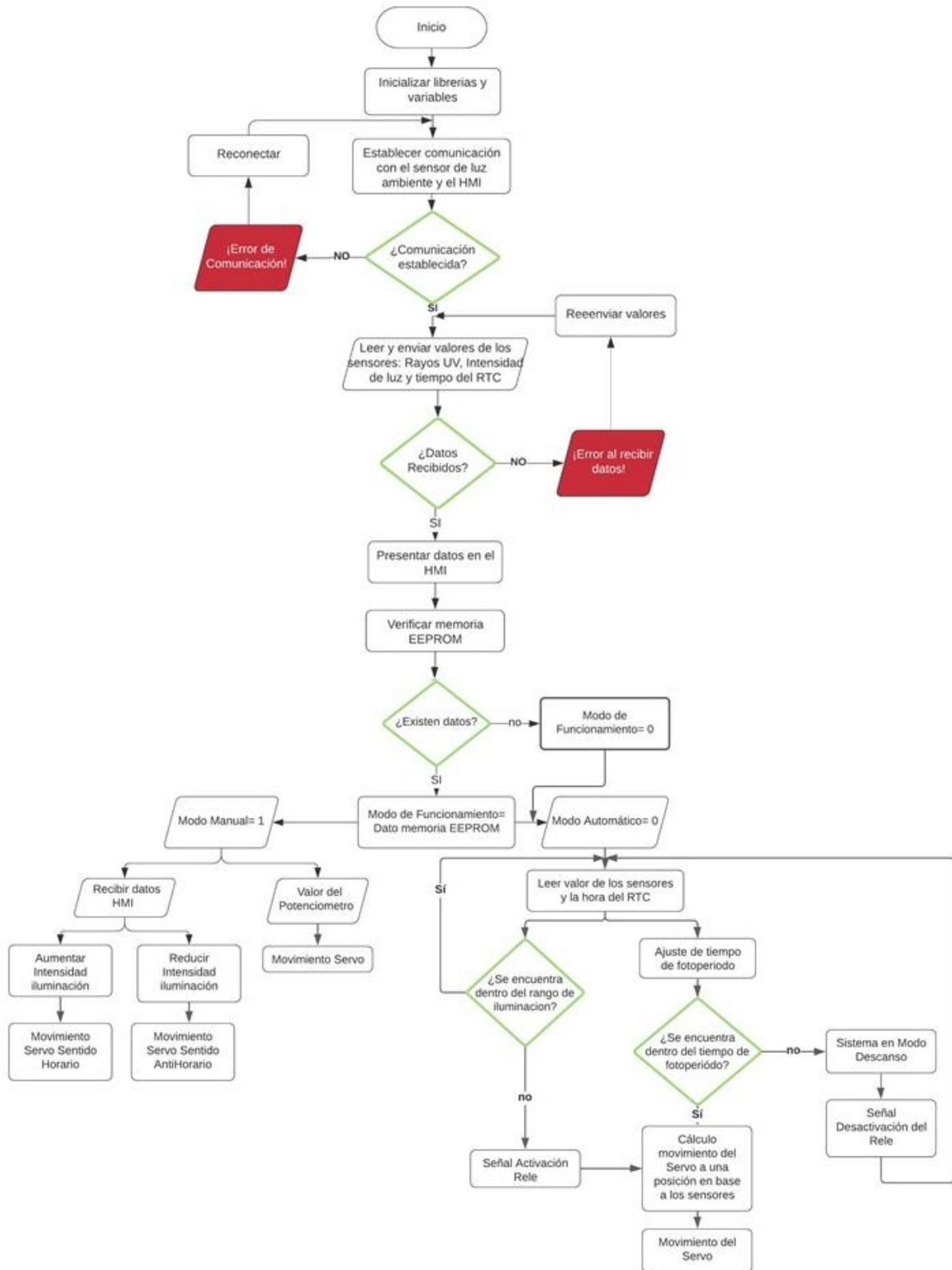


Figura 2.21. Diagrama de flujo sistema de iluminación [Autor].

2.7. Esquema de conexiones

Para la implementación del sistema nos basaremos en el esquema de conexiones del microcontrolador con sus respectivos elementos, se utilizó el software Fritzing para el diseño de las conexiones en una protoboard como se puede visualizar en la figura 2.22 de todo el sistema en base a los pines que se están utilizando en la programación, con el objetivo de realizar pruebas de funcionamiento:

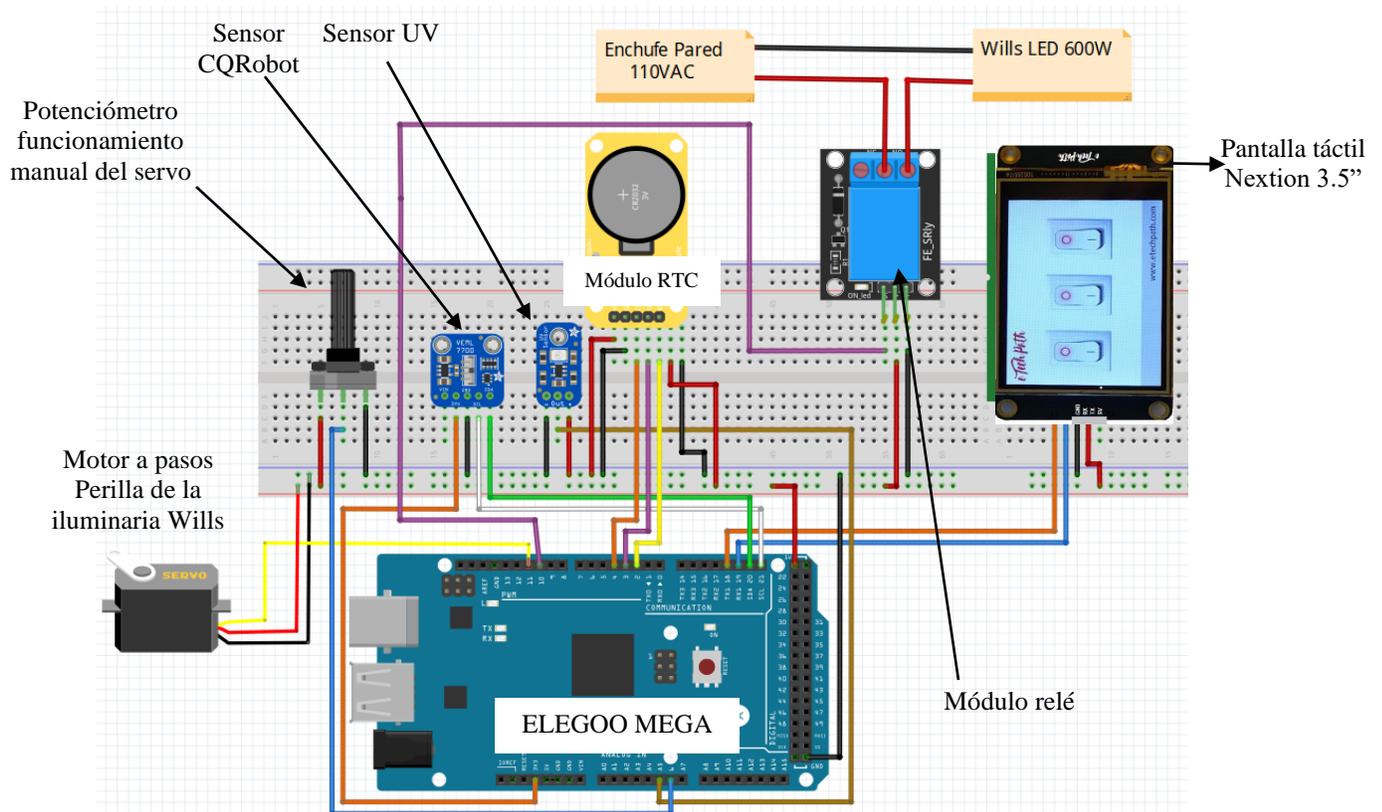


Figura 2.22. Esquema de conexiones del sistema de iluminación [Autor].

2.8. Diagrama eléctrico-electrónico

Para complementar el inciso anterior, se expone el esquema de conexiones eléctricas y electrónicas de los elementos que componen el sistema de iluminación artificial, como se aprecia en la figura 2.23.

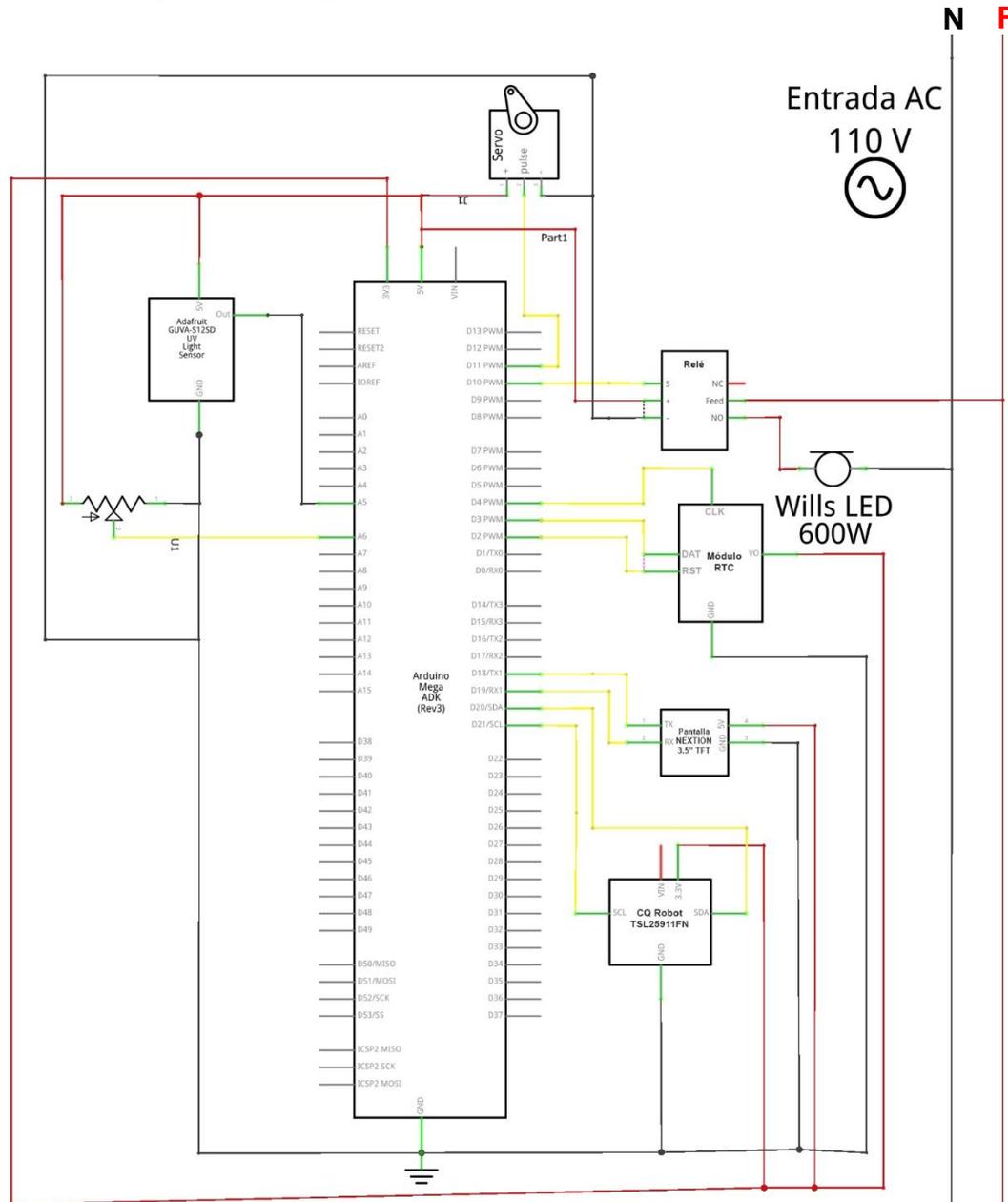


Figura 2.23. Esquema de conexiones eléctrico-electrónicas del sistema [Autor].

