



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA
LICENCIATURA EN INGENIERÍA MECATRÓNICA

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:
LICENCIADO EN INGENIERÍA
MECATRÓNICA

Diseño y construcción de un sistema electrónico
automático de iluminación para invernadero.*

Presenta:

C. Jorge Heredia Castillo

Directores de Tesis:

Dr. Antonio Michua Camarillo

Dr. José Eligio Moisés Gutiérrez

Dr. José Eladio Flores Mena

Mtro. Erick Javier Córdova Gutiérrez

Puebla, Pue., Enero 2020

* Proyecto PRODEP BUAP-PTC-602 y número de oficio 51-6/18-9344.

Índice general

0.1. La luz en las plantas	7
0.1.1. Intensidad de luz en las plantas	7
0.1.2. El espectro de luz en las plantas	8
0.1.3. El fotoperiodo de luz en las plantas	10
0.1.4. Lámparas LED como tecnología de vanguardia	11
0.2. Jitomate (<i>Solanum lycopersicum L.</i>) y la luz	11
0.2.1. Jitomate y los demás parámetros	12
0.2.2. Control de iluminación	12
0.3. Justificación	13
0.4. Objetivo General	14
0.4.1. Objetivo Específico	14
1. Antecedentes del trabajo	15
Antecedentes del trabajo	15
1.1. Agricultura protegida	15
1.2. Control de microclimas para invernaderos	17
1.2.1. Control PID en invernaderos	17
1.2.2. Control predictivo por modelo en invernaderos	17
1.2.3. Control de lógica difusa en invernaderos	18
1.2.4. Control por redes neuronales en invernaderos	19
1.3. Control óptimo en invernaderos	19
2. Modelo matemático usado en la tesis	21
Modelo matemático del invernadero	21
2.1. Modelos matemáticos de cultivos	21
2.1.1. Modelo usado en este trabajo	22
2.1.2. Número de Nodos (N)	23
2.1.3. Materia seca del dosel W_c	24
2.1.4. Biomasa seca de la raíz (W_r)	26
2.2. Modelo de invernadero	26

2.2.1. Temperatura del aire (T_g)	26
2.2.2. Modelo de Humedad en el aire del invernadero (V_i)	27
2.3. Modelo completo	28
2.4. Análisis del modelo usado	28
3. Obtención de la trayectoria de entrada de control	30
Planteamiento y resolución del problema de control óptimo	30
3.1. Obtención de la trayectoria de entrada de control	30
3.2. Simulación del cultivo de jitomate en un periodo de cosecha con el sistema de control usado	37
3.2.1. Interpretación de los resultados de la simulación	40
4. Diseño electrónico del sistema de control de iluminación	42
Diseño electrónico del sistema de control de iluminación	42
4.1. Tarjeta de potencia desarrollada para el sistema	42
4.1.1. Lámpara de luz de espectro completo	45
4.1.2. Caracterización de la lámpara de espectro completo	46
4.1.3. Desarrollo electrónico del controlador	47
4.1.4. Periféricos usados en la tarjeta del sistema de control de lu- minosidad	50
4.2. Impreso elaborado de la tarjeta de potencia	53
5. Implementación del sistema en el invernadero	55
Implementación del sistema en el invernadero	55
5.1. Prueba del sistema de control en el ambiente cerrado	55
5.2. Pruebas del sistema de control en el invernadero	57
5.2.1. Instalación de las lámparas en el invernadero	58
5.2.2. Prueba del sistema en el invernadero	59
Conclusiones	61
A. Programa del microcontrolador encargado de generar el disparo para el triac.	62
B. Algoritmo desarrollado para la tarjeta de desarrollo Arduino Mega	65
Bibliografía	78

