

Desarrollo de un sistema prototipo para la conducción experimental del fenotipado y el monitoreo del crecimiento de plantas con el uso de luces LEDs en condiciones de laboratorio

Juan Sebastián Garavito Ballesteros, Samuel David Angulo Ruiz

Trabajo de Grado para Optar el título de Ingenieros Electrónicos

Director

Jaime Guillermo Barrero Pérez

MSc. en Ingeniería Electrónica

Codirector

Nelson Facundo Rodríguez López

DSc. en Fisiología Vegetal

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Físico Mecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2023

Agradecimientos

Queremos expresar nuestros agradecimientos en primer lugar a nuestras familias las cuales fueron un apoyo fundamental durante el transcurso de nuestros estudios, a la Universidad Industrial de Santander y profesores por ofrecernos la formación académica, a nuestros amigos electro-panas con los cuales construimos conocimiento a lo largo de la carrera, al laboratorio de fisiología vegetal UIS donde se llevaron a cabo las pruebas experimentales de este proyecto y a Jose Arango y Laura Cano que nos apoyaron en el desarrollo del proyecto.

Dedicatoria

Este proyecto se lo dedico a mis padres por siempre brindarme su apoyo incondicional, además de darme las herramientas necesarias para lograr las metas que me propuse a lo largo de la carrera.

Juan Sebastian Garavito Ballesteros

Quiero dedicar este proyecto a mis padres y hermano que siempre me mostraron su apoyo y me alentaron a alcanzar mis metas y superarme.

Samuel David Angulo Ruiz

Tabla de Contenido

Introducción	14
1. Objetivos.....	15
1.1 Objetivo General.....	15
1.2 Objetivos Específicos.....	15
2. Marco Referencial.....	16
2.1 Terminología relacionada.	16
2.1.1 Fotón	16
2.1.2 Longitud de onda	16
2.1.3 Radiación fotosintéticamente activa (PAR Photosynthetically Active Radiation).....	16
2.1.4 Flujo de fotones fotosintéticos (PPF Photosynthetic Photon Flux)	16
2.1.5 Densidad de flujo de fotones fotosintéticos (PPFD Photosynthetic Photon Flux Density). 17	17
2.2 Fenotipado en plantas.	17
2.2.1 Fotoperiodo	18
2.2.2 Contextualización de iluminación en cultivos.	19
2.2.3 Iluminación con diferentes longitudes de onda en cultivos	20
3. Sistema de iluminación LED	24
3.1 Tratamiento de luz	24
3.1.1 Circuito del módulo LED.....	26
3.1.2 Configuración de los LEDs.....	27
3.2 Sistema de control implementado.....	28

3.3 Circuito de alimentación	32
3.4 Montaje del sistema de iluminación	33
4. Sistema de monitoreo.....	35
4.1 Tarjeta de desarrollo	35
4.2 Sensores	36
4.3 Diseño del sistema	37
4.4 Algoritmo.....	38
4.5 Montaje del sistema de monitoreo	39
5. Pruebas experimentales.....	41
5.1 Selección de plantas	41
5.2 Condiciones de crecimiento.....	43
6. Resultados.....	45
6.1 Toma de datos.....	45
6.1.1 Longitud del tallo.....	45
6.1.2 Largo de las hojas	47
6.1.3 Ancho de las hojas	50
6.1.4 Peso.....	52
6.1.5 Largo de la raíz	53
6.1.4 Número de hojas	56
6.1.5 Número de primordios foliares	57
6.2 Discusión de resultados.....	59

7. Conclusiones	62
8. Recomendaciones	63
Referencias Bibliográficas	64
Apéndices.....	69

Lista de Tablas

Tabla 1 Efectos morfológicos y de crecimiento en las plantas de tomate Cherry al ser irradiadas por luces LED. 21

Tabla 2 Datos de los LEDs..... 24

Tabla 3 Características de los sensores de temperatura y humedad relativa..... 37

Tabla 4 Datos recolectados de la altura de los tallos. 46

Tabla 5 Estadísticas descriptivas de la altura del tallo para las plantas de albahaca. 46

Tabla 6 Estimación de la diferencia de la altura del tallo para las plantas de albahaca. 46

Tabla 7 Estadísticas descriptivas de la altura del tallo para las plantas de tomate Cherry. 47

Tabla 8 Estimación de la diferencia de la altura del tallo para las plantas de tomate Cherry.. 47

Tabla 9 Datos recolectados del largo de las hojas..... 48

Tabla 10 Estadísticas descriptivas del largo de las hojas para las plantas de albahaca. 49

Tabla 11 Estimación de la diferencia del largo de las hojas para las plantas de albahaca. 49

Tabla 12 Estadísticas descriptivas del largo de las hojas para las planta de tomate Cherry. ... 49

Tabla 13 Estimación de la diferencia del largo de las hojas para las plantas de tomate Cherry.
..... 49

Tabla 14 Datos recolectados del ancho de las hojas. 50

Tabla 15 Estadísticas descriptivas del ancho de las hojas para las plantas de albahaca. 50

Tabla 16 Estimación de la diferencia del ancho de las hojas para las plantas de albahaca..... 51

Tabla 17 Estadísticas descriptivas del ancho de las hojas para las plantas de tomate Cherry. 51

Tabla 18 Estimación de la diferencia del ancho de las hojas para las plantas de tomate Cherry.
..... 51

Tabla 19. Datos recolectados del peso de las plantas..... 52

Tabla 20 Estadísticas descriptivas del ancho de las hojas para las plantas de albahaca.	52
Tabla 21 Estimación de la diferencia del ancho de las hojas para las plantas de albahaca.....	52
Tabla 22 Estadísticas descriptivas del ancho de las hojas para las plantas de tomate Cherry. 53	
Tabla 23 Estimación de la diferencia del ancho de las hojas para las plantas de tomate Cherry.	53
Tabla 24. Datos recolectados del peso de las plantas.....	54
Tabla 25 Estadísticas descriptivas del ancho de las hojas para las plantas de albahaca.	55
Tabla 26 Estimación de la diferencia del ancho de las hojas para las plantas de albahaca.....	55
Tabla 27 Estadísticas descriptivas del ancho de las hojas para las plantas de tomate Cherry. 55	
Tabla 28 Estimación de la diferencia del ancho de las hojas para las plantas de tomate Cherry.	55
Tabla 29 Datos recolectados del número de hojas.	56
Tabla 30 Media del número de hojas para las plantas de albahaca y tomate Cherry.....	56
Tabla 31 Datos recolectados del número de primordios foliares.	58
Tabla 32 Media del número de primordios foliares para las plantas de albahaca y tomate Cherry.	58
Tabla 33 Resistencias calculadas para cada arreglo de LEDs.....	74

Lista de Figuras

Figura 1 Diagrama fenotipado. 17

Figura 2 Plantas de tomate Cherry crecidas bajo diferentes ambientes. 18

Figura 3 LEDS recomendados para cultivos de luz artificial..... 22

Figura 4. Distribución espectral relativa de diferentes fuentes de iluminación artificial..... 25

Figura 5 PCB del módulo LED en el software Eagle para el tratamiento con luz artificial. ... 26

Figura 6 PCBs de los módulos LED para el tratamiento con luz artificial. 27

Figura 7 Configuración de las conexiones para cada uno de los LEDS. 28

Figura 8 Tarjeta de desarrollo ESP32-WROOM-32..... 28

Figura 9 Esquemático de conexiones para el sistema de control. 29

Figura 10 Aplicativo web desarrollado para el control de los LEDS y el fotoperiodo..... 30

Figura 11 Diagrama de flujo para funcionamiento del temporizador. 31

Figura 12 Sistema de potencia para el control de las luces LED. 32

Figura 13 Diagrama de conexiones en la parte de potencia para el sistema de iluminación LED.
..... 33

Figura 14 Montaje de los módulos LED sobre la tabla..... 34

Figura 15 Sistema prototipo de iluminación LED. 35

Figura 16 Placa de desarrollo ESP32-CAM..... 36

Figura 17 Diagrama de conexiones del sistema de monitoreo..... 37

Figura 18 Diagrama de flujo simplificado del funcionamiento del sistema de monitoreo. 38

Figura 19 Sistema de monitoreo instalado dentro del laboratorio. 40

Figura 20 Sistema de monitoreo ubicado en el exterior..... 40

Figura 21 Recipientes con las semillas de albahaca y tomate Cherry sembradas en el sustrato.	42
.....	42
Figura 22 Plántulas de tomate Cherry en el día 9 del experimento.	42
Figura 23 Plántulas de albahaca en el día 9 del experimento.....	43
Figura 24 Plantas en luz natural y plantas bajo el sistema prototipo de iluminación.	44
Figura 25 Medida de altura planta de tomate Cherry.....	45
Figura 26 Medida del largo y ancho de la hoja de albahaca.	48
Figura 27. Largo de la raíz para las plantas de tomate Cherry y albahaca.	54
Figura 28 Primordios foliares en la planta de albahaca.	57
Figura 29 Vista lateral de las plantas de tomate Cherry y albahaca en el día 30 del experimento.	60
.....	60
Figura 30 Vista superior de las plantas de tomate Cherry y albahaca en el día 30 del experimento	60
.....	60
Figura 31 Vista superior de las plantas de albahaca en el día 50 del experimento.	61
Figura 32 Vista lateral de las plantas de tomate Cherry en el día 50 del experimento.	61
Figura 33 Esquemático reductor de tensión LM2596.	71
Figura 34 Diagrama para el sistema en lazo cerrado.	72
Figura 35 Diagrama de conexiones para el sistema de control en lazo cerrado.....	75

Lista de Apéndices

Apéndice A Código para el control de las luces LED mediante PWM programado en Arduino IDE..... 69

Apéndice B Código del sistema de monitoreo programado en Arduino IDE..... 69

Apéndice C Código para control de corriente haciendo uso de sensores de corriente INA219.
..... 69

Apéndice D Programa MATLAB para hallar R2 y R3 para el control de buck converter. 69

Apéndice E Video presentación del proyecto. 69

Apéndice F Diseño control de corriente en lazo cerrado. 70

Resumen

Título: Desarrollo de un sistema prototipo para la conducción experimental del fenotipado y el monitoreo del crecimiento de plantas con el uso de luces leds en condiciones de laboratorio. *

Autor: Juan Sebastián Garavito Ballesteros, Samuel David Angulo Ruiz. **

Palabras Clave: LEDs, Fenotipado, Plantas, Automatización, Sensores, Monitoreo.

Descripción: Se desarrolló el prototipo de un sistema de iluminación LED enfocado al crecimiento de plantas para la conducción experimental del fenotipado de las mismas. Para lograrlo se contempló una distribución dividida por arreglos de LEDs con longitudes de onda de 450nm, 535nm, 620nm y 720nm; para estos se implementó un sistema que permite regular la intensidad lumínica para cada arreglo por separado mediante un aplicativo web para así obtener la proporción de luz deseada. De igual forma, el aplicativo permite seleccionar la hora de encendido y apagado de los LEDs dependiendo del fotoperiodo que se quiera implementar en el crecimiento de la planta, además, se planteó el diseño de un sistema de control en lazo cerrado para mantener constante la corriente que circula por cada arreglo de LEDs por si llega a presentarse alguna falla en alguno de ellos. Por otro lado, se desarrolló el sistema de monitoreo de las condiciones ambientales de la planta como lo son la humedad relativa y temperatura, para llevar registro de en qué condiciones se desarrolló la planta. Este sistema prototipo se puso a prueba utilizando dos especies de rápido crecimiento, como lo son el tomate Cherry y la albahaca, bajo condiciones lumínicas de luz natural y el sistema de iluminación LED para así comparar el crecimiento de las plantas a partir de su peso y dimensiones.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de e Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Jaime Guillermo Barrero Pérez MSc. en Ingeniería Electrónica. Codirector: Nelson Facundo Rodríguez López DSc. en Fisiología Vegetal.

Abstract

Title: Develop of a prototype system for the experimental conduct of phenotyping and monitoring of plant growth using LED lighting under laboratory conditions *

Author: Juan Sebastián Garavito Ballesteros, Samuel David Angulo Ruiz.**

Key Words: LEDs, Phenotyping, Plants, Automatization, Sensors, Monitoring.

Description: A prototype of a LED lighting system focused on the growth of different types of plants for phenotyping was developed. To achieve this, a distribution divided by arrays of LEDs with wavelengths of 450nm, 535nm, 620nm, and 720nm was considered. A control system was implemented to regulate the luminous intensity for each array separately through a web page in order to obtain the desired light proportion. Similarly, this web page allows the selection of the on and off time of the LEDs depending on the photoperiod to be implemented for the plant growth. Additionally, a closed loop control system design was proposed to maintain a constant current flowing through each LED array in case that any of them fails. On the other hand, the system for monitoring the plant's environmental conditions, such as relative humidity and temperature, was developed to keep track of the conditions under which the plant was developed. This prototype system was tested using two fast-growing species, such as Cherry tomatoes and basil, under natural light conditions and under the LED lighting system to compare plant growth which was determined from its weight and dimensions.

* Bachelor Thesis

** Faculty of Physical and Mechanical Engineering, School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Director: Jaime Guillermo Barrero Pérez MSc. in Electronic Engineering. Codirector: Nelson Facundo Rodríguez López DSc. in Vegetal Physiology.

Introducción

En los últimos años, la demanda alimenticia ha presentado un alza debido al aumento de la población mundial; recientes estudios demográficos han proyectado que, al ritmo de natalidad actual, la demanda de alimentos puede doblarse a mediados de siglo. Por otro lado, algunos factores que afectan la producción de alimentos provienen del ámbito político, ambiental, económico y en algunos casos social, “son algunas de las causas de que hoy tengamos menos comida disponible en un mundo donde cada segundo hay que alimentar 2.5 bocas más” (*Crecimiento demográfico y crisis alimentaria*, 2019).

Para cubrir esta demanda se han buscado diversas alternativas, desde el aumento del área de cultivo, un mayor uso de fertilizantes, el uso de pesticidas y herbicidas, incluso modificaciones genéticas en los cultivos; sin embargo, estas soluciones acarrear consigo problemáticas adicionales, considerando que la necesidad de una mayor área para el cultivo requiere destruir ecosistemas para ser transformados en suelo productivo, lo que influye directamente en la deforestación (*The causes of deforestation*, s/f); además, un mayor uso de fertilizantes deteriora la calidad del suelo a cultivar, haciéndolo menos productivo en el futuro (Andreas, s/f); de igual forma, la utilización de cultivos genéticamente modificados (GMO) trae riesgos para las especies nativas de plantas, además de efectos adversos en la salud de las personas (Prakash et al., 2011), así mismo, el uso de pesticidas trae consigo efectos negativos en la salud de las personas, afectando el sistema respiratorio, reproductivo, endocrino, entre otros (Nicolopoulou-Stamati et al., 2016).