2.9. Interfaz HMI

El HMI debe estar provisto de gráficos del funcionamiento animados para que la interfaz sea más intuitiva para el usuario, para el proyecto lo primordial es que mediante esta interfaz se pueda controlar el sistema de iluminación artificial, la programación está relacionada con controlar los diversos elementos conectados al microcontrolador mediante el panel táctil.

La programación y el diseño de este sistema se realiza mediante el software Nextion Editor propio de la pantalla que se selecciona en el inciso 2.4.4, lo importante es indicar los valores de la intensidad de luz presente en el ambiente que llega hacia las plantas de fresa y es obtenida por los sensores, así como la intensidad de la luminaria LED que compensa la falta de iluminación del sol, en conjunto se implementa el modo en el que trabajara el sistema ya sea manual o automático. En base a estos parámetros se generan las siguientes pantallas:

2.9.1. Pantalla Principal

Esta pantalla brinda casi toda la información general del sistema de iluminación, además de poseer botones, indicadores de valor y indicadores animados con barras de progreso que se encuentran distribuidos de manera uniforme. Las acciones que puede realizar el usuario, así como la relación entre indicador de valor y los sensores se encuentran en el manual de usuario, ver Anexo 3.

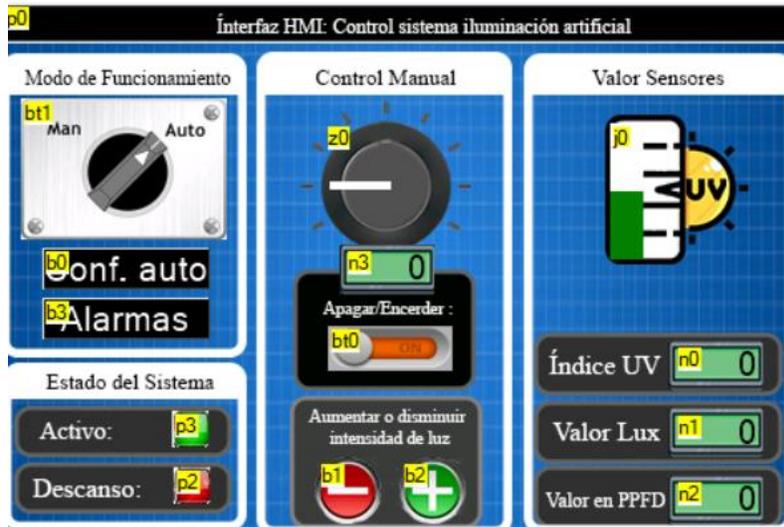


Figura 2.24. Diseño de la pantalla principal del HMI [Autor].

2.9.2. Pantalla secundaria - Configuración modo automático

En esta pantalla principalmente se configura el modo de funcionamiento automático, contando principalmente con la intensidad de luz que se debe proveer dependiendo de en qué etapa del cultivo se encuentre la planta, además de poder configurar el tiempo del fotoperíodo de la planta, ver Anexo 3.

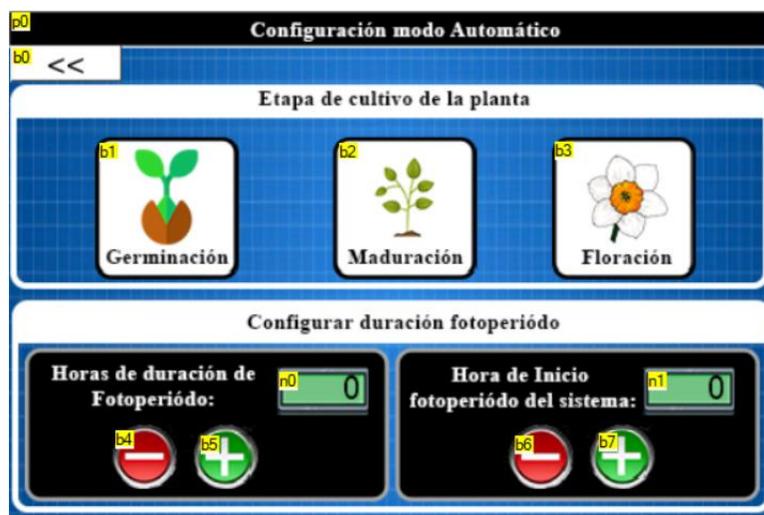


Figura 2.25. Diseño de la pantalla secundaria: Configuración modo automático [Autor].

2.9.3. Pantalla secundaria - Alarmas del sistema

En esta pantalla se pueden visualizar las alarmas de los fallos que pueden tener los sensores que componen el sistema de iluminación artificial o los fallos en la comunicación entre la interfaz y la tarjeta de desarrollo, ver Anexo 3.



Figura 2.25. Diseño de la pantalla secundaria: Alarmas del sistema [Autor].

Capítulo 3

3. Implementación y pruebas

En el presente capítulo, se demuestra el funcionamiento del proyecto mediante la implementación del módulo de cultivo hidropónico NFT diseñado, a su vez realizar el análisis de la respuesta del cultivo en sus diferentes etapas en conjunto con el sistema de iluminación artificial y el análisis de la respuesta del cultivo al inducir el fotoperiodo.

Al obtener el diseño final en base a los cálculos se realizó la construcción de este como se observa en la figura 3.1, acción que permitió realizar pruebas de su funcionamiento al emplear un cultivo de fresas hidropónicas y a la par realizar un análisis del funcionamiento que tiene el sistema de iluminación artificial.



Figura 3.1. Módulo de cultivo hidropónico NFT [Autor].

3.1. Invernadero para el sistema hidropónico

Para salvaguardar la integridad del módulo y de las fresas que se cultivan en él de las condiciones climáticas del medio, fue imperativa la construcción de un invernadero simple que cubra al módulo como se muestra en la figura 3.2, su estructura está hecha en madera y recubierta por plástico diseñado para invernaderos, además cuenta con el espacio suficiente para ingresar y observar el desarrollo de los especímenes.



Figura 3.2. Invernadero para el módulo hidropónico [Autor].

3.2. Implementación del sistema de iluminación

Una vez que se tiene el módulo terminado, se procede a instalar el sistema de iluminación artificial en la parte superior de la estructura como se observa en la figura 3.3, cuyo principal elemento es la luminaria LED Wills misma que colgara del soporte superior a 25 cm de separación de los canales de cultivo con la ayuda de ganchos de acero, contando con un área efectiva de iluminación como indica el fabricante, ver anexo 5.



Figura 3.3. Luminaria Led Wills instalada en el módulo hidropónico [Autor].

En la perilla de la luminaria LED Wills como se observa en la figura 3.4 se coloca el motor a pasos con ayuda de una placa de aluminio que mantendrá firme al motor, permitiendo que este solo actúe sobre la perilla ajustando la intensidad de la iluminación artificial.



Figura 3.4. Motor a pasos colocado en la perilla de la luminaria Wills [Autor].

Por su parte los sensores tanto el de luminosidad ambiente como el sensor de radiación UV se encontrarán en una caja de acrílico sellada herméticamente como se visualiza en la figura 3.5 que se ubicara por fuera del invernadero que cubre al sistema hidropónico asegurando la integridad de los sensores, a la vez de obtener una mejor medición de la intensidad de luz.

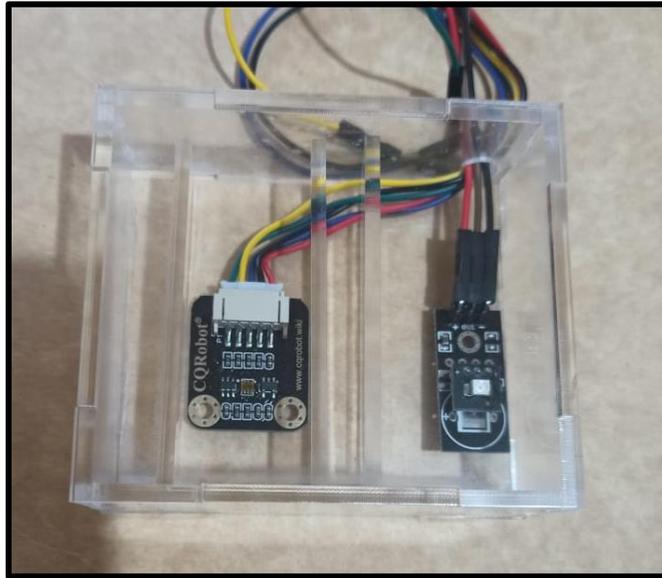


Figura 3.5. Caja de acrílico para sensores [Autor].

Para finalizar el control local mediante la interfaz HMI y el potenciómetro se encuentra en el panel del módulo hidropónico diseñado para estos componentes como se puede apreciar en la figura 3.6, en este mismo espacio se incluirá el microcontrolador para proporcionar el control de todo el sistema.



Figura 3.6. Panel de control local en el módulo hidropónico [Autor].

3.3. Pruebas de funcionamiento del sistema de iluminación

Con el sistema de iluminación instalado en el módulo hidropónico, se procedió a realizar en primera instancia pruebas para la calibración de los sensores para posteriormente validar el funcionamiento del sistema.

Al hablar de luz y plantas lo importantes es la cantidad de fotones que se va a suministrar buscando siempre que el espécimen se encuentre en las condiciones energéticas óptimas, es por ello que al proveer luz de forma artificial debemos tener cuidado en la manera en la que se realiza este proceso pues como indica Photosystem, en [50] “Si una planta recibe más cantidad de fotones de los que necesita, esa energía extra tendrá que ser disipada a través de diferentes mecanismos que infligen daños en sus tejidos, provocando una situación de estrés en la planta. Si ésta recibe menos fotones de su cantidad óptima, ésta no desarrollará el máximo de sus posibilidades.”

Otro concepto importante por definir es el PPF (Densidad de Flujo de Fotones Fotosintéticos) es la unidad de medida de la luz para las plantas y que se expresa como micro mol de fotones en un segundo por metro cuadrado o $\mu\text{moles s}^{-1} \text{m}^{-2}$ [50].

3.3.1. Medición de la luminosidad ambiente

En este apartado se puso a prueba el funcionamiento del sensor de luminosidad ambiente CQ Robot TSL25911FN y su calibración para el sistema de iluminación artificial, cabe recalcar que la calibración del sensor es de forma digital como recomienda el fabricante y se realiza en base al medio en el que va a tomar mediciones, ver anexo 4.

Debido a que la medición que se obtiene de este elemento será utilizada para el cálculo de la intensidad de luz a la que se debe ajustar la luminaria LED es de suma importancia tomar valores de manera asertiva. Para obtener los rangos de luz aceptables para el cultivo, se tomaron medidas cada hora durante el lapso de 7 días desde las 6:00 am hasta las 6:00 pm debido a que el espécimen cultivado es de día largo es decir que su fotoperiodo es de 12 horas, teniendo como resultado la tabla 11.

Tabla 11. Valores de muestra medidos con el sensor de luminosidad ambiente [Autor].

Días Hora de muestra	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7
	(Soleado)	(Nublado)	(Lluvioso)	(Nublado)	(Soleado)	(Lluvioso)	(Lluvioso)
	Valor medido (lux)						
6:00am	10080	2580	56	3402	8752	70	45
7:00am	20890	9084	102	793	32873	35	181
8:00am	15321	24560	151	7043	47824	762	253
9:00am	61090	15832	421	10076	58632	321	502
10:00am	50452	1794	267	2364	78762	462	1072
11:00am	43073	23754	1032	67053	80621	2083	924
12:00am	72784	30709	3070	72687	75687	1652	2035
1:00pm	70048	10048	2040	8942	82345	4002	1972
2:00pm	60400	5372	891	11783	63582	1874	3052
3:00pm	38390	7036	502	8762	56432	3764	1896
4:00pm	54890	5884	302	2863	20732	680	3721
5:00pm	30790	1403	263	5421	40763	872	5238
6:00pm	30768	890	64	1834	18472	652	4721
Valor máximo	72784	30709	3070	72687	82345	4002	5238
Valor mínimo	10080	890	56	793	8752	35	45

De las muestras tomadas obtenemos que los valores máximos y mínimos de intensidad de luz se distribuyen de la siguiente forma:

- **Día soleado:**

Valor máximo: 82345 lux

Valor mínimo: 8752 lux

- **Día nublado:**

Valor máximo: 72687 lux

Valor mínimo: 793 lux

- **Día lluvioso:**

Valor máximo: 5238 lux

Valor mínimo: 35 lux

Con estos valores podemos definir un rango aceptable de intensidad de luz para intentar conservar el fotoperiodo de la planta, donde todos los valores por debajo de este rango harán que el sistema de iluminación artificial entre en funcionamiento dependiendo del estado de desarrollo de la planta. Es así como obtenemos:

- **Enraizamiento y plántulas:**

Como nos indica Zheng J, en [14] “Mayor intensidad de luz en el rango de 90 a 270 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ aumentó la conductancia estomática de las hojas recién formadas de las plantas enraizadas, mejorando así la tasa fotosintética neta y el crecimiento de las plantas enraizadas en la etapa de plántula.” se selecciona que el mínimo valor para el rango será de 270 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

- **Maduración:**

En base al artículo científico “Variety Comparison of Effect of Supplemental Lighting with LED on Growth and Yield in Forcing Culture of Strawberry” donde imponen un fotoperiodo de 12 horas como en nuestro caso y se prueban distintos valores de PPFD a plantas en estado de maduración, es así que como señala Hidaka, en [51] “A alturas normales de hojas 10, 20 y 30 cm: el PPFD era 400, 690 y 1200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, respectivamente. En consecuencia, se podría suponer que bajo iluminación suplementaria LED, la fotosíntesis de las hojas estaba cerca del punto de saturación de luz, alrededor de

400 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.” Tomamos el valor de 400 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ como el mínimo valor para el rango en esta etapa de crecimiento.

- **Floración:**

A partir de los valores obtenidos por Yoshida, en [52] “La luz fue proporcionada por tres paneles LED azules (longitud de onda máxima de 405, 450 y 470 nm; CCS, Inc., Japón) o tres paneles LED rojos (longitud de onda máxima de 630, 660 y 685 nm; CCS, Inc., Japón). Las medidas se realizaron a diferentes niveles de FP, a 25 ° C, y el CO₂ concentración se mantuvo a 500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ” donde determina que una tasa neta recomendada para la etapa de floración debe contar con longitudes de onda cercanas al rojo intenso y el PPFD debe tener como máximo valor 500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Una vez tenemos estos valores de PPFD los transformamos en lux con el factor conversión de la luz del sol de la tabla 12.

Tabla 12. Factores de conversión de PPFD a Lux en distintos casos.

PPFD ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) a Lux

Fuente de Luz	Factor de conversión
Luz de sol	54
Lámparas fluorescentes blancas frías	74
Lámparas de sodio de alta presión Mogui Base	82
Sodio de alta presión de doble extremo (DEHPS): ePapillion 1000 W	77
Halogenuros metálicos	71
Halogenuro metálico cerámico (CMH942): temperatura de color estándar de 4200 K	65
Haluro metálico cerámico (CMH930-Agro): temperatura de color de 3100K, espectro cambiado a longitudes de onda rojas.	59
Multiplica el PPFD por el factor de conversión para obtener Lux. Por ejemplo, la luz solar total es 2000 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ o 108000 Lux (2000*54)	

$$x = 270\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1} * 54 = 14580 \text{ Lux}$$

$$x = 400\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1} * 54 = 21600 \text{ Lux}$$

$$x = 500\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1} * 54 = 27000 \text{ Lux}$$

Así obtenemos la tabla 13 con los valores de intensidad de luz para cada etapa de desarrollo de la planta:

Tabla 13. Máximos de luminosidad ambiente [Autor].

Etapas de desarrollo	Max Lux	Max PPFD
Enraizamiento y plántulas	14580	270
Maduración	21600	400
Floración	27000	500

3.3.2. Medición de rayos UV

Al igual que en el inciso anterior en este apartado se pone a prueba el sensor de rayos UV, cabe recalcar que este sensor ya viene calibrado, los rangos con los que trabaja son los estándares mundiales o el índice UV solar mundial determinado por organización como la ONU. [53]

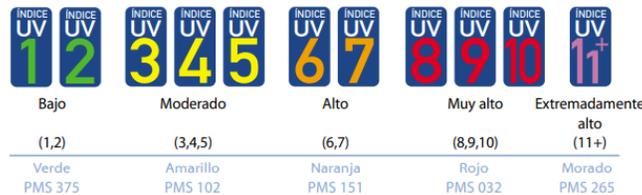


Figura 3.7. Código internacional de colores del índice UV [53].

El índice UV tiene un intervalo de longitudes de onda de 100 a 470 nm, dividiéndose de tres formas:

- UVA 316-470 nm

- UVB 280-315 nm
- UVC 100-280 nm

De esta manera cuando el sensor mida cero en la escala de índice UV 0 corresponderá a un valor menor o igual a 100nm y cuando marque 11 corresponderá a 470nm.

Este sensor nos será útil para conocer la cantidad de radiación UV presente en la longitud de onda que le llega al sistema en determinada hora del día, pues a pesar de ser un día nublado puede haber una alta concentración de rayos UV por lo que encender la luminaria LED a su máximo valor para esa etapa no tendría mayor aporte energético y podría en todo caso ser perjudicial para las plantas.

Se obtiene la tabla 14, al tomar las muestras en los mismos intervalos que en el inciso anterior.

Tabla 14. Valores de índice UV medidos con el sensor [Autor].

Días Hora de muestra	Día 1 (Soleado)	Día 2 (Nublado)	Día 3 (Lluvioso)	Día 4 (Nublado)	Día 5 (Soleado)	Día 6 (Lluvioso)	Día 7 (Lluvioso)
	Valor medido (Índice UV)						
6:00am	5	4	2	3	4	0	1
7:00am	7	5	0	5	6	3	3
8:00am	7	4	3	2	8	2	2
9:00am	9	6	1	6	8	5	6
10:00am	8	8	0	8	10	0	5
11:00am	9	7	6	9	5	0	7
12:00am	10	9	5	5	11	3	4
1:00pm	8	8	7	8	10	4	2
2:00pm	10	5	4	5	8	2	0
3:00pm	8	10	5	6	9	1	0
4:00pm	6	6	2	4	6	0	3
5:00pm	7	3	0	5	7	3	2
6:00pm	5	2	1	3	5	1	4
Valor máximo	10	10	7	9	11	5	7
Valor mínimo	5	2	0	2	4	0	0

Donde obtenemos los siguientes resultados:

- **Día soleado:**

Valor máximo: 11

Valor mínimo: 4

- **Día nublado:**

Valor máximo: 10

Valor mínimo: 2

- **Día lluvioso:**

Valor máximo: 7

Valor mínimo: 0

En la etapa de la germinación que viene de la mano con el enraizamiento hasta conseguir las plántulas como vimos en la teoría se debe tener una longitud de onda de 300nm o lo mismo que 6 en índice UV se usa para potenciar este proceso, para las dos etapas faltantes la radiación UV no aporta mucho al desarrollo de la planta pero sí que influye y no debe sobrepasarse pues las hojas de la planta así como sus flores podrían quemarse, es por esto valor aceptable de radiación UV como indica Yoshida, en [51] “Las plantas se cultivaron bajo iluminación continua utilizando tres tipos de LED azules y rojos. (longitud de onda máxima de luz azul: 360, 450 y 470 nm; longitud de onda máxima de luz roja: 630, 660 y 685 nm)” es de 360 nm o lo mismo que 7.5 en la escala de índice UV.

3.3.3. Medición de las dos variables de forma simultanea

Una vez se calculó los valores mínimos para que el sistema se active, se procede a realizar una medición con las dos variables, donde el resultado de esta medición

simultanea actuara directamente en el software con la función de determinar a qué valor de intensidad de luz se debe ajustar la iluminaria LED automáticamente.

Con los valores obtenido en los apartados 3.2.1 y 3.2.2 podemos definir un rango aceptable de intensidad de luz para intentar conservar el fotoperiodo de la planta, donde todos los valores por debajo de este rango harán que el sistema de iluminación artificial entre en funcionamiento.

Principalmente la activación del sistema se dará durante los días lluviosos en mayor intensidad y en los días nublados en menor intensidad, en los días soleados a no ser que se presente un evento nublado o de lluvia el sistema no actuará.

De esta manera se obtiene la tabla 15, que cuenta con los rangos y la intensidad que la iluminaria LED entregara en cada uno de estos en base a los valores especificados por el fabricante, ver anexo 5:

Tabla 15. Parámetros para el ajuste del sistema de iluminación artificial [Autor].