Teniendo esto en cuenta, se busca una solución más amigable con el medio ambiente y que tenga un menor impacto en la salud humana; para ello, como primer acercamiento a combatir esta problemática, se busca desarrollar un primer sistema prototipo de iluminación artificial con luces LEDs para la conducción experimental del fenotipado y el monitoreo de las condiciones

ambientales de crecimiento de plantas con ayuda de diferentes sensores como lo son de humedad relativa y de temperatura.

Gracias a que los LEDs cubren un amplio rango de longitudes de onda, se puede favorecer el desarrollo de la planta alterando la proporción de las diferentes longitudes de onda que inciden en esta (Olle & Viršile, 2013), ya que las necesidades lumínicas de la planta varían dependiendo de los fotorreceptores que esta posea (Morrow, 2008).

Este proyecto documenta el proceso de desarrollo de un primer prototipo de sistema de iluminación artificial con luces LEDs de diferentes longitudes de onda para favorecer el desarrollo de las plantas, además, se verifica su desempeño por medio de una prueba experimental, en donde se monitorean variables ambientales como la temperatura y la humedad relativa.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Desarrollar un sistema prototipo para la conducción experimental del fenotipado y el monitoreo del crecimiento de plantas con el uso de luces LEDS en condiciones de laboratorio.

1.2 Objetivos Específicos

- Diseñar un sistema de control para regular la intensidad de los LEDS usados en el crecimiento de las plantas.
- Desarrollar el sistema de sensores de humedad y temperatura para la recolección de datos de las condiciones ambientales de la planta.
- Realizar pruebas experimentales con dos especies de rápido crecimiento y comparar su desempeño bajo el sistema prototipo y en ambiente natural (Luz natural).
- Determinar el crecimiento de las plantas con base en su peso y dimensiones.

2. Marco Referencial

2.1 Terminología relacionada.

A continuación, se presenta una lista de términos relevantes utilizados en el desarrollo del proyecto.

2.1.1 Fotón

Es la unidad básica de la luz, los fotones son considerados tanto partículas como ondas, y no tienen masa ni carga. Son responsables de muchas de las propiedades de la luz, incluyendo su intensidad, energía y longitud de onda.

2.1.2 Longitud de onda

Es la distancia en la que se repite la forma de la onda (periodo de la onda) y se relaciona con la cantidad de energía que posee un fotón. Los rayos de luz con longitud de onda más corta se perciben como azules y violetas, mientras que los de longitud de onda más larga se perciben como rojos.

2.1.3 Radiación fotosintéticamente activa (*PAR Photosynthetically Active Radiation*)

Hace referencia al rango de longitudes de onda de luz que es requerido por las plantas para realizar la fotosíntesis, este rango comprende alrededor de los 400nm hasta los 700nm (Blakey, 2018).

2.1.4 Flujo de fotones fotosintéticos (*PPF Photosynthetic Photon Flux*)

Es la cantidad de fotones de radiación fotosintéticamente activa (PAR) que produce un LED por segundo, esta medida se expresa en $\mu\text{mol s}^{-1}$ (Blakey, 2018).

2.1.5 Densidad de flujo de fotones fotosintéticos (*PPFD Photosynthetic Photon Flux Density*)

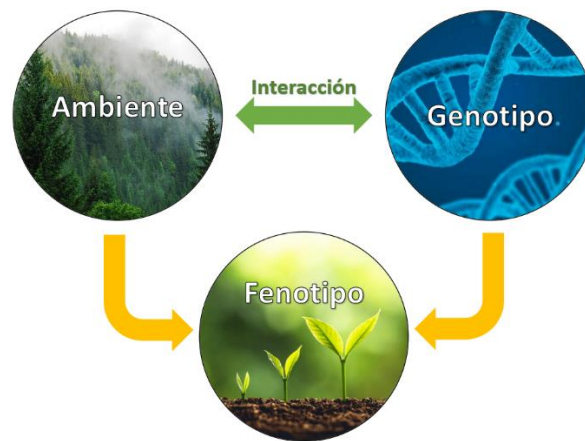
Es la cantidad de fotones de radiación fotosintéticamente activa (PAR) que abarcan un área de un metro cuadrado por segundo, esta medida se expresa en $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (Blakey, 2018). Para medir la intensidad de esta se necesita de un dispositivo especializado llamado sensor PAR, el cual permite medir la PPFD que le llega a la planta ubicándolo a la altura de las hojas.

2.2 Fenotipado en plantas.

El fenotipado en plantas es la práctica de alterar el fenotipo (conjunto de características observables) de una planta. El fenotipo de una planta se ve influenciado por el genotipo (información genética) y el impacto que tiene el ambiente sobre esta (Boggess et al., 2013), en otras palabras, el fenotipo es el resultado de cómo responde el desarrollo la planta (genotipo) al ambiente en el que se encuentra.

Figura 1

Diagrama fenotipado.



El fenotipado se logra cambiando alguna de esas dos características: el genotipo o el ambiente. Algunas características físicas de interés son el peso de la planta, la forma de las hojas, el color de las hojas, la morfología de las raíces, entre otras; así mismo características más complejas como

la resistencia a enfermedades. En agricultura, el fenotipado es de especial interés pues se utiliza para identificar rasgos deseables en las plantas de cultivo e identificar qué condiciones conllevan a ese desarrollo de la planta.

Figura 2

Plantas de tomate Cherry desarrolladas bajo diferentes fuentes de iluminación.



Tomado de Liu Xiaoying (2012).

Nota. Tratamiento de luz con: C, Lámpara de Disprosio; R, LEDs rojos; B, LEDs azules; O, LEDs naranjas; G, LEDs verdes; RB, LEDs rojos y azules; RBG, LEDs rojos, azules y verdes.

2.2.1 Fotoperiodo

El fotoperiodo es el tiempo durante el cual las plantas reciben luz del día en un periodo de 24h, este factor puede variar dependiendo del lugar del planeta donde se encuentre, siendo de 12h en las zonas cercanas al ecuador (como es el caso de Colombia) y que va aumentando o disminuyendo a medida que se aleja de este dependiendo en que hemisferio se encuentre, esto debido a la

inclinación de la tierra, dando lugar a lo que normalmente se conoce como las estaciones (Jackson, 2009).

Este juega un rol importante dentro de varios procesos biológicos como la germinación y floración de las plantas, además, les permite “predecir” los cambios ambientales que ocurrirán a lo largo del año y así estas pueden prepararse para ellos (Song et al., 2013). El ofrecer un mayor fotoperiodo promueve el crecimiento de las plantas aumentando el tamaño de sus hojas y su peso en seco, sin embargo, no todas las plantas responden de la misma forma a este factor y pueden verse afectadas al exponerse a un fotoperiodo mayor al necesario (Adams & Langton, 2005); es por ello por lo que se debe seleccionar un fotoperiodo adecuado para un desarrollo óptimo de la planta.

En este caso el fotoperiodo más adecuado para obtener una mayor eficiencia es de 12h para el tomate Cherry (Son et al., 2018) y de 18h para la albahaca (Sipos et al., 2021), sin embargo, se seleccionó un fotoperiodo de 12h debido a la ubicación geográfica de Colombia, en donde a lo largo del año se mantiene relativamente similar la cantidad de horas de sol, en este caso de 12h, por lo tanto, para mantener un tiempo de exposición a la luz similar en ambos grupos se utilizó este mismo para las plantas creciendo bajo el sistema de iluminación LED al interior del laboratorio bajo el tratamiento de luz LED.

2.2.2 Contextualización de iluminación en cultivos.

La disminución de la luz solar que reciben las plantas durante las diferentes épocas del año influye directamente en su crecimiento, lo que hace necesario el utilizar fuentes de luz artificial para poder suplir la falta de esta; las lámparas fluorescentes y de sodio a alta presión son las más utilizadas en este campo (Morrow, 2008); no obstante, este tipo de lámparas emiten una gran cantidad de calor y no son tan eficientes energéticamente, lo que repercute en un mayor gasto

económico durante estos meses, de igual forma, en épocas del año donde no es necesario el calor generado por este tipo de lámparas se vuelve necesario el implementar otros sistemas para regular la temperatura lo cual hace menos eficiente el proceso (Katzin et al., 2021).

En los últimos años, la tecnología LED ha ganado popularidad por su bajo costo de producción, eficiencia energética y poca irradiación de calor, debido a su superioridad en estos aspectos con respecto a las lámparas tradicionalmente utilizadas para la iluminación artificial de plantas, ha sido objeto de estudio para ser candidato a reemplazarlas (Morrow, 2008).

2.2.3 Iluminación con diferentes longitudes de onda en cultivos

Varios estudios enfocados al uso de iluminación LED en horticultura han encontrado correlación entre las longitudes de onda a la que es expuesta la planta y las características morfo estructurales de la misma, en donde se concluye que las necesidades lumínicas de la planta se conforman de una combinación de luces de diferentes longitudes de onda para fomentar su desarrollo (Liu Xiaoying, 2012), además, esto depende de los fotorreceptores específicos que cada planta posea (Xiaoying et al., 2011). Como se observa en la Tabla 1, se realiza la comparativa del efecto de diferentes tratamientos de luz LED sobre las características morfológicas de las plantas de tomate Cherry, mostrando un mayor desarrollo para las plantas tratadas con luz RB (roja y azul) y RGB (roja, verde y azul), manteniendo la relación entre la altura y el diámetro del tallo, con su peso en seco.

Tabla 1

Efectos morfológicos y de crecimiento en las plantas de tomate Cherry al ser irradiadas por luces LED.

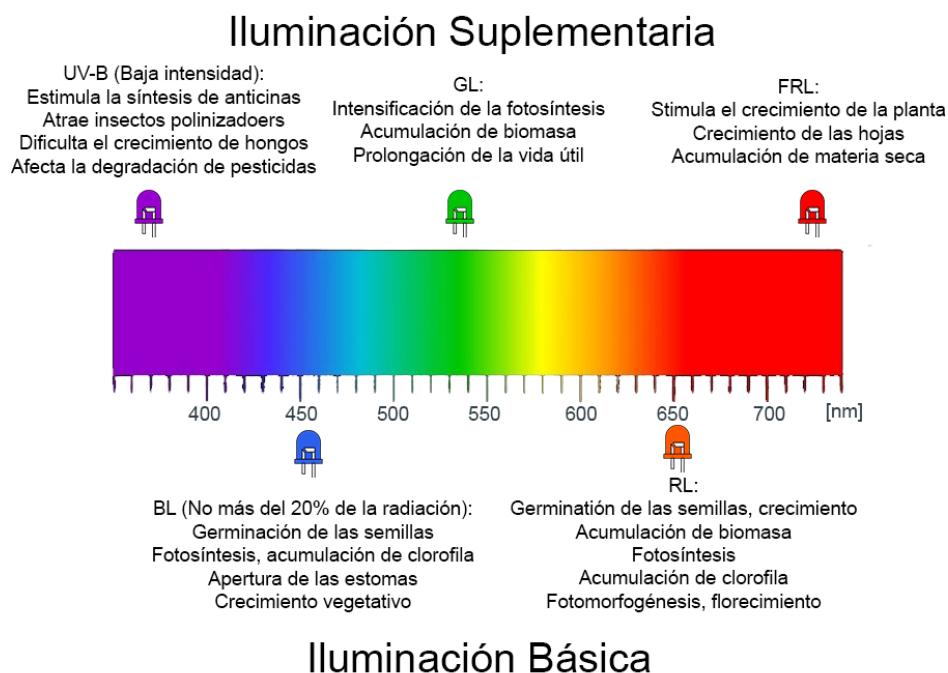
Tratamiento de luz	Alto de la planta (cm)	Diámetro del tallo (cm)	Área de las hojas (cm) ²	Peso en fresco (g)	Peso en seco(g)	Contenido de agua (%)	Índice de salud
C	12,5	3,1	9,83	3,34	0,31	91	0,075
R	19,2	2,9	5,26	2,14	0,2	91	0,03
B	12,8	3,2	7,26	4,32	0,45	90	0,113
O	17,2	2,9	4,87	1,82	0.14	92	0,022
G	16,1	2,9	5,13	2,42	0,2	92	0,035
RB	9,8	3	5,62	2,92	0,31	89	0,094
RGB	8,5	3,2	5,92	2,46	0,25	90	0,093

Nota. Tratamiento de luz con: C, Lámpara de Disprosio; R, LEDs rojos; B, LEDs azules; O, LEDs naranjas; G, LEDs verdes; RB, LEDs rojos y azules; RGB, LEDs rojos, azules y verdes. Tomado de Liu Xiaoying (2012).

En la Figura 3 se puede apreciar como diferentes rangos del espectro estimulan diferentes características del desarrollo de la planta, dividiendo estos rangos en iluminación básica, que es la necesaria para suplir las necesidades básicas para que la planta se desarrolle (Luz azul y roja), e iluminación suplementaria, para estimular otras características de la planta (UV, Luz verde e Infrarroja).

Figura 3

LEDS recomendados para cultivos de luz artificial.



Adaptado de Zakurin et al (2020).

Dentro de la radiación PAR se encuentra la luz roja, comprendida entre 630nm y 660nm de longitud de onda, en donde se ha evidenciado un aumento en el área de la hoja, la acumulación de biomasa y la altura de la planta para cultivos de tomate y albahaca (Marie Wollaeger & Runkle, 2014; Sipos et al., 2021).

De igual forma, estudios realizados en plantas de tomate Cherry y albahaca han comprobado que la luz azul, comprendida entre 400nm y 500nm de longitud de onda, aumenta la fotosíntesis, favorece al desarrollo de hojas más gruesas, ayuda a un mejor desarrollo de los cloroplastos, e influye dentro del funcionamiento fotosintético de la hoja (Sipos et al., 2021; Xiaoying et al., 2011).

Así mismo, la luz verde, comprendida entre 500nm y 600nm de longitud de onda, es utilizada como luz complementaria, por lo tanto es combinada con luz roja y azul para potenciar el

crecimiento de la planta, aumentar su biomasa, esto debido a que parte de esta luz atraviesa el follaje superficial y permite que sea utilizada por las hojas debajo de este para la fotosíntesis, además que permite un fácil monitoreo del desarrollo de la planta al darle un color más perceptible para el ojo humano (Chase Snowden, 2015; H.-H. Kim et al., 2004).

Por otro lado, las longitudes de onda fuera del PAR por si solas no tienen ningún efecto significativo sobre el desarrollo de las plantas, sin embargo, en combinación con longitudes de onda dentro del PAR se encontró que la luz infrarroja, comprendida entre 720nm y 740nm de longitud de onda, ayuda a potenciar los procesos fotosintéticos que realizan las longitudes de onda dentro del PAR sobre las plantas (Zhen & van Iersel, 2017).

Para las longitudes de onda por debajo de los 400nm como la luz ultravioleta, comprendida entre 280nm y 400nm de longitud de onda, han sido pocos los estudios realizados pues estas ondas tienen efectos en la salud humana desde quemaduras y bronceados hasta cáncer de piel, de igual forma, en las cantidades incorrectas puede dañar la planta causándole mutaciones; sin embargo, recientes estudios han encontrado que estas ondas en bajas dosis pueden favorecer la acumulación de biomasa, ayudar a la producción de ciertas moléculas como antioxidantes e incrementar la resistencia a insectos, patógenos y hongos (Blakey, 2018; Loconsole & Santamaria, 2021). Estas ondas aún son altamente experimentales para su uso de manera segura en cultivos, por esta razón, se decidió no usar luces LED ultravioleta en este proyecto.

3. Sistema de iluminación LED

A lo largo de esta sección se encuentran las diferentes etapas del desarrollo del sistema de iluminación con LEDs.

3.1 Tratamiento de luz

Para el desarrollo del sistema prototipo de luz artificial, como primera instancia, se seleccionaron los LEDs a utilizar en base a las longitudes de onda, el flujo de fotones que cada uno de estos proporciona y su precio comparándolo con varios LEDs similares en el mercado. Se utilizaron 4 tipos de LEDs, rojo (R), azul (A), verde (V) e infrarrojo (IR), cada uno con picos en sus longitudes de onda en 620nm, 450nm, 535nm y 720nm respectivamente, en la Tabla 2 se observa un resumen de las características de cada LED seleccionado.

Tabla 2

Datos de los LEDs.

Color LED	Tensión [V]	Longitud de onda [nm]	Flujo de fotones [umol/s]	Flujo radiante [mW]	Precio (COP)	Fabricante	Referencia
Rojo	2.2	620	1.85 @150mA	-	1528	Ams OSRAM	GR JTLPS1.23-G7H4-45-1
Azul	3.2	450	-	250 @150mA	2453	Wurth Elektronik	150283DS73103
Verde	2.85	535	0.86 @350mA	-	5278	Cree LED	XQEGRN-00-0000-000000B01
Infrarrojo	2.16	720	0.58	95 @150mA	4981	Broadcom/Avago	ASMW-L300-AFH0E

Nota. En esta tabla se resumen las características encontradas en la hoja de datos de los LEDs seleccionados.

Al momento de trabajar con luces LED es de vital importancia entender que la intensidad de luz que emiten es función de la intensidad de corriente que circula a través de ellos, a su vez, esta

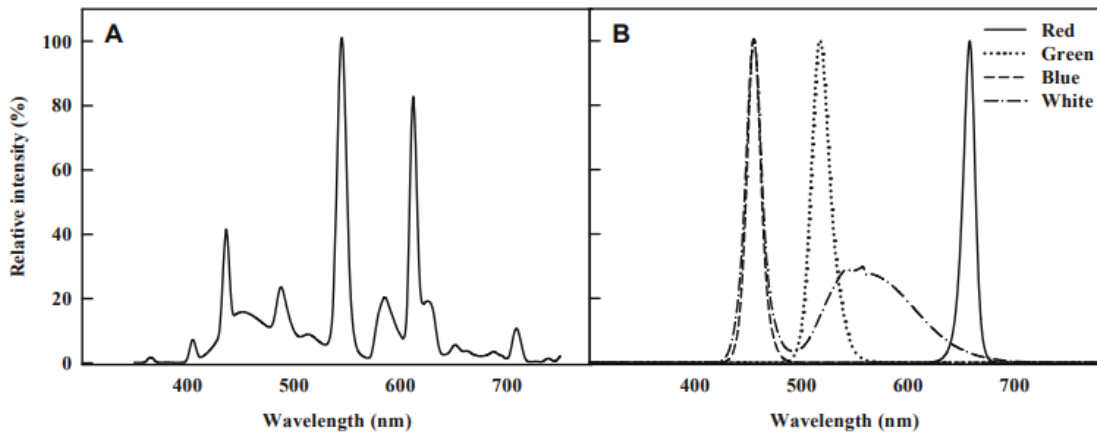
intensidad de corriente es determinada por la diferencia de tensión aplicada en los terminales de los LEDS.

Para que un LED permita el flujo de corriente a través de él es importante que este se encuentre bien polarizado, es decir, que el ánodo (por lo general el pin largo o el pad más grande del LED) se encuentre a un mayor potencial eléctrico que el cátodo (por lo general el pin más corto o el pad más pequeño del LED) y que esta diferencia de potencial sea suficiente para que el semiconductor permita el flujo de electrones a través de él.

Un aspecto a destacar de los LEDS es la flexibilidad que tienen de emitir luz en diferentes longitudes de onda o de emitir luz monocromática como se observa en la Figura 4, esto permite que puedan ser utilizados en aplicaciones específicas, además de poder combinar varios tipos de LEDS para generar un espectro que abarque las necesidades de cada aplicación (E. Y. Kim et al., 2014); esto es posible gracias a los diferentes materiales con los que pueden ser fabricados.

Figura 4.

Distribución espectral relativa de diferentes fuentes de iluminación artificial.



Nota. Se muestra la distribución espectral relativa de una lámpara fluorescente (A) y varios LEDS monocromáticos (B). Tomado de E. Y. Kim et al. (2014).

3.1.1 Circuito del módulo LED

Haciendo uso del software gratuito Eagle de Fusion 360 se diseñó una PCB en la cual, para obtener la proporción deseada, se utilizó una relación de LEDs de 3R:1A:1V:1IR como se observa en la Figura 5, esta proporción se escogió con base en los estudios previos (Blakey, 2018; Chase Snowden, 2015; Liu Xiaoying, 2012; Nguyen et al., 2022; Sipos et al., 2021) y de las cuales se hicieron 6 módulos, para un total de 18R:6A:6V:6IR como se evidencia en la Figura 6.

Debido a que el software no contaba con el diseño de los pads para cada uno de los LEDs SMD a utilizar, fue necesario diseñarlos a partir de las medidas proporcionadas por la hoja de datos de los fabricantes.

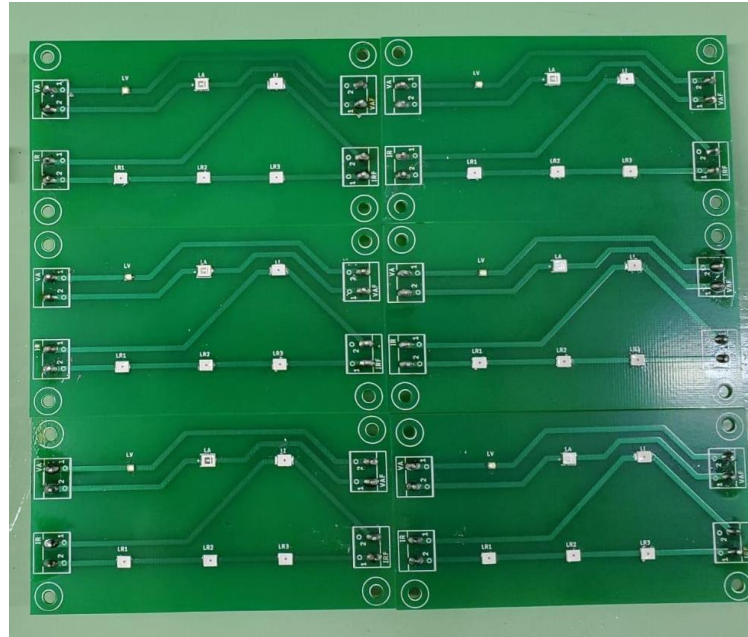
Figura 5

PCB del módulo LED en el software Eagle para el tratamiento con luz artificial.



Figura 6

PCBs de los módulos LED para el tratamiento con luz artificial.

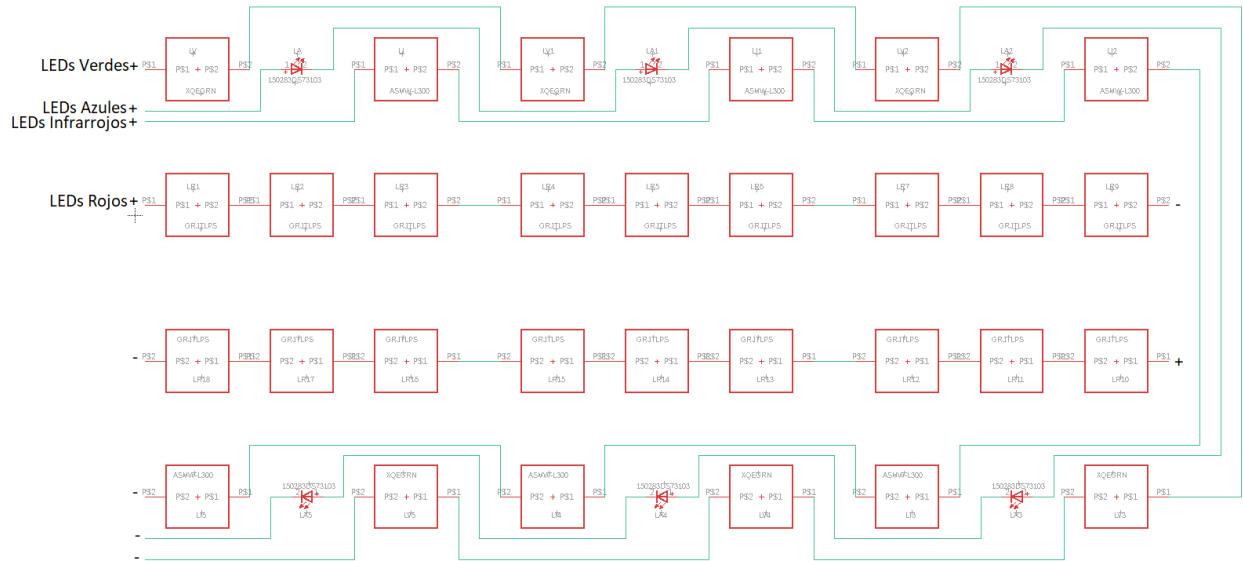


3.1.2 Configuración de los LEDs

Luego de esto, se planteó la configuración de las conexiones entre los módulos para cada rama de LEDs, conectando en serie los 6 módulos para los LEDs (A), (V) e (IR) y para los LEDs (R) se conectaron en paralelo dejando 3 módulos en serie por rama como se observa en la Figura 7.

Figura 7

Configuración de las conexiones para cada uno de los LEDs.



Nota. Para la configuración de LEDs cabe recalcar que cada módulo trae 3 LEDs rojos.

3.2 Sistema de control implementado

Figura 8

Tarjeta de desarrollo ESP32-WROOM-32.



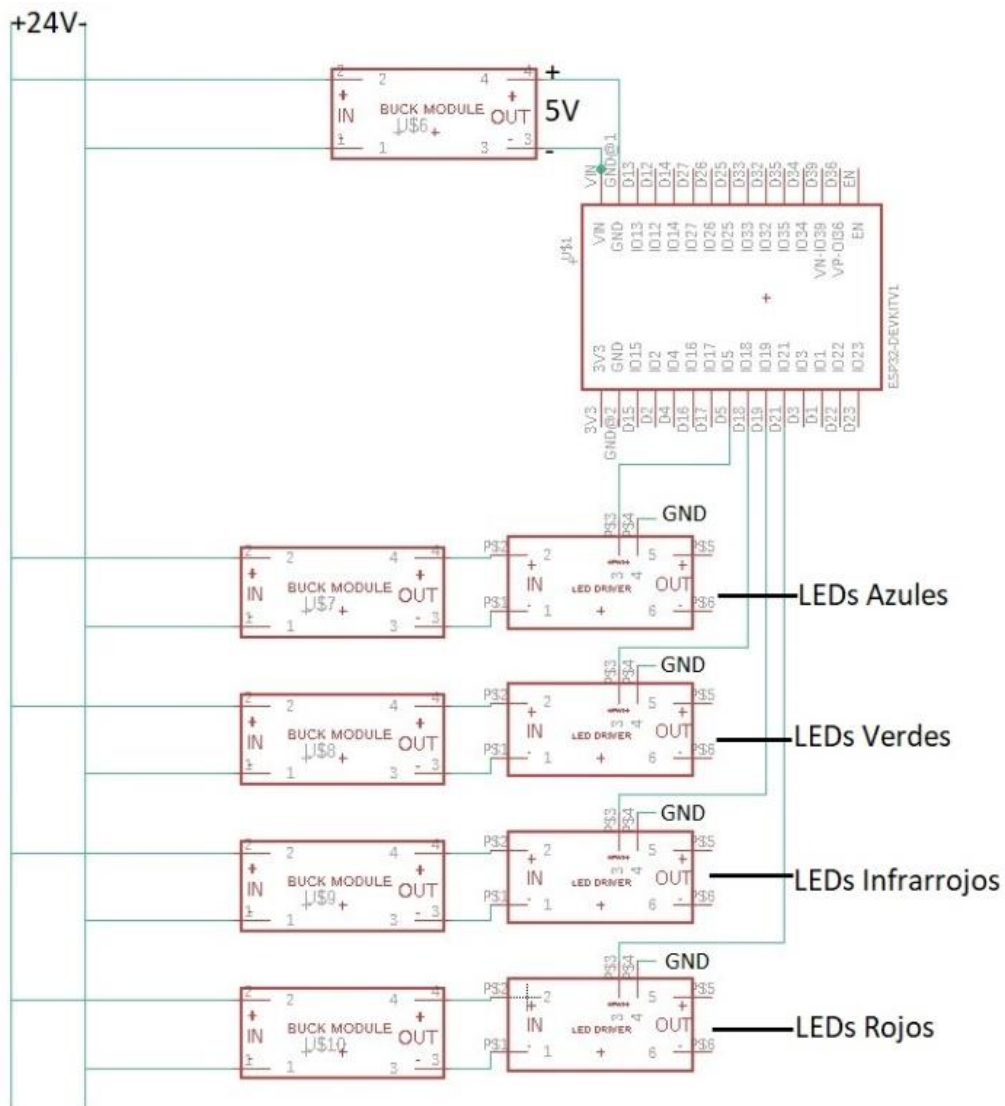
Tomado de Tarjeta de Desarrollo ESP32 modulo Wifi Bluetooth ESP-32 (s/f)

Una forma de variar la intensidad lumínica de los LEDs es aplicando una señal PWM, la cual puede ser generada fácilmente con un microcontrolador, en este caso se utilizó una tarjeta de desarrollo ESP32-WROOM-32 debido a que posee un temporizador de 64 bits, esto es de gran

utilidad para cronometrar el tiempo transcurrido a lo largo del día y ajustar el fotoperiodo de las plantas, posee 36 pines de propósito general GPIO lo que permite flexibilidad al manejar las señales de entrada y salida para cada rama de LEDs, posee un módulo WiFi lo cual permite enviar y recibir información de forma inalámbrica para ajustar así diferentes señales o variables de control, además de su bajo costo. Las señales PWM generadas por el microcontrolador se conectan a los LED driver como se observa en la Figura 9.