Etapas de desarrollo	Lux & UV	Potencia de la luminaria LED
Enraizamiento y plántulas	<14580 & >6	25%
	>14580 & >6	0%
	<14580 & <6	60%
Maduración	<21600 & >7.5	34%
	>21600 & >7.5	0%
	<21600 & <7.5	52%
Floración	<27000 & >7.5	38%
	>27000 & >7.5	0%
	<27000 & <7.5	75%

3.4. Análisis de la respuesta de un cultivo de fresas en el módulo hidropónico proporcionando la iluminación

Para comprobar el funcionamiento tanto del sistema hidropónico implementado como del sistema de iluminación se realizó el experimento de cultivar fresas hidropónicas, el cual consistió en cultivar 12 fresas hidropónicas de la variedad Monterrey por su disponibilidad en el mercado y por conocer el fotoperiodo pues se comporta como una planta de día largo.

Este procedimiento se realizó por etapas para validar la teoría con la práctica, cada etapa se explica a continuación:

3.4.1. Etapa 1 - Germinación

Se procedió a sembrar en un mini invernadero como el de la figura 3.8 que cuenta con doce espacios rellenos de peatmoss con perlita alrededor de 25 semillas de fresa, se les proporciono agua-lluvia, este fue el ambiente donde se cultivaron los especímenes hasta que alcanzaron el estado de plántula a las 4 semanas y luego se las trasplanto al sistema hidropónico.



Figura 3.8. Mini invernadero con primeros brotes de las semillas [Autor].

Se les provee luz artificial mediante la luminaria LED a una altura de 25cm para hacer que este proceso sea más efectivo, a la vez se probó los diversos tipos de configuraciones del sistema de iluminación artificial en este caso el modo de germinación.



Figura 3.9. Mini invernadero para obtención de plántulas con iluminación artificial

[Autor].

Donde se obtuvo la gráfica de la figura 3.10 de las horas de iluminación complementaria, donde el sistema estuvo en funcionamiento alrededor de 142 horas, lo que representa el 42.3% de iluminación suplementaria para completar el fotoperiodo de las plántulas de fresa.

Horas de funcionamiento Sistema de iluminación artificial durante el periodo de 28 días

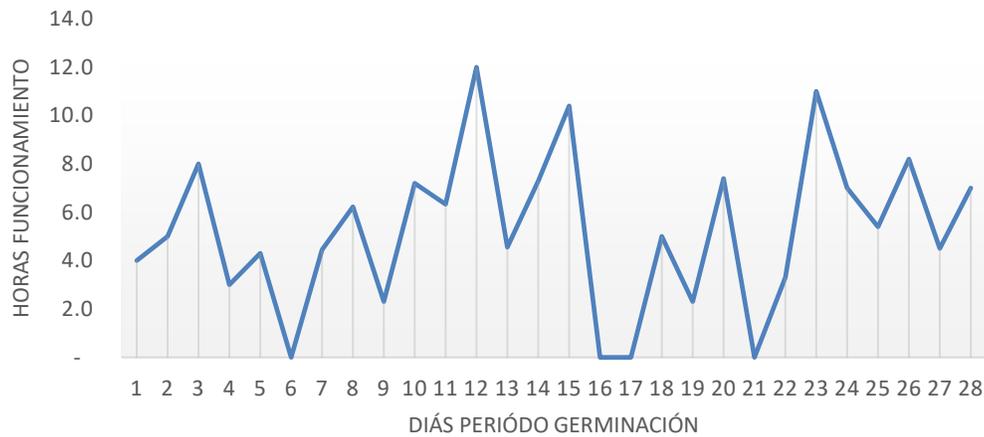


Figura 3.10. Horas de funcionamiento del sistema durante el periodo de germinación

[Autor].

3.4.2. Etapa 2 - Maduración

Comenzamos esta etapa con el trasplante de los especímenes al sistema hidropónico, para esto primeramente sacamos la plántula la limpiamos para colocarla en la canastilla hidropónica que tendrá una malla de plástico y estará rellena con sustrato peatmoss con perlita, la malla ayuda a que el sustrato pueda humedecerse pero que no se salga de la canastilla hidropónica. Se realizaron un total de 5 eventos de riego al día.



Figura 3.11. Trasplante de plántula a maceta hidropónica [Autor].

Una vez se realiza este proceso colocamos las plantas en el módulo hidropónico, preparamos la solución nutritiva colocando agua con PH regulado en conjunto con la solución nutritiva madre tipo A, B y C en las siguientes proporciones:

Tabla 16. Recursos para la solución nutritiva [Autor].

Recurso	Cantidad (centímetros cúbicos)
Agua tratada	42000 cc
Solución nutritiva tipo A	210 cc
Solución nutritiva tipo B	210 cc
Solución nutritiva tipo C	84cc

En el módulo se instala el sistema de iluminación artificial y se lo configura para la etapa de maduración, se debe observar periódicamente el estado de la planta para recortar los estolones pues estos quitan energía a la planta retardando la fase de floración y también se debe verificar el estado de las raíces al extraer la planta del canal de cultivo como se puede observar en la figura 3.12.



Figura 3.12. Verificación del estado de las raíces [Autor].

Luego del lapso de 3 semanas observamos que las plantas comienzan a desarrollar las primeras flores y continuaran con su siguiente etapa de desarrollo, como la planta de la figura 3.13.



Figura 3.13. Primera flor en una planta de fresa hidropónica [Autor].

Además, se obtienen los siguientes datos sobre el funcionamiento del sistema de iluminación artificial que a lo largo de este periodo tuvo un funcionamiento similar al grafico de la figura 3.14.

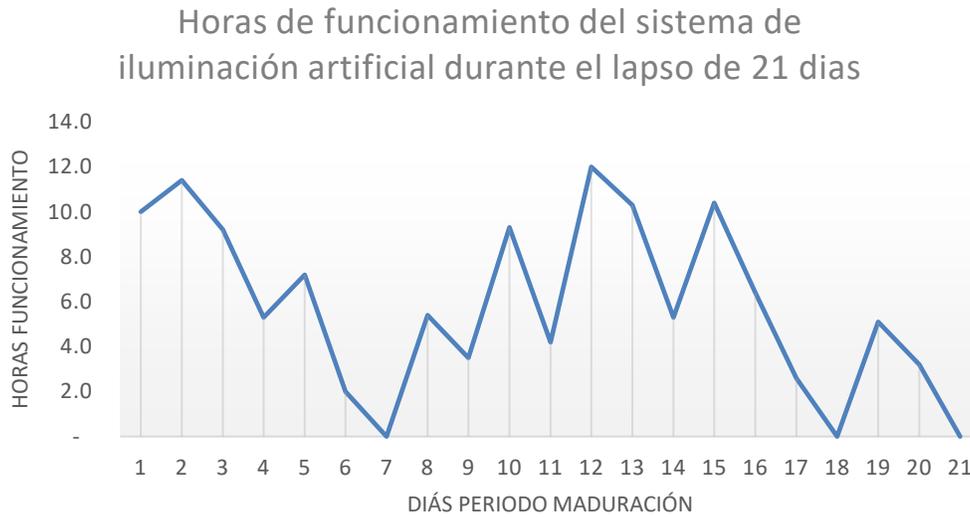


Figura 3.14. Horas de funcionamiento del sistema durante el periodo de maduración

[Autor].

Se tuvo picos bastante altos por la presencia de la temporada de lluvia, teniendo como resultado un tiempo estimado de funcionamiento del sistema de iluminación fue de 123 horas. Aportando durante este periodo casi cerca del 48.8% de iluminación de forma suplementaria al fotoperiodo del espécimen.

3.4.3. Etapa 3 - Floración

En esta etapa se manejó la misma composición de solución nutritiva a la planta de fresa y como recomienda la bibliografía se cambió el sustrato por uno nuevo con la finalidad de revisar el estado de las raíces y evitar la propagación de patógenos u hongos. Los eventos de riego fueron de 5 al día y en la semana 2 de este periodo algunos ejemplares ya comenzaron a tener flores como se observa en la figura 3.15.



Figura 3.15. Desarrollo de flores en las fresas hidropónicas [Autor].

Se configura el sistema de iluminación artificial al apartado de floración, que a diferencia de la configuración anterior este se enciende durante las noches a partir de media noche por 15 minutos sumando a cada día 1 hora y 15 minutos de activación del sistema de iluminación, que como señala el laboratorio de tecnología y fisiología vegetal de ambiente controlado, en [54] “La iluminación intermitente (15 minutos de iluminación por cada hora de la noche) parece ser ampliamente utilizada en los Países Bajos para llevar las plantas rápidamente desde el estado inactivo de mediados de invierno a la etapa de producción activa en su sistema de producción de "doble cultivo". Esta iluminación intermitente funciona bien para cultivares de días largos” ayuda a potenciar esta etapa.

Al igual que en el inciso anterior se obtiene la gráfica 3.16 sobre el funcionamiento del sistema durante el periodo de 6 semanas.

Horas de funcionamiento del sistema de iluminación artificial durante el lapso de 35 días



Figura 3.16. Horas de funcionamiento del sistema durante el periodo de floración

[Autor].

Por lo que el tiempo estimado de funcionamiento del sistema de iluminación fue de 231 horas. Obteniendo que el aporte fue del 55% de iluminación de forma suplementaria al fotoperiodo del espécimen.

Y donde cómo podemos apreciar en la figura 3.17 las flores comienzan a generar los primeros frutos de fresa hasta este momento del trabajo de grado.

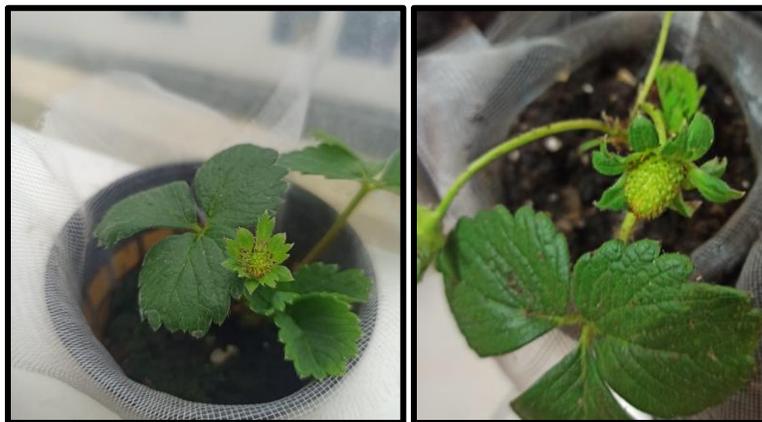


Figura 3.17. Primeros frutos de las plantas [Autor].

Para finalizar se compara que las 6 plantas a las que se provee el fotoperiodo con la iluminación artificial tuvieron un mayor desarrollo que a las que solo se desarrollaron con ayuda de la luz solar. De esta manera se tiene la tabla 17, que presenta las diferencias morfológicas observadas entre los especímenes comparados.

Tabla 17. Diferencias morfológicas observadas entre los especímenes [Autor].