Figura 9

Esquemático de conexiones para el sistema de control.



Para modificar individualmente el ciclo de trabajo de las señales PWM que controlarán la intensidad lumínica de cada rama de LEDs se desarrolló un aplicativo web, el cual permite ajustar dicha intensidad mediante sliders. Para ello, primero se debe conectar a la red generada por la ESP32 llamada "TestWebSite" e ingresar la clave preestablecida "12345678", una vez se estableció la conexión se digita en el buscador del navegador la dirección IP "192.168.1.1" y así aparecerá en el navegador el aplicativo web desarrollado, como se observa en la Figura 10. Cabe recalcar que el nombre de la red, contraseña y dirección IP se pueden modificar en el código del Apéndice A.

Figura 10

Aplicativo web desarrollado para el control de los LEDs y el fotoperiodo.

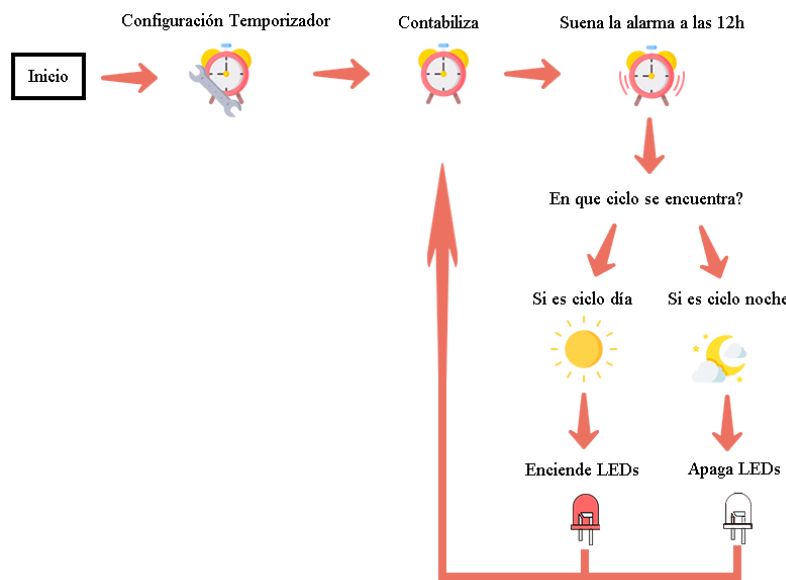


Por otro lado, el microcontrolador también se debe encargar de generar el fotoperiodo necesario para el desarrollo de la planta mencionado en la sección 2.2.1 Fotoperiodo, para ello se configuró uno de los temporizadores internos que posee la ESP32-WROOM-32, este será el encargado de contabilizar el tiempo transcurrido desde que se enciende el microcontrolador y así generar una

interrupción cada cierto tiempo para cambiar el estado de los LEDs, ya sea a encendido o apagado dependiendo del ciclo de día o noche que se necesite, mediante el aplicativo web se puede seleccionar la hora de encendido y apagado de los LEDs dependiendo del fotoperiodo deseado y pulsando el botón de enviar se inicia el ciclo configurado por el usuario. Cabe recalcar que el código implementado se programó utilizando el entorno de desarrollo Arduino IDE (*Arduino Integrated Development Environment (IDE) v1*, 2019) y este se puede encontrar en el Apéndice A.

Figura 11

Diagrama de flujo para funcionamiento del temporizador.



Nota. Diagrama de flujo simplificado del funcionamiento del temporizador para simular el fotoperiodo de 12h.

Durante la implementación del fotoperiodo se toma la hora local del dispositivo que se conectó al aplicativo web como referencia para configurar los temporizadores del microcontrolador y así garantizar que los LEDs se enciendan y se apaguen a la hora deseada.

Adicionalmente se diseñó un sistema de control en lazo cerrado, el cual busca mantener una corriente constante para cada arreglo de LEDs, este se puede encontrar en el Apéndice F.

3.3 Circuito de alimentación

Las salidas analógicas del microcontrolador no proporcionan la suficiente potencia para encender el arreglo de LEDs, para ello se diseñó el sistema de potencia; sabiendo que cada arreglo de LEDs no consumiría más de 20V se decidió alimentar el circuito con un adaptador de 24V, fue necesario utilizar reductores de tensión para ajustar las tensiones requeridas por cada arreglo de LEDs, estas fueron ajustadas a 18V, 18.6V, 16.8V y 11V para los LEDs (R), (A), (V) y (IR) respectivamente.

Se decidió utilizar el módulo reductor de tensión LM2596 debido a su rango de voltajes de salida que van desde los 1.2V hasta 37V, capaz de suministrar hasta 3A de corriente de salida, además de que es bastante comercial.

Figura 12

Sistema de potencia para el control de las luces LED.

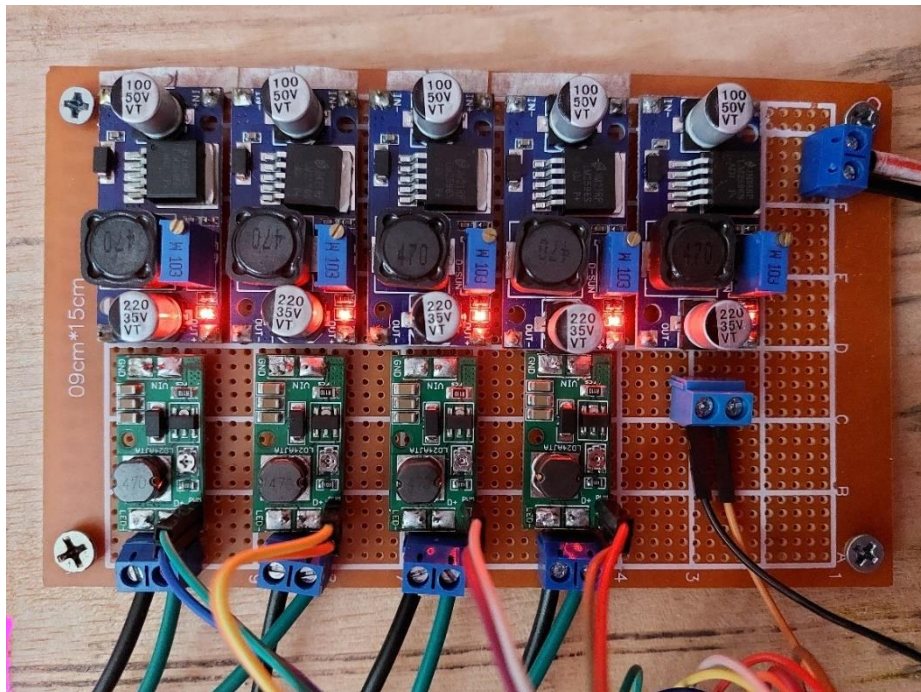
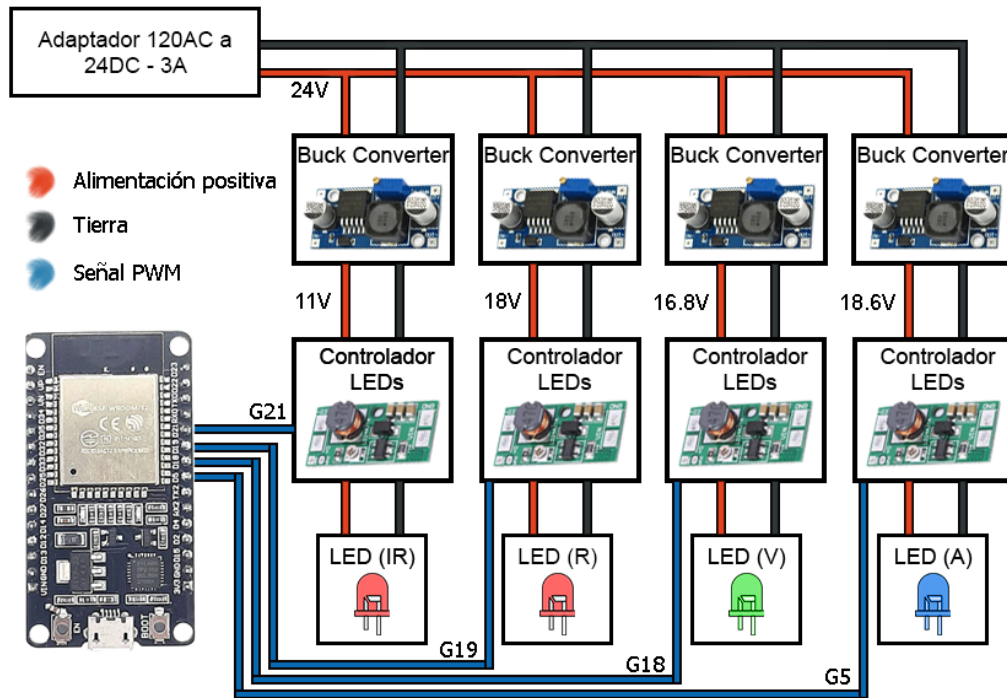


Figura 13

Diagrama de conexiones en la parte de potencia para el sistema de iluminación LED.



Además, se utilizaron LED Drivers los cuales serán los encargados de limitar la intensidad de corriente que circulará por cada rama, este último será el mediador entre el sistema de control y el sistema de potencia, ya que al conectarle la señal PWM generada por el microcontrolador, aumentará o disminuirá la intensidad lumínica de los LEDs, al variar el ciclo de trabajo de esta. Los LED Drivers seleccionados fueron los LD24AJTA los cuales trabajan entre 6V y 25V, entregando corrientes de hasta 900mA.

3.4 Montaje del sistema de iluminación

Los módulos LED se ubicaron sobre una tabla de 32cm x 140cm de forma equidistante con una separación de 7cm entre cada módulo, para así abarcar una mayor área, mantener una intensidad lumínica uniforme.

Figura 14

Montaje de los módulos LED sobre la tabla.



Una vez realizadas las conexiones como se indicó en la Figura 7, se sujetaron tubos de PVC de 150cm de largo con varias abrazaderas a cada una de las patas de una parrilla de metal de 126cm x 96cm, proporcionada por el laboratorio de fisiología vegetal; luego se realizaron perforaciones a los tubos a una distancia de 90cm, 50cm y 25cm con respecto a las hojas superiores de las plantas de tomate Cherry y albahaca, donde utilizando palos de madera, se sujetaron dos tablas de 15cm x 100cm las cuales servirán de soporte para la tabla que posee el sistema de iluminación LED, como se observa en la Figura 15.

Esta configuración se realizó para mantener una radiación uniforme en un área de 32cm*120cm, esto debido a que justo debajo de los módulos LED se encuentra la mayor concentración de luz, es por esto por lo que se acomodaron los módulos lo más juntos posible para irradiar uniformemente una mayor área; con otras configuraciones se podría irradiar una mayor área, pero no se podría garantizar una radiación uniforme sobre esta.

Figura 15

Sistema prototipo de iluminación LED.



4. Sistema de monitoreo

Para corroborar que se tienen condiciones ambientales similares de crecimiento para los dos grupos de plantas, como lo son la humedad relativa y la temperatura, es necesario mantener un monitoreo constante de estas dos variables, tanto en el exterior del laboratorio con las plantas de control, como con las que se encuentra creciendo dentro del laboratorio bajo el sistema de iluminación LED.

4.1 Tarjeta de desarrollo

Para esto se diseñó un sistema de monitoreo utilizando dos ESP32-CAM, esta tarjeta de desarrollo se seleccionó debido a que posee integrada una ranura para microSD, lo cual es de gran utilidad para guardar los datos de humedad relativa y temperatura recolectados por el sensor;

además, esta tiene integrada una cámara la cual puede ser utilizada para tomar fotos de la planta e ir documentando el crecimiento de esta, de igual forma, posee antena integrada para conexión por Wifi o Bluetooth, esto y su bajo costo la hacen un buen candidato para esta tarea.

Figura 16

Placa de desarrollo ESP32-CAM.



Tomado de Módulo ESP32 Con Cámara OV2640 WiFi-Bluetooth ESP32CAM (s/f)

4.2 Sensores

Los sensores son dispositivos que pueden transformar las señales de diferente naturaleza en señales eléctricas, estas pueden ser tratadas para ser analizadas, lo cual es de gran utilidad, pues permite conocer el estado de algunas variables a sensar, observar cómo se comportan y poder llevar un registro de ellas. Para este proyecto es de especial interés monitorear la humedad relativa y la temperatura del ambiente donde se encuentra la planta.

Para la selección del sensor se tuvieron en cuenta algunos parámetros como lo son la tensión de alimentación, el rango de temperatura y humedad relativa, su precisión y su precio; teniendo esto en cuenta se compararon dos sensores comerciales muy utilizados que permiten sensar temperatura y humedad relativa al mismo tiempo, estos son el DHT11 y el DHT22.

Tabla 3

Características de los sensores de temperatura y humedad relativa.

Tipo	Alimentación [V]	Rango temperatura [°C]	Rango humedad relativa [%]	Resolución temperatura [°C]	Resolución humedad relativa [%]	Precio (COP)
DHT11	3,5 a 5	0 a 50 ± 2	20 a 90 ± 5	0,1	1	12000
DHT22	3 a 6	-40 a 80 ± 0.5	0 a 100 ± 2	0,1	0.1	35000

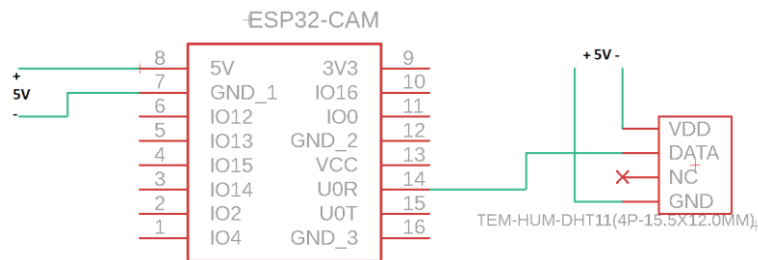
A pesar de que el DHT22 posee mejores características que el DHT11, se consideró que para la aplicación no es necesario que el sensor sea especialmente sensible, ni que posea una mayor resolución, además, teniendo en cuenta el rango de temperatura y humedad relativa del área metropolitana de Bucaramanga se optó que el sensor más conveniente en este caso es el DHT11 debido a que se pueden prescindir de las características superiores del DHT22 a causa de su costo.

4.3 Diseño del sistema

Una vez fueron seleccionados el microcontrolador y el sensor de temperatura y humedad relativa se realizó el diseño del módulo de monitoreo utilizando como base una protoboard de 40mm * 29mm y siguiendo el diagrama de conexiones de la Figura 17 se obtuvo un módulo compacto.

Figura 17

Diagrama de conexiones del sistema de monitoreo.

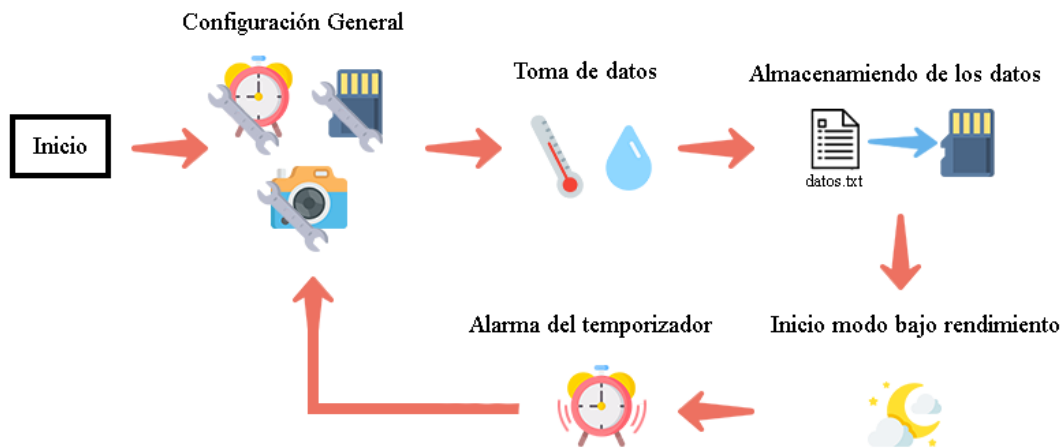


4.4 Algoritmo

Una vez se realizó el montaje del módulo de monitoreo se utilizó Arduino IDE para programar el microcontrolador. El algoritmo para el funcionamiento de este se puede subdividir en 4 pasos, configuración, toma de datos, almacenamiento de datos y el inicio del modo de bajo consumo, como se puede observar en el diagrama de la Figura 18. Cabe recalcar que el código completo implementado se encuentra en el Apéndice B.

Figura 18

Diagrama de flujo simplificado del funcionamiento del sistema de monitoreo.



En la configuración se realizó la inicialización tanto de la tarjeta μ SD, como del temporizador, la memoria flash que simulará una EEPROM y del sensor de humedad relativa y temperatura, así mismo, se configuraron los parámetros de brillo, contraste y saturación de la cámara para conseguir una imagen óptima en ambos escenarios de estudio.

Una vez todo fue configurado, se toman los datos del sensor de humedad relativa y temperatura, estos son almacenados en una cadena de caracteres separados por comas, esto para que resulte más sencillo el procesamiento de los datos al finalizar el experimento. Luego de esto se captura una

foto con la cámara integrada en la tarjeta de desarrollo y se define el nombre que tendrá esta foto teniendo en cuenta el valor guardado en la memoria flash que indica el número de la foto.

Luego de haber recolectado los datos, se inicia la comunicación con la tarjeta μ SD y se guardan los datos recolectados del sensor en un archivo de texto y la foto se almacena con el nombre definido en el paso anterior.

Al haber completado esta etapa, el microcontrolador entra en estado de bajo consumo para que el sistema consuma menos energía, esto lo que hace es desactivar varias funciones de la tarjeta para entrar en un “sueño profundo” en donde estará a la espera de una señal que le avise cuando debe volver a activarse, en este caso la señal será dada por el temporizador configurado previamente en el primer paso, el cual dará la señal para activarse cada hora. Debido a que el microcontrolador pierde todas las variables guardadas en la memoria volátil al entrar en el estado de bajo consumo, fue necesario utilizar la memoria flash, ya a que esta es un tipo de memoria no volátil, lo cual permite almacenar el número de la foto en la que se encuentra antes de entrar a este estado.

4.5 Montaje del sistema de monitoreo

Con los módulos listos, se ubicó uno de ellos dentro del laboratorio de fisiología vegetal apuntando hacia las plantas que se encontraban bajo el sistema de iluminación LED, siendo este alimentado por los mismos 5V DC que proporciona el conversor reductor que alimenta a la ESP32-WROOM-32 del sistema de control como se observa en la Figura 19, por otro lado, el segundo módulo de monitoreo se ubicó apuntando hacia las plantas creciendo bajo la luz solar, siendo este alimentado por un adaptador de 5V DC, sin embargo, fue necesario protegerlo de la lluvia utilizando un recipiente de plástico, como se observa en la Figura 20.

Figura 19

Sistema de monitoreo instalado dentro del laboratorio.

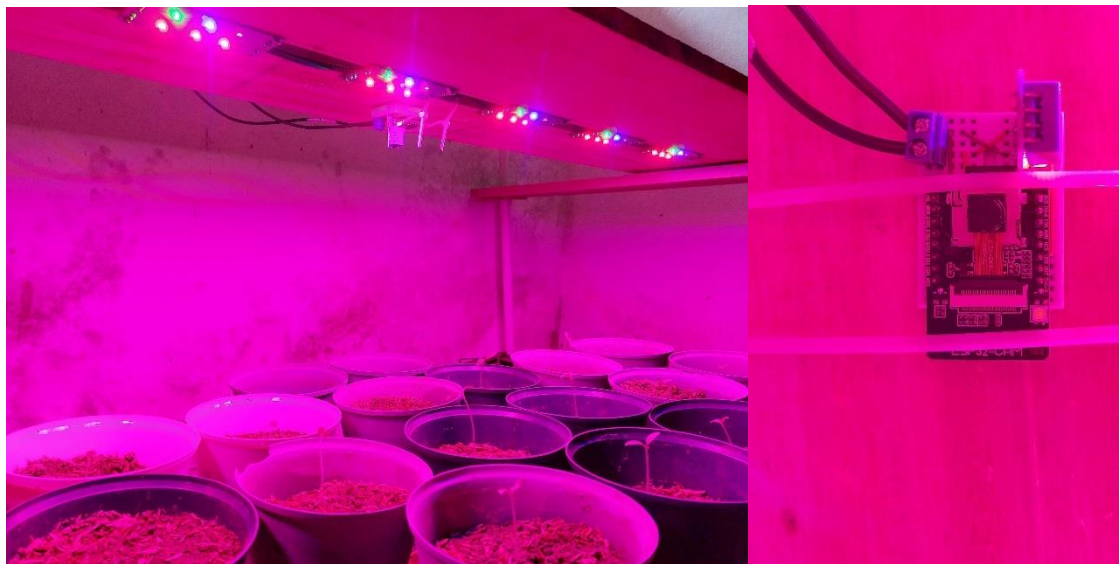


Figura 20

Sistema de monitoreo ubicado en el exterior.



5. Pruebas experimentales

Para las pruebas experimentales se trabajó con dos especies de plantas, la mitad de cada especie bajo el sistema de iluminación artificial y la otra mitad bajo luz natural, durante un periodo de 50 días.

5.1 Selección de plantas

Para el experimento se utilizaron semillas de tomate Cherry y albahaca (ANASAC), se escogieron estas plantas debido a que pueden crecer en los climas cálidos y templados presentes en el área metropolitana de Bucaramanga, además, son cultivos de rápido crecimiento, donde el tomate Cherry demora de 60 a 80 días y la albahaca de 30 a 60 días después de la siembra, esto es ideal para el desarrollo del experimento debido a que se pueden observar cambios sustanciales en pequeños periodos de tiempo, de igual forma, se tuvo en cuenta las dimensiones de la planta debido a que estas no pueden sobrepasar las dimensiones del sistema prototipo con luz artificial.

Para dar inicio al experimento se colocaron 48 semillas de cada especie en 2 bandejas de 33cm x 44cm, dejando una separación de 5.5cm entre cada una y con sustrato para la germinación como se observa en la Figura 21; 5 días después germinaron los primeros brotes de albahaca y en el día 6 los de tomate Cherry.

Figura 21

Recipientes con las semillas de albahaca y tomate Cherry sembradas en el sustrato.



Figura 22

Plántulas de tomate Cherry en el día 9 del experimento.



Figura 23

Plántulas de albahaca en el día 9 del experimento.



5.2 Condiciones de crecimiento

En el día 9 se trasplantaron 20 plántulas de cada especie en recipientes de plástico de 14cm x14cm x 12cm, con una tierra compuesta por 3 partes de tierra orgánica, 1 parte de abono orgánico, 1 parte de cascarilla de arroz y 1 parte de arena, de las cuales 10 se ubicaron al aire libre en la unidad de crecimiento y eco fisiología vegetal (UCEV) como grupo de control y las 10 restantes bajo el tratamiento de luz LED proporcionado por el sistema prototipo dentro del laboratorio de fisiología vegetal de la Universidad Industrial de Santander UIS.

Figura 24

Plantas en luz natural y plantas bajo el sistema prototipo de iluminación.



Estas continuaron creciendo durante 41 días en condiciones de temperatura y humedad relativa de $25.7 \pm 1.3^{\circ}\text{C}$ y $63.8 \pm 7.5\%$ para las plantas de adentro y de $24.7 \pm 6.07^{\circ}\text{C}$ y $62.8 \pm 17.2\%$ para las de afuera, estos datos fueron recolectados por el sistema de monitoreo; además, se utilizó un fotoperiodo de 12h, esto se hizo configurando el temporizador del sistema de monitoreo mencionado en la sección 4.4 Algoritmo. Por otro lado, el PPFD varió entre las plantas creciendo bajo la luz solar y aquellas creciendo bajo el tratamiento de luz, el cual fue de $1205 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y $16 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ respectivamente, este fue medido utilizando un sensor PAR (HOBO, s/f), en donde para obtener este PPFD con el tratamiento de luz LED fue necesario ubicar los módulos con una separación de 25cm entre este y la hoja superior de la planta, logrando así irradiar un área de $32\text{cm} \times 120\text{cm}$.

6. Resultados

6.1 Toma de datos

En el día 50 del experimento se procedió a realizar la medición de las características en los dos grupos de plantas para su comparación. Durante el desarrollo del experimento dos de las plantas de tomate Cherry y tres plantas de albahaca que se encontraba bajo el sistema de luz artificial, así como dos plantas de tomate Cherry que se encontraban bajo luz natural se marchitaron. Adicionalmente, haciendo uso del software Excel, se realizó un análisis estadístico para las características que se consideraron pertinentes; para determinar una diferencia significativa entre los datos se hace uso del intervalo de confianza del 95% con un $\alpha = 5\%$ para la diferencia de las medias de los datos provisto por el software, si el intervalo de confianza contiene la hipótesis nula $\mu_1 - \mu_2 = 0$, es decir, que la diferencia de las medias de los conjuntos de datos sea 0, no se puede garantizar una diferencia significativa entre las características de los dos grupos a analizar.

6.1.1 Longitud del tallo

Para la medición de la longitud del tallo se tomó la medida con una regla desde el suelo hasta donde inician las hojas como se observa en la Figura 25. Las medidas tomadas se presentan en la Tabla 4.

Figura 25

Medida de altura planta de tomate Cherry.



Tabla 4

Datos recolectados de la altura de los tallos.

Número de planta	Altura [cm]			
	Albahaca		Tomate Cherry	
	LED	Natural	LED	Natural
1	3,1	2,5	7,7	6,8
2	3,2	3,5	7	5
3	2,5	3,5	4,3	9,5
4	4,2	3,6	5,3	5,3
5		4	3	6
6	3,4	4,8	3,5	7,5
7		3,3	5,2	8,3
8		3		5
9	3,3	3	5	
10	2,6	5,3		

Se realizó el análisis estadístico para calcular los valores promedio para la altura del tallo, la desviación y el error estándar como se observa en la Tabla 5.

Tabla 5

Estadísticas descriptivas de la altura del tallo para las plantas de albahaca.

Muestra	N	Media[cm]	Desv.Est.
LED	7	3,1857	0,5640
Natural	10	3,65	0,8502

Nota. Donde N representa el número de muestras.

Tabla 6

Estimación de la diferencia de la altura del tallo para las plantas de albahaca.

Diferencia	IC de 95% para la diferencia
-0,4643	(-2,2173; 1,2888)

Nota. Donde IC representa el intervalo de confianza.

Debido a que la hipótesis nula se encuentra contenida en el intervalo de confianza de la Tabla 6, no se puede considerar una diferencia significativa en la altura del tallo de las plantas de albahaca con un nivel de confianza del 95%.

A continuación, se muestra el análisis estadístico para la longitud del tallo de las plantas de tomate Cherry.

Tabla 7

Estadísticas descriptivas de la altura del tallo para las plantas de tomate Cherry.

Muestra	N	Media[cm]	Desv.Est.
LED	8	5,125	1,6051
Natural	8	6,675	1,6594

Nota. Donde N representa el número de muestras.

Tabla 8

Estimación de la diferencia de la altura del tallo para las plantas de tomate Cherry.