Característica Morfológica	Especímen sin iluminación artificial	Especímen con iluminación artificial
Desarrollo de flores	2	5
Desarrollo de hojas	4	3
Alargamiento de yema	4cm	8cm
Desarrollo de frutos	0	2

3.5. Costos de fabricación

En la presente sección, se detallan las tablas 18, 19 y 20 que representan el costo de cada elemento utilizado en la construcción tanto del sistema hidropónico NFT, así como del sistema de iluminación artificial y donde se obtiene que la inversión total es de \$261,49 dólares.

Tenemos así el costo de fabricación del sistema hidropónico:

Tabla 18. Costos del sistema hidropónico [Autor].

COSTOS SISTEMA HIDROPÓNICO				
Elemento	Nombre	Cantidad	Precio unitario	Total
Canales de Cultivo	Tubo PVC Premiun 4"	2	\$ 4.90	\$ 9.80
	Codo PVC Vent 3"	2	\$ 1.00	\$ 2.00
	Tubo PVC Premiun 3"	1	\$ 3.50	\$ 3.50
	Unión PVC 4"	2	\$ 0.75	\$ 1.50
	Tapa PVC 4"	1	\$ 0.75	\$ 0.75
	Reducción PVC 4" a 3"	2	\$ 1.50	\$ 3.00
	Reducción PVC 4" a 2"	1	\$ 1.00	\$ 1.00
	Niple Roscado Manguera 1/2"	5	\$ 0.50	\$ 2.50
	Manguera Corrugada (Cantidad en m)	2	\$ 1.20	\$ 2.40
	Manguera 1/2"(Cantidad en m)	2	\$ 0.60	\$ 1.20
	Codo Unión Roscable 1/2" plastigama	2	\$ 1.15	\$ 2.30
	Teflón	1	\$ 0.50	\$ 0.50
	Silicona Nivel Industrial	1	\$ 2.50	\$ 2.50
Reservorio	Reservorio rectangular con capacidad de 50 litros	1	\$ 9.50	\$ 9.50
Bomba de Agua	Bomba De Agua Sumergible 25W 1800 LPH – 2 mts	1	\$ 59.00	\$ 17.00
Estructura Vigas de madera	Vigas de 10cmx4cm	2	\$ 7.00	\$ 14.00
	Vigas de 4cmx4cm	4	\$ 3.50	\$ 14.00
	Tríplex de 3 líneas	2	\$ 10.50	\$ 21.00
	Cola para madera	1	\$ 2.00	\$ 2.00
	Tornillo madera 1/2x6 RG	1	\$ 1.80	\$ 1.80
Canastillas	Canastillas cultivo hidropónico #8	12	\$ 0.12	\$ 1.44
Mini Invernadero	Mini Invernadero plástico con tapa 12 puestos	1	\$ 1.50	\$ 1.50
Semillas	Semillas de Fresa	1	\$ 5.00	\$ 5.00
Sustrato	Sustrato Pet-Mos+Perlita (Medida en Kilogramos)	5	\$ 1.50	\$ 7.50
Almaciguera	Almaciguera para semillas	1	\$ 1.50	\$ 1.50
TOTAL				\$ 129.19

El costo del sistema de iluminación artificial:

Tabla 19. Costos del sistema de iluminación artificial [Autor].

COSTOS SISTEMA ILUMINACIÓN ARTIFICIAL						
Luz LED Artificial	Wills LED Grow Lighths 600W Reflector Full Spectrum	1	\$	67.90	\$	67.90
Sensor Luz Ambiente	CQRobot TSL25911FN sensor de luz ambiente capacidad de 88000Lux	1	\$	11.00	\$	11.00
Sensor Rayos UV	Comimark UVM-30A para Arduino	1	\$	17.00	\$	17.00
Pantalla Táctil	3.5" TFT LCD TocuhScreen para Arduino	1	\$	20.00	\$	20.00
Microcontrolador	ELEGOO MEGA 2560	1	\$	9.00	\$	9.00
Activación Luz LED	Modulo relé para Arduino	1	\$	2.40	\$	2.40
Módulo RTC	Módulo RTC DS1302	1	\$	1.50	\$	1.50
Placa de Circuito	Circuito con todos los elementos electrónicos	1	\$	1.00	\$	1.00
Servo	Servomotor para Arduino	1	\$	2.50	\$	2.50
TOTAL					\$	132.30

Y para finalizar el costo total de fabricación:

Tabla 20. Costo total de fabricación [Autor].

COSTO TOTAL DE FABRICACIÓN	
Sistema	Costo (USD)
Sistema Hidropónico	\$ 129.19
Sistema Iluminación	\$ 132.30
TOTAL	\$ 261.49

Capítulo 4

4. Conclusiones y trabajo futuro

Para finalizar en este capítulo se plasma las conclusiones que han surgido en las distintas etapas del desarrollo tanto del módulo hidropónico, así como del sistema de iluminación artificial, para cerrar este apartado se exponen los posibles cambios que se pueden adicionar al desarrollo en trabajos futuros.

4.1. Conclusiones

Se concluye que para una implementación exitosa de sistemas hidropónicos se debe tener en cuenta el cálculo de los parámetros basados en los requerimientos del espécimen que se va a cultivar, sobre todo en los sistemas pensados para la experimentación y automatización, de esta manera podemos obtener datos reales para posteriormente realizar un cultivo a mayor escala.

Con base en el análisis investigativo de trabajos sobre iluminación artificial suplementaria en fresas con resultados satisfactorios, se consigue plantear los rangos estimados para que el sistema complete el fotoperiodo de la planta cuando la energía del sol no es la suficiente.

Los resultados del cultivo con ayuda de la iluminación suplementaria fueron bastante óptimos, el sistema de iluminación artificial tuvo mayor contribución conforme la planta se desarrolló pues como se puede apreciar en los resultados en el apartado 3.3 en la etapa de floración el sistema provee más energía para completar el fotoperiodo de la

planta que el mismo sol, esto se debe también en parte a que el cultivo se desarrolló principalmente durante el periodo de lluvias.

El sistema se plantea de este modo para reducir significativamente el uso de recursos, pues en muchos de los trabajos de investigación sobre el tema aplican únicamente la iluminación artificial sin interferencia de factores externos como el sol, principalmente por el marcado cambio en las estaciones de estos lugares del planeta, pero en nuestro sector sin importar cual sea la época del año contamos con la presencia del sol y nos es útil para el cultivo por lo que el sistema solo compensa la ausencia de energía por parte del sol para evitar que se interrumpa el fotoperiodo de la planta, este ahorro de energía se vería más reflejado en un cultivo a gran escala.

4.2. Trabajo futuro

Con la finalidad de mejorar el funcionamiento del sistema y aumentar su valor tecnológico se propone como trabajo futuro:

- Volver a realizar las mediciones de la intensidad de luz mediante el uso de un sensor de PAR cuántico, debido a que este componente nos proveerá una medición más real de los valores de longitud de onda, debido a que está diseñado para lograr identificar el rango completo de longitud de onda.
- Realizar un análisis completo del desarrollo del espécimen desde la germinación hasta la cosecha de frutos y el nuevo periodo de desarrollo hasta obtener una nueva cosecha.

- Cambiar la luminaria LED o probar distintos tipos de luminarias LEDs al mismo tiempo para saber cuál es la que nos provee la mejor calidad de luz para el desarrollo de las plantas de fresa.

Bibliografía

- [1] Moghaddam, Timmons and Mattson, “Development of Hydroponic Production Systems for Strawberry Production”, Department of Horticulture, Cornell University, 2014. Recuperado de: https://cpb-us-e1.wpmucdn.com/blogs.cornell.edu/dist/1/3676/files/2019/10/TSF2017.012-Final-Report_Timmons-and-Mattson_10-7-19.pdf
- [2] Growing Strawberries: How to grow strawberries using Hydroponics – Step by Step with images, GEEKGARDENER, (2015). Recuperado de: <https://geekgardener.in/2015/03/25/growing-hydroponic-strawberries-in-nft-system/>
- [3] Kepenek, K. (2018). Photosynthetic Effects of Light-emitting Diode (LED) on in Vitro-derived Strawberry (*Fragaria x Ananassa* cv. Festival) Plants Under in Vitro Conditions. *Erwerbs-Obstbau*, 61, 179-187.
- [4] Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua (ESPAC), INEC, Quito, Ecuador, 2019.
- [5] Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua (ESPAC), INEC, Quito, Ecuador, 2010.
- [6] Buenas Prácticas Agrícolas para Aguacate, MAGAP, Agrocalidad, Quito, Ecuador, 2015. Comportamiento agronómico de dos cultivares de lechuga (*Lactuca sativa* L.), sembradas mediante sistema hidropónico utilizando tres dosis de biol en el cantón Antonio Ante, provincia de Imbabura, Nieto C. y Juan B., Ibarra, Ecuador, 2013.
- [7] Revistalideres.ec. 2020. Seis Variedades De Lechuga Acompañan Las Ensaladas. Recuperado de: <https://www.revistalideres.ec/lideres/seis-variedades-lechugaacompanan-ensaladas.html>
- [8] Zambrano, 2015. Agricultores le apuestan al cultivo de frutilla. *El agro*.
- [9] El Comercio, 2011, "La frutilla es un cultivo rentable", *El Comercio*, 2020. [Online]. Available: <https://www.elcomercio.com/actualidad/negocios/frutilla-cultivo-rentable.html>
- [10] Carrera, 2011. “ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA PRODUCCIÓN Y COMERCIALIZACIÓN DE FRESA EN EL BARRIO SAN PEDRO, PARROQUIA LA ESPERANZA, CANTÓN IBARRA”, Universidad Técnica del

- Norte, Ibarra. Recuperado de:
[http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/1326/1/02%20ICA%20164%20TESI S.pdf](http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/1326/1/02%20ICA%20164%20TESI%20S.pdf)
- [11] Revistalideres.ec. 2020. Seis Variedades De Lechuga Acompañan Las Ensaladas. Recuperado de:
- [12] Hora, D., 2020. Frutillas La Fruta De Los Dioses - La Hora. [online] La Hora Noticias de Ecuador, sus provincias y el mundo. Recuperado de:
<https://www.lahora.com.ec/noticia/466604/frutillas-la-fruta-de-los-dioses>
- [13] BURES, Silvia; URRESTARAZU GAVILÁN, Miguel; KOTIRANTA, Stina; Iluminación artificial en agricultura [on-line]. Biblioteca Horticultura. València: serveis per la producció editorial SPE3. Enero 2018. 46 pp. ISBN 978-84-16909-09-4. Disponible en <http://publicaciones.poscosecha.com/es/cultivo/395-iluminacion-artificial-en-agricultura.html>
- [14] Zheng J, Ji F, He D, Niu G. Effect of Light Intensity on Rooting and Growth of Hydroponic Strawberry Runner Plants in a LED Plant Factory. *Agronomy*. 2019; 9(12):875.
- [15] Strawberries. Hoogstraten.eu. (2021). Retrieved 13 January 2021, from <https://www.hoogstraten.eu/en/fruit-vegetables/strawberries/>
- [16] Interempresas. 2020. Nuevas Tendencias De Los Cultivos Sin Suelo Y Su Estado En Los Países Emergentes. Recuperado de:
<https://www.interempresas.net/Horticola/Articulos/59959-Nuevas-tendencias-de-los-cultivos-sin-suelo-y-su-estado-en-los-paises-emergentes.html>
- [17] S. User, "QUIENES SOMOS", Greenlab.com.ec, 2020. Recuperado de:
<http://www.greenlab.com.ec/quienes-somos>
- [18] Revistalideres.ec. 2020. Seis Variedades De Lechuga Acompañan Las Ensaladas. Recuperado de: <https://www.revistalideres.ec/lideres/seis-variedades-lechuga-acompanan-ensaladas.html>
- [19] En El Oro Promueven Cultivo Hidropónico De Lechugas – Ministerio De Agricultura Y Ganadería. Recuperado de: <https://www.agricultura.gob.ec/en-el-oro-promueven-cultivo-hidroponico-de-lechugas-2/>
- [20] "La Hidroponía: Cultivos sin Suelo | Intagri S.C.", Intagri.com, 2016. Recuperado de: <https://www.intagri.com/articulos/horticultura-prottegida/la-hidroponia-cultivos-sin-suelo>

- [21] T. others, "Guía: ¿Qué es el sistema NFT?:: Hydro Environment .: Hidroponia en Mexico", Hydroenv.com.mx, 2020. Recuperado de: https://www.hydroenv.com.mx/catalogo/index.php?main_page=page&id=101
- [22] T. others, "Guía: ¿Qué es el Sistema de Raíz Flotante?:: Hydro Environment.: Hidroponia en Mexico", Hydroenv.com.mx, 2020. Recuperado de: https://www.hydroenv.com.mx/catalogo/index.php?main_page=page&id=64
- [23] Revista Experiencia Agraria, "El cultivo Hidroponico mediante la tecnica NGS", Prodetur.es, 2010. Recuperado de <http://www.prodetur.es/prodetur/AlfrescoFileTransferServlet?action=download&ref=37e12fdc-3414-41ef-a754-097a98fdffae>.
- [24] López, A. J. M., "El cultivo de la fresa en Huelva. En: La fresa de Huelva.", Junta de Andalucía Consejería de Agricultura y Pesca, 2008.
- [25] Avilan L, Leal F, Bautista D, "Manual de Fruticultura 2 ed.", Editorial América pp 1057-1077, Caracas, Venezuela, 1992.
- [26] Ramirez H, Sandoval M, Carrillo A. 2012, "Comparison of Hydroponic Systems in the Strawberry Production", Campus Montecillo, Mexico.
- [27] Fitosofía, CULTIVO HIDROPÓNICO DE FRESAS. (2015). Recuperado de: <https://fitosofia.blogspot.com/2015/04/cultivo-hidroponico-de-fresas.html>
- [28] C. R. Romeva, Diseño Concurrente, Barcelona: Ediciones UPC, 2002.
- [29] ハイドロポニック・システムの種類 – ハイドロポニックスとオーガニックス daikage. (2017). Recuperado de: <https://www.daikage.net/home/about/hydroponics/hydroponic-systems/>
- [30] Antonius, "Flow rate and irrigation cycles for NFT hydroponic systems", Commercial Hydroponic Framing, 2013. Recuperado de: <https://www.commercial-hydroponic-farming.com/flow-rate-irrigation-cycles-dripper-irrigation/>
- [31] Luszczewski, A. (2004). Redes industriales de tubería. Barcelona: Reverté, pp 89.
- [32] Muñoz O, "SISTEMA AUTOMÁTICO DE RIEGO POR GOTEO PARA CULTIVO DE FRESAS ARTESANAL". Ibarra, Ecuador, Universidad Tecnica del Norte. Recuperado de: <http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/3744/1/04%20MEC%20050%20TESIS.pdf>

- [33] Saldarriaga V, J. (2007). "Hidráulica de tuberías". Bogota, Colombia: Emma Ariza H, pp 46.
- [34] Mott, Robert: Mecánica de fluidos, Pearson- Education, Mexico, 2006, 234- 235 pag.
- [35] Rocha A, "Hidráulica de tuberías y canales", Universidad Nacional de Ingeniería, Peru, 2007, 94 pag.
- [36] Miranda, F., Silva, V., Santos, F., Rossetti, A., & Silva, C. (2014). Production of strawberry cultivars in closed hydroponic systems and coconut fibre substrate. *Revista Ciência Agronômica*, 45(4), 833-841. doi: 10.1590/s1806-66902014000400022
- [37] Evans, M. (2014). Hydroponic Strawberry Irrigation, University of Arkansas. Recuperado de: https://cals.arizona.edu/strawberry/Hydroponic_Strawberry_Information_Website/Irrigation.html
- [38] Betancourt, D. F. (2018). Cómo hacer una matriz de priorización. Recuperado de Ingenio Empresa: www.ingenioempresa.com/matriz-de-priorizacion.
- [39] M. Crespo, 2016. Recuperado de: <http://manueldelgadocrespo.blogspot.com/p/arduino-mega-2560.html>.
- [40] ELEGOO MEGA2560 MANUAL Pdf Download | ManualsLib. (2019). Recuperado de: <https://www.manualslib.com/manual/1353374/Elegoo-Mega2560.html>
- [41] rrypi, «raspberrypi,» Recuperado de: <https://raspberrypi.cl/que-esraspberry/>
- [42] Wills Led Grow Light 600W. (2019). Recuperado de: https://www.amazon.com/-/es/gp/product/B08GQ11MHC/ref=ox_sc_act_title_2?smid=A3860DQKXJI9QI&psc=1
- [43] Briignite Led Grow Lights 96W. (2019). Recuperado de: https://www.amazon.com/-/es/dp/B08HQ3DPND/ref=sr_1_2?__mk_es_US=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&dchild=1&keywords=briignite+Led+96w&qid=1617648941&s=lawn-garden&sr=1-2
- [44] TSL2591X Light Sensor - CQRobot-Wiki. (2019). Recuperado de: http://www.cqrobot.wiki/index.php/TSL2591X_Light_Sensor
- [45] Let's Workshop: UVM-30A Ultraviolet Sensor Module. (2018). Recuperado de: <https://fluxworkshop.com/blogs/getting-started/lets-workshop-uvm-30a->

ultraviolet-sensor-module

- [46] Shield TFT táctil de 3.5" Arduino Mega | Tienda y Tutoriales Arduino. (2018). Recuperado de: <https://www.prometec.net/shield-mega-tft/>
- [47] Module, N. (2017). 3.5" Nextion NX4832T035 HMI TFT Display Module Work. Recuperado de: <https://www.itead.cc/nextion-nx4832t035.html>
- [48] Módulo Relé - AutoCore Robótica. (2016). Recuperado de: <https://autocorerobotica.blog.br/modulo-rele/>
- [49] electrotekmega, «electrotekmega comercio electronico,» 2014. Recuperado de: <http://electrotekmega.com/producto/modulo-rele-de-4-canales/>
- [50] Micromoles de fotones, la medida de la luz para las plantas – Photosystem.es. (2021). Recuperado de: <https://photosystem.es/micromoles-de-fotones-la-medida-de-la-luz-para-las-plantas/>
- [51] Hidaka, K., Dan, K., Imamura, H., Takayama, T., Sameshima, K., & Okimura, M. (2015). Variety Comparison of Effect of Supplemental Lighting with LED on Growth and Yield in Forcing Culture of Strawberry. *Environmental Control in Biology*, 53, 135-143. Recuperado de: <https://www.semanticscholar.org/paper/Variety-Comparison-of-Effect-of-Supplemental-with-Hidaka-Dan/07115418be15d6c0b316975ee14f7e1001472133#references>
- [52] Yoshida, H., Mizuta, D., Fukuda, N., Hikosaka, S. y Goto, E. (2016). Efectos de la calidad de la luz variable de los diodos emisores de luz azul y roja de pico único durante el período de vivero sobre la floración, la fotosíntesis, el crecimiento y el rendimiento de frutos de la fresa perenne. *Bioteología vegetal*, 33 4, 267-276. Recuperado de: <https://www.semanticscholar.org/paper/Effects-of-varying-light-quality-from-single-peak-Yoshida-Mizuta/f9134b71577943cd94dd88b65f4f76967603f486>
- [53] Índice UV Solar Mundial. (2003). Organización Mundial de la Salud. Recuperado de: <https://www.who.int/uv/publications/en/uvispa.pdf>
- [54] Photoperiodic lighting | Controlled Environment Berry Production Information. (2017). Recuperado de: <https://u.osu.edu/indoorberry/photoperiodic-lighting/>

Anexos

Anexo 1. Resultado de encuestas

TEMA: “Sistema Hidropónico Vertical de Flujo Laminar de Nutrientes Automatizado”

OBJETIVO: Recopilar la información más relevante para obtener los requerimientos para el diseño del sistema hidropónico que principalmente se centra en el beneficio tanto de la planta como de la persona o agricultor que va a observar al espécimen.

RESULTADOS:

Pregunta 1: - ¿Cuál es el espécimen que se va a cultivar en el sistema hidropónico?

El sistema hidropónico debe estar diseñado para el cultivo de fresas.

Pregunta 2: - ¿Considera que el sistema debe tener un espacio cerrado para componentes?

Si, el sistema debe estar diseñado como un módulo que cuente con un espacio amplio para el reservorio y los elementos de control de la solución nutritiva.

Pregunta 3: - Al tratarse un fruto que cuelga, ¿cuál cree que sea la altura apropiada de los canales de cultivo?

1,50m es una altura apropiada para asegurar la correcta manipulación del cultivo.

Pregunta 4: - Al estar diseñado como un módulo, ¿El sistema debe contar con un panel de control local?

Si, en este espacio se incluirán los elementos de control local.

Pregunta 5: - ¿Cómo debe ser la construcción del sistema?