Diferencia	IC de 95% para la diferencia
-1,5500	(-3,3113; 0,2113)

Debido a que la hipótesis nula se encuentra contenida en el intervalo de confianza de la Tabla 8, no se puede considerar una diferencia significativa en la altura del tallo de las plantas de tomate Cherry con un nivel de confianza del 95%.

6.1.2 Largo de las hojas

Se tomaron las medidas del largo de las hojas con una regla, empezando la medida desde la punta de la hoja hasta donde esta se une con el tallo como se muestra en la Figura 26. Este proceso se repitió para cada grupo de las plantas utilizadas en el experimento y se presentaron los datos en la Tabla 9.

Figura 26

Medida del largo y ancho de la hoja de albahaca.

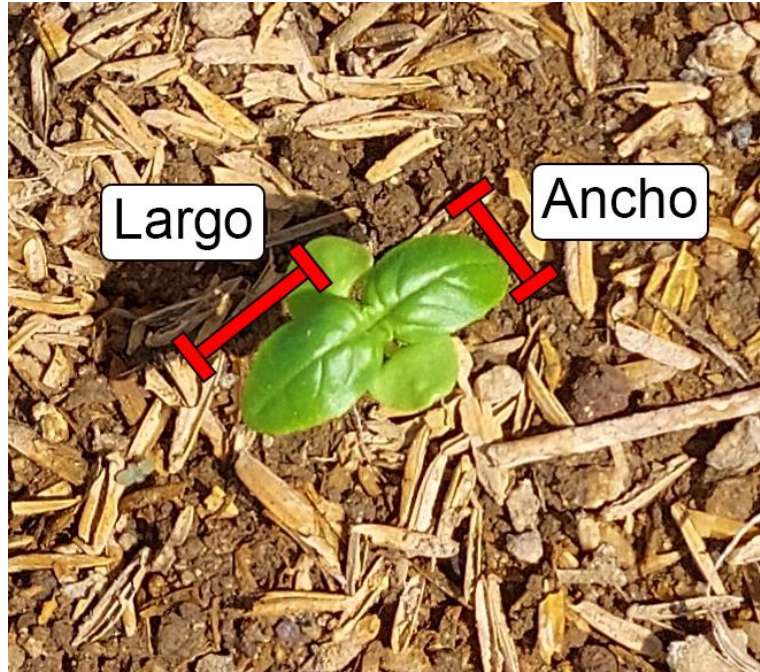


Tabla 9

Datos recolectados del largo de las hojas.

Número de planta	Largo hoja [cm]			
	Albahaca		Tomate Cherry	
	LED	Natural	LED	Natural
1	0,6	1,5	1,5	2,2
2	0,5	1,5	2	1,5
3	0,5	2	1,3	1,2
4	0,7	1,7	1,7	1,3
5		2	1,5	1,5
6	0,6	2,6	1,7	1,7
7		2	2	2,1
8		1,5		2
9	0,6	1,3	1,3	
10	0,6	2,9		

Tabla 10

Estadísticas descriptivas del largo de las hojas para las plantas de albahaca.

<u>Muestra</u>	<u>N</u>	<u>Media[cm]</u>	<u>Desv.Est.</u>
LED	7	0,5857	0,0690
Natural	10	1,9	0,5164

Nota. Donde N representa el número de muestras.

Tabla 11

Estimación de la diferencia del largo de las hojas para las plantas de albahaca.

<u>Diferencia</u>	<u>IC de 95% para la diferencia</u>
-1,3143	(-3,1474; 0,5188)

Nota. Donde IC representa el intervalo de confianza.

Debido a que la hipótesis nula se encuentra contenida en el intervalo de confianza de la Tabla 11 no se puede considerar una diferencia significativa para el largo de las hojas de las plantas de albahaca.

A continuación, se presenta el mismo proceso para el largo de las hojas de las plantas de tomate Cherry.

Tabla 12

Estadísticas descriptivas del largo de las hojas para las plantas de tomate Cherry.

<u>Muestra</u>	<u>N</u>	<u>Media[cm]</u>	<u>Desv.Est.</u>
LED	8	1,625	0,2765
Natural	8	1,6875	0,3758

Nota. Donde N representa el número de muestras.

Tabla 13

Estimación de la diferencia del largo de las hojas para las plantas de tomate Cherry.

<u>Diferencia</u>	<u>IC de 95% para la diferencia</u>
-0,0625	(-1,8334; 1,7084)

Nota. Donde IC representa el intervalo de confianza.

No hay evidencia para rechazar la hipótesis nula, debido a que esta se encuentra contenida en el intervalo de confianza de la Tabla 13, se puede considerar que no hay diferencia significativa para el largo de las hojas de las plantas de tomate Cherry.

6.1.3 Ancho de las hojas

Se tomaron las medidas del ancho de las hojas con una regla, esta se tomó en la parte más ancha de la hoja como se observa en la Figura 26. Este proceso se repitió para cada grupo de plantas utilizadas en el experimento y se registraron los datos en la Tabla 14.

Tabla 14

Datos recolectados del ancho de las hojas.

Número de planta	Ancho [cm]			
	Albahaca		Tomate Cherry	
	LED	Natural	LED	Natural
1	0,9	0,8	0,6	1
2	1	1	0,6	0,5
3	0,9	1,2	0,5	1,2
4	1	0,8	0,5	0,6
5		1,3	0,5	0,7
6	0,9	1,6	0,5	0,8
7		1	0,5	1,2
8		0,9		1,2
9	1	1	0,5	
10	1	1,6		

Tabla 15

Estadísticas descriptivas del ancho de las hojas para las plantas de albahaca.

Muestra	N	Media[cm]	Desv.Est.
LED	7	0,9571	0,0535
Natural	10	1,12	0,2974

Nota. Donde N representa el número de muestras.

Tabla 16

Estimación de la diferencia del ancho de las hojas para las plantas de albahaca.

<u>Diferencia</u>	<u>IC de 95% para la diferencia</u>
-0,1629	(-1,9753; 1,6496)

Nota. Donde IC representa el intervalo de confianza.

Debido a que la hipótesis nula se encuentra contenida en el intervalo de confianza de la Tabla 16, no se puede considerar una diferencia significativa para el ancho de las hojas de las plantas de albahaca con un nivel de confianza del 95%.

El mismo proceso se realizó para las plantas de tomate Cherry.

Tabla 17

Estadísticas descriptivas del ancho de las hojas para las plantas de tomate Cherry.

<u>Muestra</u>	<u>N</u>	<u>Media[cm]</u>	<u>Desv.Est.</u>
LED	8	0,525	0,0463
Natural	8	0,9	0,2878

Nota. Donde N representa el número de muestras.

Tabla 18

Estimación de la diferencia del ancho de las hojas para las plantas de tomate Cherry.

<u>Diferencia</u>	<u>IC de 95% para la diferencia</u>
-0,3750	(-2,2696; 1,5196)

Nota. Donde IC representa el intervalo de confianza.

Debido a que la hipótesis nula se encuentra contenida en el intervalo de confianza de la Tabla 18 no se puede considerar una diferencia significativa para el ancho de las hojas de las plantas de tomate Cherry.

6.1.4 Peso

Se tomaron las medidas del peso de la planta utilizando una balanza electrónica, la planta se ubicó dentro del plato de medición para tomar la medida. Este proceso se repitió para cada grupo de plantas utilizadas en el experimento y se registraron los datos en la Tabla 19.

Tabla 19.

Datos recolectados del peso de las plantas.

Número de planta	Peso de la planta [g]			
	Albahaca		Tomate Cherry	
	LED	Natural	LED	Natural
1	0,04851	0,1883	0,1311	1,1117
2	0,0807	0,2592	0,1226	0,2804
3	0,0636	0,3651	0,0951	2,2411
4	0,0547	0,3207	0,1043	0,3583
5		0,4166	0,0723	0,5392
6	0,0468	1,3854	0,0888	0,9693
7		0,3573	0,1252	2,0297
8		0,2361		0,3991
9	0,06798	0,2965	0,0878	
10	0,0508	1,0879		

Tabla 20

Estadísticas descriptivas del peso para las plantas de albahaca.

Muestra	N	Media[g]	Desv.Est.
LED	7	0,0590	0,0124
Natural	10	0,4913	0,4045

Nota. Donde N representa el número de muestras.

Tabla 21

Estimación de la diferencia del peso para las plantas de albahaca.

Diferencia	IC de 95% para la diferencia
-0,4323	(-2,2654; 1,4008)

Nota. Donde IC representa el intervalo de confianza.

Debido a que la hipótesis nula se encuentra contenida en el intervalo de confianza de la Tabla 21, no se puede considerar una diferencia significativa para el peso de las plantas de albahaca con un nivel de confianza del 95%.

El mismo proceso se realizó para las plantas de tomate Cherry.

Tabla 22

Estadísticas descriptivas peso para las plantas de tomate Cherry.

Muestra	N	Media[g]	Desv.Est.
LED	8	0,1034	0,0211
Natural	8	0,9911	0,7669

Nota. Donde N representa el número de muestras.

Tabla 23

Estimación de la diferencia del peso para las plantas de tomate Cherry.

Diferencia	IC de 95% para la diferencia
-0,8877	(-2,7823; 1,0069)

Nota. Donde IC representa el intervalo de confianza.

Debido a que la hipótesis nula se encuentra contenida en el intervalo de confianza de la Tabla 32 no se puede considerar una diferencia significativa para el peso de las plantas de tomate Cherry.

6.1.5 Largo de la raíz

Se tomaron las medidas del largo de la raíz utilizando una regla, la medida se tomó desde donde finaliza el tallo hasta el final de la raíz como se observa en la Figura 27. Este proceso se repitió para cada grupo de plantas utilizadas en el experimento y se registraron los datos en la Tabla 24.

Figura 27.

Largo de la raíz para las plantas de tomate Cherry y albahaca.



Tabla 24.

Datos recolectados del peso de las plantas.

Número de planta	Largo de la raíz [cm]			
	Albahaca		Tomate Cherry	
	LED	Natural	LED	Natural
1	3,7	11,5	10	22
2	4	9,2	8	21
3	3,4	11,5	8	19
4	3,5	16,2	9	25
5		11	8	22
6	4	19,5	7,5	19
7		10,5	9	26,3
8		13,5		11,5
9	3,9	19	14	
10	4	14		

Tabla 25

Estadísticas descriptivas del largo de la raíz para las plantas de albahaca.

<u>Muestra</u>	<u>N</u>	<u>Media[cm]</u>	<u>Desv.Est.</u>
LED	7	3,7857	0,2545
Natural	10	13,59	3,5816

Nota. Donde N representa el número de muestras.

Tabla 26

Estimación de la diferencia del largo de la raíz para las plantas de albahaca.

<u>Diferencia</u>	<u>IC de 95% para la diferencia</u>
-9,8043	(-11,6374; -7,9712)

Nota. Donde IC representa el índice de confianza.

Debido a que la hipótesis nula no se encuentra contenida en el intervalo de confianza de la Tabla 26, se puede considerar una diferencia significativa para el largo de la raíz de las plantas de albahaca con un nivel de confianza del 95%, donde el largo de la raíz de las plantas bajo luz natural es mayor que el de las plantas bajo el sistema de luz artificial.

El mismo proceso se realizó para las plantas de tomate Cherry.

Tabla 27

Estadísticas descriptivas largo de la raíz para las plantas de tomate Cherry.

<u>Muestra</u>	<u>N</u>	<u>Media[cm]</u>	<u>Desv.Est.</u>
LED	8	9,1875	2,1034
Natural	8	20,7250	4,5314

Nota. Donde N representa el número de muestras.

Tabla 28

Estimación de la diferencia del largo de la raíz para las plantas de tomate Cherry.

<u>Diferencia</u>	<u>IC de 95% para la diferencia</u>
-11,5375	(-13,35; -9,725)

Nota. Donde IC representa el intervalo de confianza.

Debido a que la hipótesis nula no se encuentra contenida en el intervalo de confianza de la Tabla 28 se puede considerar una diferencia significativa para el largo de la raíz de las plantas de tomate Cherry con un nivel de confianza del 95%, donde el largo de la raíz de las plantas bajo luz natural es mayor que el de las plantas bajo el sistema de luz artificial.

6.1.4 Número de hojas

Para ello se contó el número de hojas más desarrolladas que posee cada una de las plantas y se registraron los datos en la Tabla 29.

Tabla 29

Datos recolectados del número de hojas.

Número de planta	Número de hojas			
	Albahaca		Tomate Cherry	
	LED	Natural	LED	Natural
1	2	4	5	16
2	2	6	4	7
3	2	6	4	28
4	2	6	4	10
5		8	4	11
6	2	8	4	15
7		6	4	22
8		6		9
9	2	6	3	
10	2	8		

Para el número de hojas no se realizó un análisis estadístico debido a que no existe varianza alguna en los datos de las plantas desarrolladas bajo iluminación LED, por lo tanto, se manejó el promedio de hojas de cada grupo de plantas para realizar la comparativa.

Tabla 30

Media del número de hojas para las plantas de albahaca y tomate Cherry.

Media número de hojas			
Albahaca		Tomate Cherry	
LED	Natural	LED	Natural
2	6,4	4	14,75

Como se observa en la Tabla 30 el promedio de hojas fue mayor para los dos tipos de plantas desarrollados bajo iluminación natural.

6.1.5 Número de primordios foliares

Los primordios foliares son estructuras tempranas de hojas que se desarrollan en la zona de origen de las hojas de una planta, estos luego de un tiempo crecen para transformarse en una hoja completa. Se contaron el número de primordios foliares creciendo cerca del tallo de las plantas como se observa en la Figura 28.

Figura 28

Primordios foliares en la planta de albahaca.



Tabla 31

Datos recolectados del número de primordios foliares.

Número de planta	Número de primordios foliares			
	Albahaca		Tomate Cherry	
	LED	Natural	LED	Natural
1	0	2	2	2
2	2	0	2	2
3	0	2	2	3
4	0	0	2	2
5	2	0	2	2
6	0	0	2	2
7	0	0	2	1
8	0	0	2	2
9	0	0	2	
10	2	0		

Para el número de primordios foliares no se realizó un análisis estadístico debido a que no existe varianza alguna en los datos de las plantas desarrolladas bajo iluminación LED, por lo tanto, se manejó el promedio de primordios foliares de cada grupo de plantas para realizar la comparativa.

Tabla 32

Media del número de primordios foliares para las plantas de albahaca y tomate Cherry.