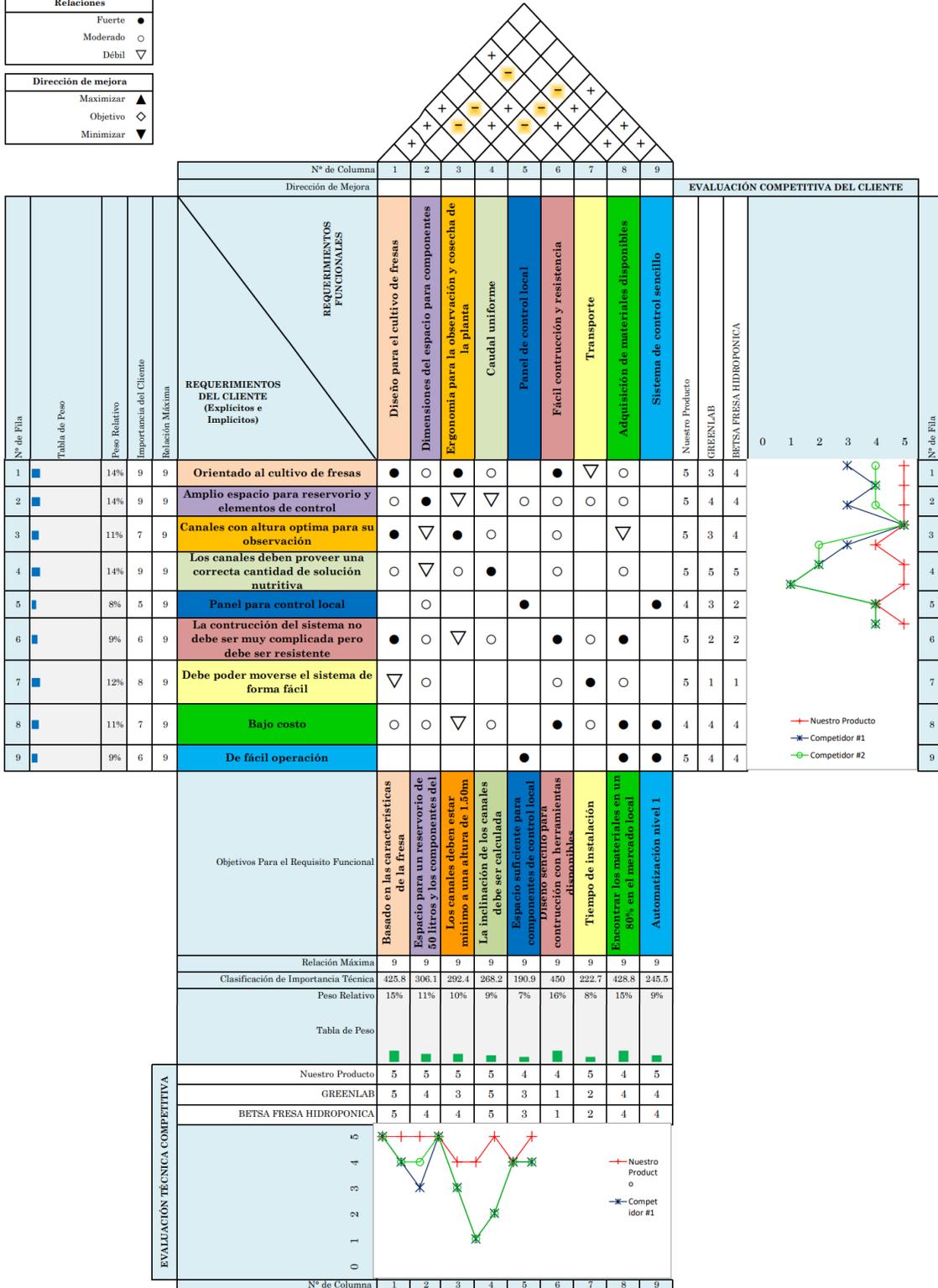
Principalmente debe ser un sistema sencillo pero resistente, que sea fácil de transportar y que no sea muy costoso.

Anexo 2. Casa de la calidad

Correlaciones	
Positivo	+
Negativo	-
No Correlacion	

Relaciones	
Fuerte	●
Moderado	○
Débil	▽

Dirección de mejora	
Maximizar	▲
Objetivo	◇
Minimizar	▼



Anexo 3. Manual de Usuario Interfaz HMI del sistema de iluminación artificial.

El presente documento es una guía para un adecuado uso del HMI, que servirá para controlar la intensidad de la luminaria LED Wills ya sea de forma manual o automática, presentando la información de forma clara y concisa.

Es importante definir los criterios que rigen el funcionamiento de esta interfaz:

- Contar con un fácil mecanismo para desplazarse entre las ventanas de la interfaz.
- Anunciador de alarmas que nos permita conocer las fallas que pueden presentarse en el sistema.
- Interfaz amigable con el usuario.
- Capacidad de control local de componentes, actuando directamente sobre el ELEGOO MEGA.

En cuanto a la usabilidad, se define lo siguiente:

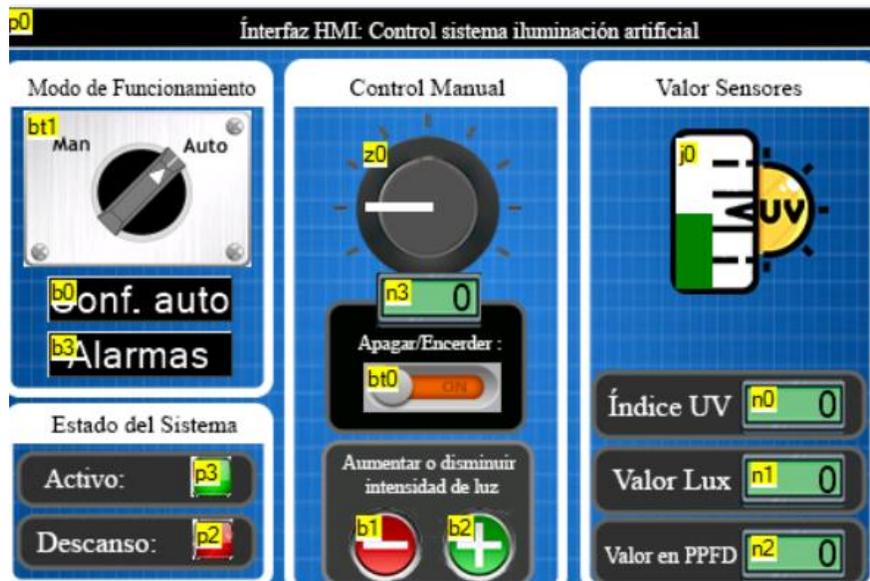
- La interfaz provee al usuario una configuración rápida de los valores de la duración del fotoperiodo, así como su hora de inicio y en qué etapa se encuentra la planta, para que una vez que se vuelva a la pantalla principal estos valores queden definidos para el funcionamiento en modo automático.
- La interfaz presenta al usuario los valores de los sensores al mismo tiempo y a su vez de la intensidad a la que se encuentra la luminaria LED.

- En caso de que uno de los sensores falle el modo manual le permitirá al usuario ajustar la intensidad de la luminaria a un valor o apagarla para revisar el sistema.
- Al tratarse de un control local conectado con el microcontrolador, sirve de mucho para el usuario o agricultor que maneje el sistema, solo deben presionar sobre la pantalla en la que se encuentra cargada la interfaz para controlar el elemento que deseen del sistema de iluminación.

A continuación, se define la función de cada uno de los elementos de la interfaz HMI y como afectan al sistema de iluminación artificial.

Pantalla Principal:

Se define el funcionamiento de cada uno de los botones presentados en la pantalla principal que se divide en cuatro secciones:



Botones de un estado:

- bo: Entrar a la configuración del modo automático.

- b1: Disminuir la intensidad de luz entregada por la luminaria LED Wills en el modo manual.
- b2: Aumentar la intensidad de luz entregada por la luminaria LED Wills en el modo manual.
- b3: Alarmas del sistema, parpadea de existir una alarma.

Botones de doble estado:

- bt0: Apagar o encender la luminaria LED Wills en el modo manual del sistema.
- bt1: Botón cambio de estado del sistema a manual o automático.

Indicadores de datos:

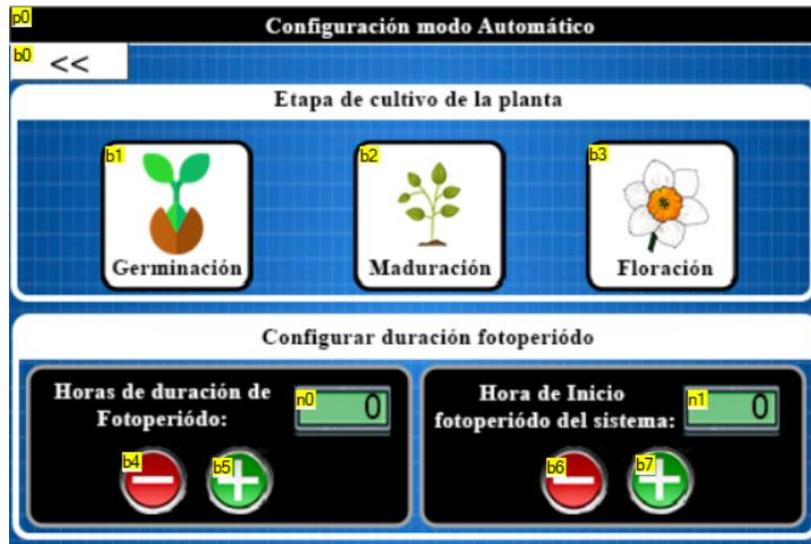
- n0: Valor de la intensidad de radiación UV captada por el sensor UVM-30A.
- n1: Valor de la intensidad de luz ambiente captada por el sensor CQ Robot en lux.
- n2: Transformación del valor captado en lux a PPF.D.
- n3: Valor de intensidad en la que se encuentra la luminaria LED Wills en PPF.D.

Indicadores gráficos:

- j0: Barra de progreso que cambia de color en base al valor de radiación UV.
- z0: Animación de la ubicación de la perilla en base al valor que entrega la luminaria LED Wills.
- p2: Indica si el sistema se encuentra activo al ponerse de color verde, caso contrario será de color rojo.
- p3: Indica si el sistema se encuentra en estado de descanso al ponerse de color verde, caso contrario será de color rojo.

Configuración modo automático:

Al entrar en este modo es posible configurar algunos parámetros relacionados con el funcionamiento de este modo de operación del sistema de iluminación artificial.



Botones de un estado:

- b0: Regresa a la pantalla principal y guarda las configuraciones realizadas.
- b1: Configura los rangos del sistema de iluminación artificial para la etapa de germinación.
- b2: Configura los rangos del sistema de iluminación artificial para la etapa de maduración.
- b3: Configura los rangos del sistema de iluminación artificial para la etapa de floración.
- b4: Disminuye las horas de duración del fotoperíodo.
- b5: Aumenta las horas de duración del fotoperíodo.
- b6: Permite disminuir al momento de configurar la hora de inicio para inducir el fotoperíodo.
- b7: Permite aumentar al momento de configurar la hora de inicio para que el sistema conserve el fotoperíodo y se active la luminaria LED Wills de ser necesario.

Indicadores de datos:

- n0: Indica las horas de duración del fotoperíodo para la configuración del modo automático.

- n1: Indica la hora de inicio en la que el sistema se encuentra en línea para conservar el fotoperiodo de la planta.

Alarmas:

En esta pantalla podemos encontrar las fallas mas comunes que pueden presentarse del sistema de iluminación artificial, para actuar sobre los componentes en conflicto.





Botones de un estado:

- bo: Regresa a la pantalla principal.

Alarmas de sensores:

- t0: Parpadea con un cuadro rojo cuando el sensor CQ Robot se encuentra con algún fallo o esta desconectado.
- t1: Parpadea con un cuadro rojo cuando el sensor UVM-30A se encuentra con algún fallo o esta desconectado.
- t2: Parpadea con un cuadro rojo cuando el sensor módulo RTC se encuentra con algún fallo o esta desconectado.
- t3: Parpadea con un cuadro rojo cuando la interfaz HMI no tiene comunicación con la tarjeta ELEGOO Mega.
- t4: Parpadea con un cuadro rojo cuando el módulo RTC no tiene comunicación con la tarjeta ELEGOO Mega y no recibe los datos.