Media número de primordios foliares			
Albahaca		Tomate Cherry	
LED	Natural	LED	Natural
3,5	7,375	2	1,4

Como se observa en la Tabla 32 el promedio de primordios foliares no presentó una diferencia significativa para las plantas de tomate Cherry y fue mayor para las plantas de albahaca creciendo bajo luz natural.

6.2 Discusión de resultados

Como se observó en la toma de datos, las plantas de albahaca que se encontraban bajo el sistema de iluminación artificial presentan un menor largo de hojas, menor número de hojas, menos masa y raíces más cortas con respecto al grupo que se encontraba bajo luz natural; así mismo las plantas de tomate Cherry que se encontraban bajo el sistema de iluminación artificial presentaron menor masa, raíces más cortas y menor cantidad de hojas que el grupo de control creciendo bajo luz natural. Esto se debe a que las plantas bajo el sistema de iluminación artificial recibían menor densidad de flujo de fotones, $16 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, cuando el recomendado para un buen desarrollo de la planta es entre $180 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ y $500 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ para las plantas de albahaca (Sipos et al., 2021) y entre $50 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ y $450 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ para las plantas de tomate cherry (Fan et al., 2013), cuando esto sucede la planta tiende a modificar su morfología “estirándose” en busca de luz por lo cual no se presentó una diferencia significativa en la longitud de los tallos.

Adicionalmente se observó que las plantas bajo el sistema de iluminación LED presentan hojas de color verde claro, mientras que las plantas bajo luz natural presentan hojas de un color verde más oscuro como se puede observar en la Figura 29 y Figura 30.

Figura 29

Vista lateral de las plantas de tomate Cherry y albahaca en el día 30 del experimento.



Figura 30

Vista superior de las plantas de tomate Cherry y albahaca en el día 30 del experimento.

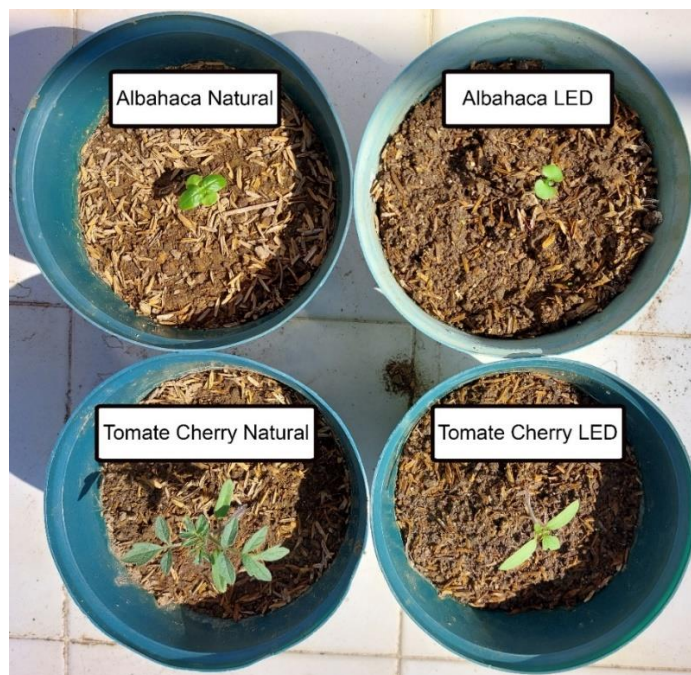


Figura 31

Vista superior de las plantas de albahaca en el día 50 del experimento.



Figura 32

Vista lateral de las plantas de tomate Cherry en el día 50 del experimento.



7. Conclusiones

En este trabajo de tesis se han podido aplicar los conocimientos adquiridos durante la carrera desarrollando un sistema prototipo para la conducción experimental del fenotipado en plantas con el uso de luces LEDs, así mismo, se logró implementar un sistema que permite monitorear las variables de temperatura y humedad relativa del entorno de las plantas.

El desarrollo de este sistema prototipo propone un punto de partida para ser utilizado en futuros proyectos y diseños de sistemas similares, ya que permite variar factores como lo son, el fotoperiodo, la proporción de luz de diferentes longitudes de onda, la altura a la que se encuentra el sistema iluminación de las plantas y la intensidad de cada arreglo de LEDs por separado mediante el sistema de control. Así mismo, el sistema es flexible si se desea modificar el diseño, mientras se sigan las restricciones del sistema de alimentación se pueden incluir una mayor cantidad de módulos de LEDs, variar la disposición de estos para ocupar una mayor área o proporcionar un mayor PPFD.

Con respecto a los resultados obtenidos en el experimento con las plantas de tomate Cherry y albahaca, como se esperaba, se observaron diferencias en la fisiología de ambos grupos debido a que se desarrollaron bajo diferentes niveles de PPFD, de igual forma, se comprobó que las plantas pueden crecer bajo un sistema de iluminación artificial con ausencia de luz natural.

A pesar de que el presupuesto y el tiempo fueron una gran limitante para este proyecto, fue posible cumplir los objetivos planteados, además de comprobar que las plantas pueden crecer en ausencia de luz natural con el sistema de iluminación artificial, el cual puede ser utilizado de manera complementaria a la luz solar para irradiar plantas en horas de la noche, siempre y cuando el sistema proporcione una PPFD adecuada.

8. Recomendaciones

Las luces LED SMD de alta potencia utilizadas en el experimento tienden a aumentar demasiado su temperatura al acercarse a los valores típicos de operación de corriente, por lo tanto, fue necesario limitar la tensión suministrada para evitar un aumento excesivo de la temperatura y evitar daños en la PCB o los LED, por lo tanto, se recomienda utilizar un disipador para así poder trabajar con los LEDs a una mayor potencia y poder suministrar una mejor PPF; otra alternativa para aumentar la PPF puede ser agregar más LEDS o acercar más el sistema de iluminación a las plantas a costa de reducir el área irradiada.

Debido a la flexibilidad del sistema, se pueden realizar futuros experimentos para comprobar los efectos de las luces monocromáticas presentadas en la sección 2.2.3 Iluminación con diferentes longitudes de onda en cultivos, manteniendo encendido un solo arreglo de LEDs y proporcionando un valor de PPF favorable para el crecimiento de las plantas.

Si se desean aprovechar aún más las funcionalidades de la ESP32 y ESP32-CAM, estas se pueden enlazar a un servidor en internet para que se puedan modificar la intensidad de los LEDs y el fotoperiodo, así como observar en tiempo real el monitoreo de las variables ambientales y la cámara de manera remota desde cualquier parte del mundo.

Para futuros experimentos se puede explorar la idea de agregar las luces ultravioletas, experimentar con diferentes fotoperiodos o irradiar las plantas con iluminación artificial y natural a la vez.

Referencias Bibliográficas

- Step-Down Switching Regulator*. (2004, octubre). AllDdatasheet. <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/134372/ETC1/LM2596.html>
- Adams, S. R., & Langton, F. A. (2005). Photoperiod and plant growth: a review. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 80(1), 2–10. <https://doi.org/10.1080/14620316.2005.11511882>
- Andreas. (s/f). *27 Decisive Pros & Cons Of Fertilizers*. Environmental Conscience. Recuperado el 27 de enero de 2023, de <https://environmental-conscience.com/fertilizer-pros-cons/>
- Arduino Integrated Development Environment (IDE) v1*. (2019, enero 19). Arduino. <https://docs.arduino.cc/software/ide-v1/tutorials/arduino-ide-v1-basics>
- Blakey, D. R. (2018). *LEDs-The Future of Horticultural Lighting*. https://www.wel-online.com/components/media/o120602v410%20AppNote_ANO002_TheFutureHorticultureLighting_EN.pdf
- Bogges, M. v., Lippolis, J. D., Hurkman, W. J., Fagerquist, C. K., Briggs, S. P., Gomes, A. v., Righetti, P. G., & Bala, K. (2013). The need for agriculture phenotyping: “Moving from genotype to phenotype”. En *Journal of Proteomics* (Vol. 93, pp. 20–239). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jprot.2013.03.021>
- Chase Snowden, M. (2015). *Effects of Blue and Green Light on Plant Growth and Development at Low and High Photosynthetic Photon Flux*. <https://digitalcommons.usu.edu/etd/4613>
- Crecimiento demográfico y crisis alimentaria*. (2019, mayo 23). InfoAgro. <https://mexico.infoagro.com/crecimiento-demografico-y-crisis-alimentaria>
- EAGLE / Fusion 360*. (s/f). Autodesk. Recuperado el 27 de enero de 2023, de <https://www.autodesk.com/products/eagle/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>

- Fan, X. X., Xu, Z. G., Liu, X. Y., Tang, C. M., Wang, L. W., & Han, X. lin. (2013). Effects of light intensity on the growth and leaf development of young tomato plants grown under a combination of red and blue light. *Scientia Horticulturae*, 153, 50–55. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.01.017>
- HOBO. (s/f). *HOBO - Photosynthetic Light (PAR) Smart Sensor*. OneTemp. Recuperado el 30 de enero de 2023, de [https://www.hobodataloggers.com.au/photosynthetic-light-par-smart-sensor-s-liam003#:~:text=HOBO%20%2D%20Photosynthetic%20Light%20\(PAR\)%20Smart%20Sensor,-Manufacturer%3A&text=The%20Photosynthetic%20Light%20\(PAR\)%20Smart,from%20400%20to%20700%20nm](https://www.hobodataloggers.com.au/photosynthetic-light-par-smart-sensor-s-liam003#:~:text=HOBO%20%2D%20Photosynthetic%20Light%20(PAR)%20Smart%20Sensor,-Manufacturer%3A&text=The%20Photosynthetic%20Light%20(PAR)%20Smart,from%20400%20to%20700%20nm)
- Jackson, S. D. (2009). Plant responses to photoperiod. *New Phytologist*, 181(3), 517–531. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02681.x>
- Katzin, D., Marcelis, L. F. M., & van Mourik, S. (2021). Energy savings in greenhouses by transition from high-pressure sodium to LED lighting. *Applied Energy*, 281. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116019>
- Kim, E. Y., Park, S. A., Park, B. J., Lee, Y., & Oh, M. M. (2014). Growth and antioxidant phenolic compounds in cherry tomato seedlings grown under monochromatic light-emitting diodes. *Horticulture Environment and Biotechnology*, 55(6), 506–513. <https://doi.org/10.1007/s13580-014-0121-7>
- Kim, H.-H., Goins, G. D., Wheeler, R. M., & Sager, J. C. (2004). Green-light Supplementation for Enhanced Lettuce Growth under Red-and Blue-light-emitting Diodes. En *HORTSCIENCE* (Vol. 39, Número 7).

- Liu Xiaoying. (2012). Regulation of the growth and photosynthesis of cherry tomato seedlings by different light irradiations of light emitting diodes (LED). *African Journal of Biotechnology*, 11(22). <https://doi.org/10.5897/ajb11.1191>
- Loconsole, D., & Santamaria, P. (2021). UV lighting in horticulture: A sustainable tool for improving production quality and food safety. En *Horticulturae* (Vol. 7, Número 1, pp. 1–13). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7010009>
- Marie Wollaeger, H., & Runkle, E. S. (2014). Growth of Impatiens, Petunia, Salvia, and Tomato Seedlings under Blue, Green, and Red Light-emitting Diodes. En *Ieperen and Trouwborst* (Vol. 49, Número 6). Watanabe.
- Módulo ESP32 Con Cámara OV2640 WiFi-Bluetooth ESP32CAM.* (s/f). Suconel. Recuperado el 27 de enero de 2023, de <https://suconel.com/product/modulo-esp32-con-camara-ov2640-wifi-bluetooth-esp32cam/>
- Morrow, R. C. (2008). *LED Lighting in Horticulture.*
- Nguyen, T. K. L., Cho, K. M., Lee, H. Y., Sim, H. S., Kim, J. H., & Son, K. H. (2022). Growth, Fruit Yield, and Bioactive Compounds of Cherry Tomato in Response to Specific White-Based Full-Spectrum Supplemental LED Lighting. *Horticulturae*, 8(4). <https://doi.org/10.3390/horticulturae8040319>
- Nicolopoulou-Stamati, P., Maipas, S., Kotampasi, C., Stamatis, P., & Hens, L. (2016). Chemical Pesticides and Human Health: The Urgent Need for a New Concept in Agriculture. *Frontiers in Public Health*, 4. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2016.00148>
- Olle, M., & Viršile, A. (2013). The effects of light-emitting diode lighting on greenhouse plant growth and quality. *Agricultural and Food Science*, 22(2), 223–234. <https://doi.org/10.23986/afsci.7897>

- Prakash, D., Verma, S., Bhatia, R., & Tiwary, B. N. (2011). Risks and Precautions of Genetically Modified Organisms. *ISRN Ecology*, 2011, 1–13. <https://doi.org/10.5402/2011/369573>
- Sipos, L., Balázs, L., Székely, G., Jung, A., Sárosi, S., Radácsi, P., & Csambalik, L. (2021). Optimization of basil (*Ocimum basilicum* L.) production in LED light environments – a review. En *Scientia Horticulturae* (Vol. 289). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110486>
- Son, K.-H., Kim, E.-Y., & Oh, M.-M. (2018). Growth and Development of Cherry Tomato Seedlings Grown under Various Combined Ratios of Red to Blue LED Lights and Fruit Yield and Quality after Transplanting. *Protected horticulture and Plant Factory*, 27(1), 54–63. <https://doi.org/10.12791/ksbec.2018.27.1.54>
- Song, Y. H., Ito, S., & Imaizumi, T. (2013). Flowering time regulation: photoperiod- and temperature-sensing in leaves. *Trends in Plant Science*, 18(10), 575–583. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2013.05.003>
- Tarjeta de desarrollo ESP32 modulo wifi bluetooth ESP-32.* (s/f). Arca Electrónica. Recuperado el 27 de enero de 2023, de <https://www.arcaelectronica.com/products/tarjeta-de-desarrollo-esp32-modulo-wifi-bluetooth-esp-32>
- The causes of deforestation.* (s/f). Eniscuola. Recuperado el 27 de enero de 2023, de <https://eniscuola.eni.com/en-IT/who-we-are.html>
- Xiaoying, L., Shirong, G., Zhigang, X., Xuele, J., & Tezuka, T. (2011). Regulation of Chloroplast Ultrastructure, Cross-section Anatomy of Leaves, and Morphology of Stomata of Cherry Tomato by Different Light Irradiations of Light-emitting Diodes. En *HORTSCIENCE* (Vol. 46, Número 2).

- Zakurin, A. O., Shchennikova, A. v., & Kamionskaya, A. M. (2020). Artificial-Light Culture in Protected Ground Plant Growing: Photosynthesis, Photomorphogenesis, and Prospects of LED Application. En *Russian Journal of Plant Physiology* (Vol. 67, Número 3, pp. 413–424). Pleiades Publishing. <https://doi.org/10.1134/S102144372003022X>
- Zhen, S., & van Iersel, M. W. (2017). Far-red light is needed for efficient photochemistry and photosynthesis. *Journal of Plant Physiology*, 209, 115–122. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2016.12.004>

Apéndices

Apéndice A

Código para el control de las luces LED mediante PWM programado en Arduino IDE.

Disponible en la plataforma GitHub: https://github.com/SamuelDAngulo/LED-System/blob/main/ESP_LEDS_XML.ino

Apéndice B

Código del sistema de monitoreo programado en Arduino IDE.

Disponible en la plataforma GitHub: <https://github.com/SamuelDAngulo/LED-System/blob/main/Monitoreo.ino>

Apéndice C

Código para control de corriente haciendo uso de sensores de corriente INA219.

Disponible en la plataforma GitHub: https://github.com/SamuelDAngulo/LED-System/blob/main/ControlCorrienteConPotenciometros_ESP32.ino

Apéndice D

Programa en MATLAB para hallar R2 y R3 para el control del buck converter.

Disponible en la plataforma GitHub: <https://github.com/SamuelDAngulo/LED-System/blob/main/HallarR2YR3.m>

Apéndice E

Video presentación del proyecto.

<https://youtu.be/dUN-iVEHhTM>

Apéndice F

Diseño control de corriente en lazo cerrado.

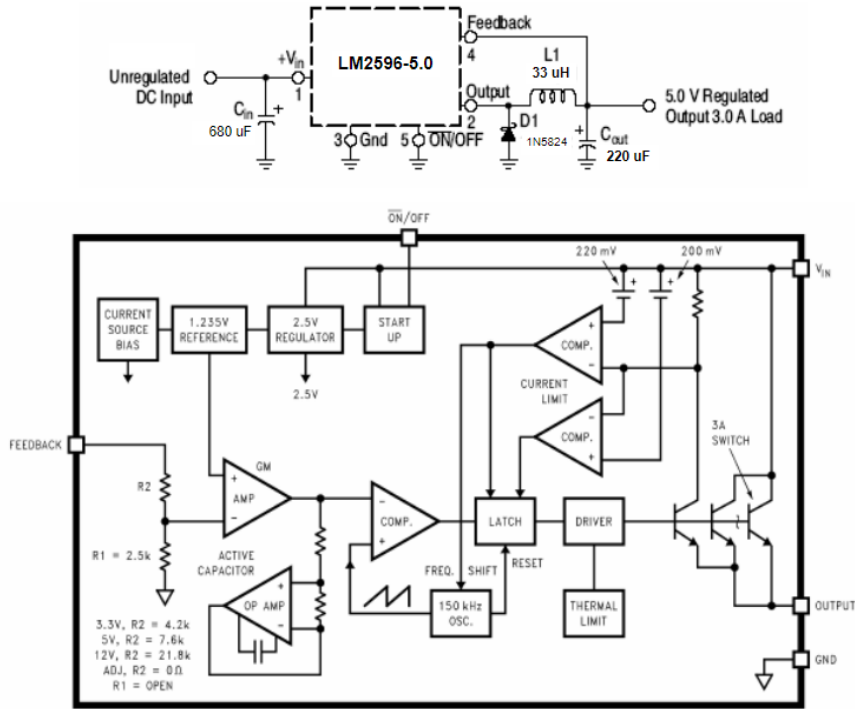
A pesar de que se implementó un control en lazo abierto, se realizó el diseño de un sistema de control en lazo cerrado, el cual busca mantener una corriente constante por cada arreglo de LEDs en caso de que alguno de ellos fallé y entre en corto, para así poder evitar que los demás LEDs se dañen. Para el diseño de este sistema se tomó como base el sistema en lazo abierto y se buscó optimizarlo.

Como primera instancia se decidió agregar un sensor de corriente al diseño para medir la intensidad de corriente que circula por cada arreglo de LEDs, este le entregará la información al microcontrolador para realizar la acción de control necesaria, en este caso, ajustar el valor de ciclo de trabajo de una señal PWM.

Revisando la hoja de datos del módulo reductor de tensión lm2596 se observó que este cuenta con un sistema de realimentación el cual le permite mantener su tensión de salida constante, analizando el sistema de realimentación se halló que la tensión de salida va realimentada por medio de un arreglo de resistencias (compuesto por la resistencia variable R2 y la resistencia R1, ver Figura 33) a un amplificador operacional que compara esta tensión a una tensión de referencia; de igual forma, la hoja de datos proporciona la relación entre la tensión de salida, la tensión de referencia y las resistencias R1 y R2 la cual es la ecuación que describe la tensión en el nodo de la entrada inversora del amplificador operacional.

Figura 33

Esquemático reductor de tensión LM2596.



Tomado de Step-Down Switching Regulator (2004).

Ecuación 1

Tensión de salida en función de la configuración de resistencias.

$$V_{Out} = V_{Ref} \left(1 + \frac{R2}{R1}\right)$$

Ecuación 2

Ecuación de nodo a la entrada inversora del comparador.

$$\frac{V_{Ref}}{R1} + \frac{V_{Ref} - V_{Out}}{R2} = 0$$

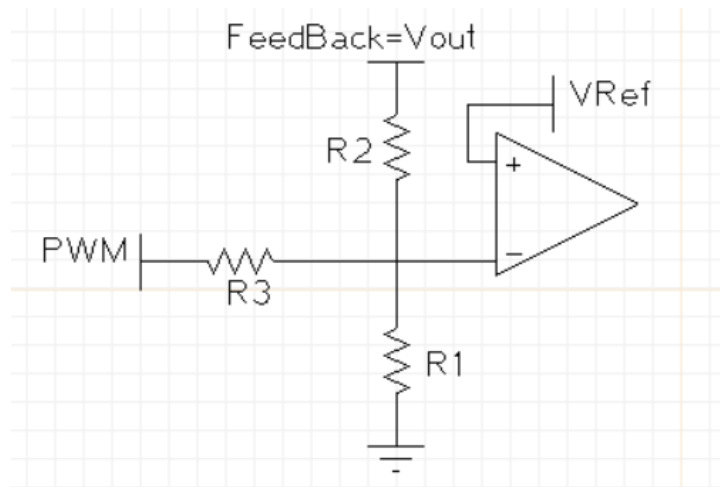
Analizando que la tensión de salida del módulo reductor es función de la tensión del nodo de la entrada inversora del amplificador operacional y que la corriente de los LEDs es directamente proporcional a la tensión que se les aplica, se propone controlar la tensión que se suministra a los

LEDs modificando la tensión del nodo de la entrada inversora del amplificador operacional por medio de la tensión promedio de una señal PWM, obteniendo así un controlador para LEDs de voltaje variable, donde con ayuda del sensor de corriente y el microcontrolador, se ajuste el valor de ciclo de trabajo de la señal PWM para obtener la corriente deseada; de este modo ya no es necesario usar el módulo controlador para LEDs de voltaje constante ahorrando así un componente.

Incorporando la señal PWM al nodo de la entrada inversora por medio de una resistencia R3 se obtiene el diagrama de la Figura 34, que con ayuda de la ley de corrientes de Kirchoff y teniendo en cuenta las propiedades de los amplificadores operacionales se puede encontrar la relación entre la tensión de salida, la tensión de referencia, la tensión promedio de la señal PWM y las resistencias R1, R2 y R3 como se observa en la Ecuación 3.

Figura 34

Diagrama para el sistema en lazo cerrado.



Ecuación 3

Ecuación de nodo con PWM.

$$\frac{V_{Ref}}{R1} + \frac{V_{Ref} - V_{Out}}{R2} + \frac{V_{Ref} - PWM}{R3} = 0$$

Ecuación 4

Ecuación de nodo con PWM despejada para Vout.

$$V_{Ref} \left(\frac{R2}{R1} + 1 + \frac{R2}{R3} \right) - PWM \frac{R2}{R3} = V_{Out}$$

De la Ecuación 4 se conoce el valor de R1 y la tensión de referencia, analizando esta misma ecuación y asumiendo valores fijos para R2 y R3, se puede observar que cuando el valor de tensión promedio de la PWM es máximo la tensión de salida es mínimo y de igual forma cuando el valor de tensión promedio de la PWM es mínimo la tensión de salida es máxima. El valor máximo y mínimo de la tensión promedio de la señal PWM cambia dependiendo de que dispositivo la genera, para el caso de la ESP32 el valor máximo de la señal PWM es de 3.3V. De igual forma los valores máximo y mínimo de tensión de salida del reductor de tensión se pueden seleccionar según sean requeridos para alimentar los LEDs. Teniendo esto en cuenta se puede plantear un sistema de ecuaciones con dos ecuaciones y dos incógnitas para hallar los valores de R2 y R3.

Ecuación 5

Primera ecuación del sistema de ecuaciones para hallar R2 y R3.

$$V_{Ref} \left(\frac{R2}{R1} + 1 + \frac{R2}{R3} \right) - PWM_{Max} \frac{R2}{R3} = V_{OutMin}$$

Ecuación 6

Segunda ecuación del sistema de ecuaciones para hallar R2 y R3.

$$V_{Ref} \left(\frac{R2}{R1} + 1 + \frac{R2}{R3} \right) - PWM_{Min} \frac{R2}{R3} = V_{OutMax}$$

Con ayuda de MATLAB se hallaron los valores de R2 y R3 para cada arreglo de LEDs. El valor máximo de tensión de salida se seleccionó con base en valores de trabajo típicos de tensión de cada LED y el mínimo con base en una tensión donde los LEDs no permitan el paso de corriente a través de ellos. La resistencia R1 es la resistencia presente en la placa del reductor de tensión, en este caso 330Ω. Para los valores máximo y mínimo de PWM se tomaron los proporcionados por la ESP32. (Código en el Apéndice D)

Tabla 33

Resistencias calculadas para cada arreglo de LEDs.

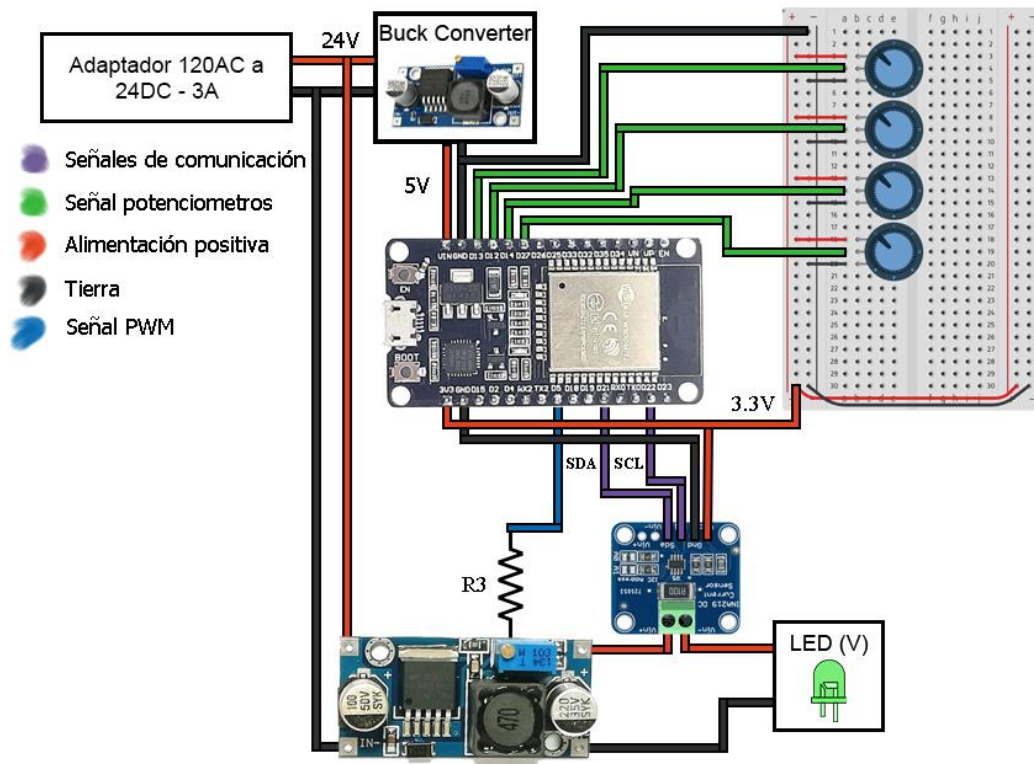
Arreglo de LEDs	Vref [V]	PWMmax [V]	PWMmin [V]	Voutmax [V]	Voutmin [V]	R1 [Ω]	R2 [Ω]	R3 [Ω]
Rojo	1,235	3,3	0	19,8	6	330	3580	850
Azul	1,235	3,3	0	19,2	6	330	3480	870
Verde	1,235	3,3	0	17,1	6	330	3130	930
Infrarrojo	1,235	3,3	0	12,96	6	330	2430	1150

Una vez hallados los valores de R2 y R3 es importante no cambiarlos para garantizar el rango de tensión de salida deseado para el reductor de tensión.

Finalmente se desarrolló un código para ESP32 que genera las señales PWM que van a los módulos reductores por medio de la resistencia R3. Este código toma la medición de corriente realizada por el sensor de corriente en cada arreglo de LEDs y si es diferente a la corriente deseada ajusta el valor de PWM para ajustar la tensión de los módulos reductores, por consiguiente, la corriente del arreglo de LEDs. (Código en Apéndice C)

Figura 35

Diagrama de conexiones para el sistema de control en lazo cerrado.



Cabe recalcar que en la Figura 35 se muestran las conexiones para un solo arreglo de LEDs, sin embargo, para aplicarlo a los demás arreglos solo se necesita repetir el esquema, ajustar la resistencia R2 y R3 a las descritas en la Tabla 33, conectar la resistencia R3 al pin correspondiente de PWM de cada arreglo de LEDs y conectar los cables SDA y SCL de todos los módulos ina219 a los mismos pines de la ESP32, ya que al ser una comunicación serial I2C comparten el mismo cable y hacen uso de direcciones para reconocer con cuál módulo se quiere comunicar. El cambio de dirección se hace en el hardware soldando los pines A0 y A1 en la placa del ina219 de la forma descrita en la hoja de datos.