Anexo 4. Datasheet características típicas de operación del sensor CQ Robot

TSL25911FN

TSL2591 – Typical Operating Characteristics



Typical Operating Characteristics

Spectral Responsivity: Two channel response allows for tunable illuminance (lux) calculation regardless of transmissivity of glass.

Figure 11:
Spectral Responsivity

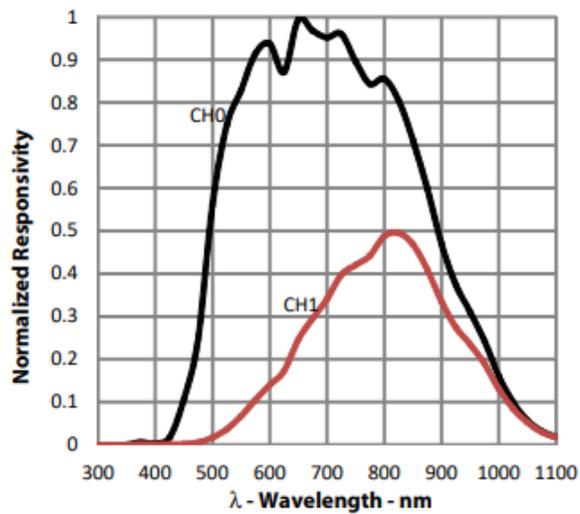
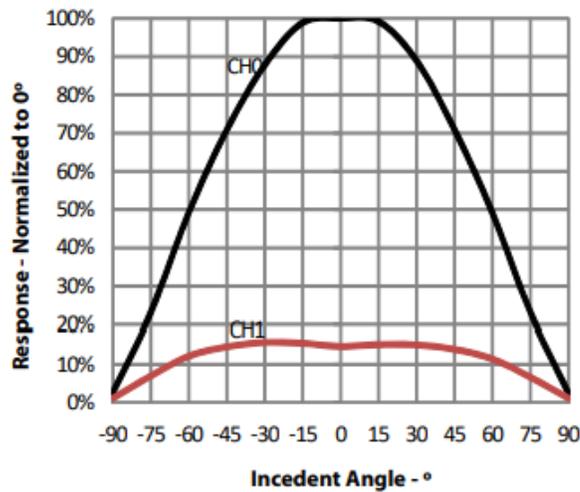


Figure 12:
White Normalized Responsivity vs. Angular Displacement

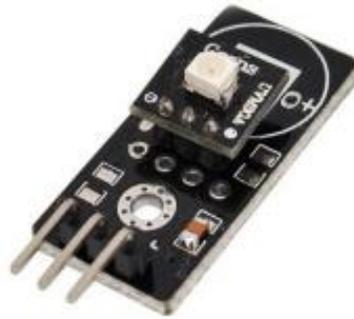
White LED Angular Response: Near cosine angular response for broadband white light sources.



Anexo 4. Datasheet Comimark UVM-30A

Arduino Sensor Ultra Violet

Model: UVM -30A



Description:

The UV Sensor is used for detecting the intensity of incident ultraviolet (UV) radiation. This form of electromagnetic radiation has shorter wavelengths than visible radiation. This module is based on the sensor UVM -30A, which has a wide spectral range of 200nm-370nm.

The module outputs electrical signal which varies with the UV intensity.

Specifications:

- Operating Voltage: DC 3-5V
- Output voltage: DC 0-1V
- Test accuracy: 1UV INDEX
- Current: 0.06mA(typ), 0.1mA(max).
- Response wavelength: 200nm-370nm
- Work temperature: -20°C~85°C
- Detect UV wavelength:200-370nm
- PCB size:28*12*10mm

Features:

- Designed for occasions that require high reliability and accuracy of measurement of the UV Index (UVI).
- Suitable for the measurement of total sunlight UV intensity.
- Control the UV Index, the World Health Organization grading standards.
- Detection UV wavelength :200-370nm.
- Fast response, full interchangeability.
- Using a patented solid polymer structure, waterproof dustproof easy to clean.
- Linear voltage signal output.
- Small size, suitable for mobile phones and other portable products.

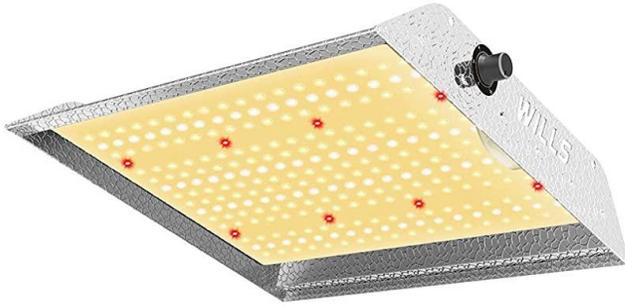
UV Index	0	UV INDEX 1	UV INDEX 2	UV INDEX 3	UV INDEX 4	UV INDEX 5	
Vout(mV)	<50	227	318	408	503	606	
UV Index		UV INDEX 6	UV INDEX 7	UV INDEX 8	UV INDEX 9	UV INDEX 10	UV INDEX 11
Vout(mV)		696	795	881	976	1079	1170+



EKT
Your Partner To Technology

Anexo 5. Especificaciones del fabricante de la luminaria LED Wills

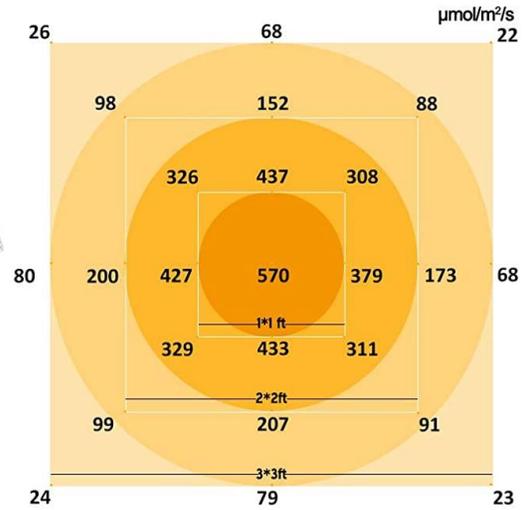
PAR VALUE



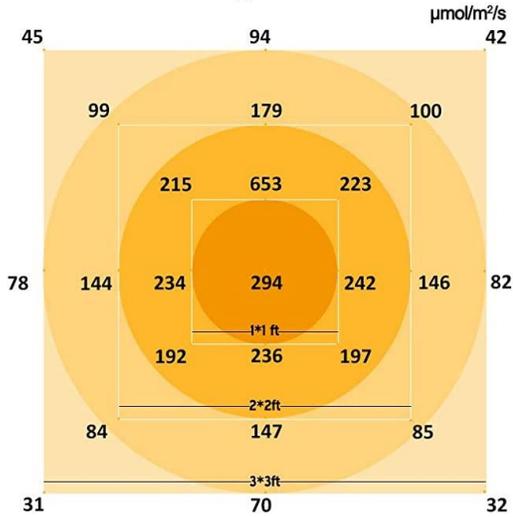
W- 600 PPFD MAP

(Tested in a 2X2 FT Grow Tent)

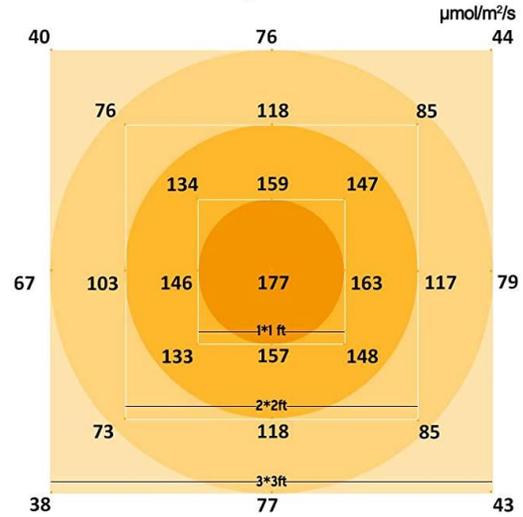
Height: 12"



Height: 18"



Height: 24"



Dimmable Knob



20%



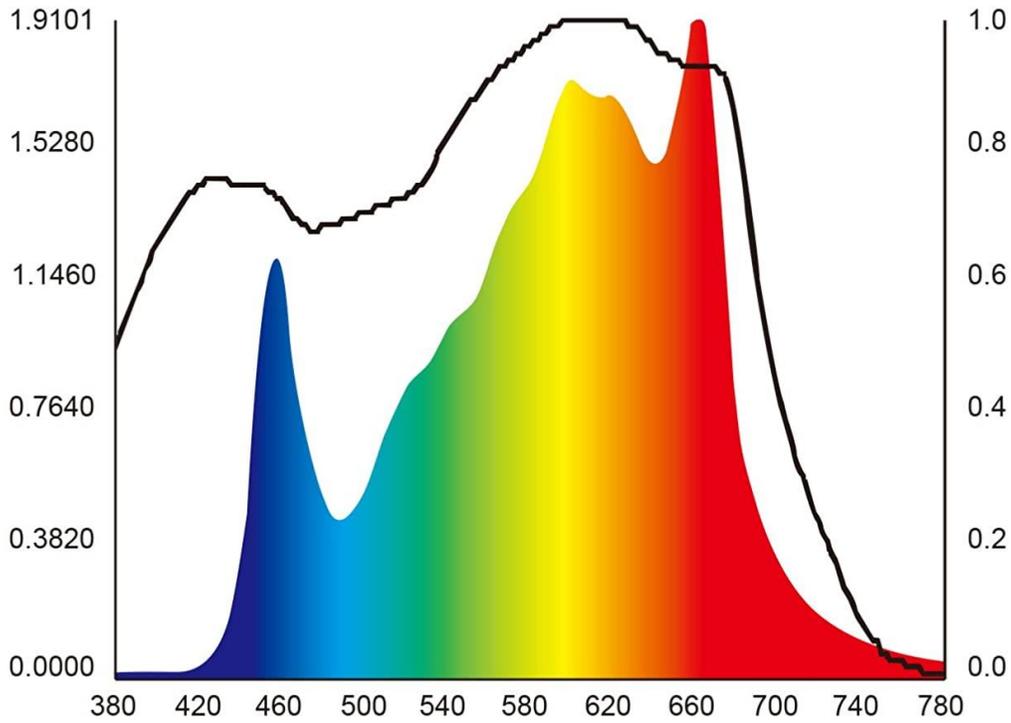
60%



100%



FULL SPECTRUM



3000K(180PCS)

Promotes plants germination



6500K(72PCS)

Boosts plants flowering



660nm(8PCS)

Increases photosynthesis, yields more leaves and crops

Anexo 6. Fotografías de la construcción del módulo hidropónico y la colocación de las plantas de fresa.