Índice de figuras

2.1. Visualización física de las variables de estado del modelo	23
3.1. Resultado del número de nodos N de la simulación en un periodo de cosecha	37
3.2. Resultado de la biomasa del invernadero de la simulación en un periodo de cosecha	38
3.3. Entrada de energía lumínica al sistema	38
3.4. Comparación de crecimiento de la raíz en 80 días de cosecha	39
3.5. Comparación de crecimiento de la biomasa del dosel en 80 días de cosecha	39
3.6. Comparación de crecimiento del número de nodos en 80 días de cosecha	40
4.1. Diagrama electrico del detector de cruce por cero de la etapa de potencia del circuito del control del invernadero.	43
4.2. Diagrama electrico del circuito de potencia del circuito del invernadero.	43
4.3. Pantalla del osciloscopio del circuito en operación.	43
4.4. Diagrama de flujo del programa del microcontrolador del circuito de potencia del invernadero.	44
4.5. Dimensiones de la lámpara de luz de espectro completo usada en el sistema en pulgadas.	46
4.6. Espectro de la lámpara de luz de espectro completo.	46
4.7. Gráfica del comportamiento de la lámpara de espectro completo.	47
4.8. Diagrama a bloques del sistema de control.	48
4.9. Gráfica del comportamiento del sistema de control de invernadero a un nivel de iluminación.	48
4.10. Diagrama de flujo del bloque de control del sistema de control de invernadero.	49
4.11. Circuito esquemático del circuito del sistema de control de invernaderos completo.	50
4.12. Módulo lector microSD usado en el sistema de iluminación para guardar los datos del sensor.	51

4.13. Reloj en tiempo real DS3231 usado en el sistema de iluminación.	51
4.14. Sensor de intensidad lumínica TSL2591 usado en el sistema de control de iluminación.	52
4.15. Pistas de circuito impreso.	53
4.16. Circuito esquemático.	54
5.1. Armazón de pruebas del sistema de control del invernadero.	55
5.2. Esquema del montaje del armazón de pruebas del sistema.	56
5.3. Gráfica de la prueba del comportamiento del sistema con una lámpara.	56
5.4. Imagen del interior del invernadero.	57
5.5. Fotografía que muestra el resultado de las conexiones de las lámparas dentro del invernadero.	58
5.6. Esquema de la distribución de las lámparas en el invernadero.	59
5.7. Fotografía de la toma de datos de la prueba del sistema desarrollado dentro del invernadero.	59
5.8. Gráfica de prueba del comportamiento del sistema en el invernadero con 10 lámparas y un sensor.	60



- 2.1. Parámetros del modelo tomados de la literatura. 29
- 2.2. Parametros proporcionados por el COLEGIO DE POS-GRADUADOS 29

Agradecimientos

A Dios por permitirme estudiar una licenciatura.

Agradezco a mi familia y amigos por su apoyo.

Así mismo, agradezco a la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla y al cuerpo docente de la Facultad de Ciencias de la Electrónica por los conocimientos impartidos.

A mis asesores el Dr. Antonio Michua Camarillo, al Dr. José Eligio Moisés Gutiérrez Arias y al Dr. José Eladio Flores Mena por su paciencia y ayuda.

Agradezco especialmente al Mtro. Erick Cordoba Gutierrez por su valiosa asesoría en la realización de este trabajo

A mis compañeros de aula que siempre estaban dispuestos a trabajar.

Agradezco también a los miembros del jurado revisor de éste trabajo

Dedicatorias

A todos sembradores y agricultores deseosos de mejorar sus cultivos.

Resumen

En el presente trabajo se detalla el diseño y la construcción de un sistema electrónico automático de iluminación para un invernadero de jitomate (*Solanum lycopersicum L.*). Para probar la efectividad del sistema, mediante una simulación del modelo matemático del invernadero, se demuestra que con el uso de el sistema electrónico automatico de iluminación y manteniendo los demás parametros que intervienen en la siembra, como es: la temperatura, la humedad, la concentración de CO_2 , etc, invariables en la evolución del tiempo, se obtendrá 80 días después de sembrar, al momento de cosechar, un incremento en la biomasa del dosel de la planta del jitomate del 15 % con respecto a la cantidad de biomasa del dosel cosechada de la misma plantación sin el sistema electrónico automático de iluminación, con la ventaja de un gasto energético óptimo.

El sistema esta integrado por lámparas con tecnología LED (Diodo emisor de luz) de espectro completo, un circuito electrónico que controla la intensidad de la lampara LED, un sensor de luminosidad, un controlador proporcional, y una trayectoria de entrada diseñada para lograr el óptimo crecimiento de la planta al menor costo energetico.

Se inició con una revisión bibliografica de trabajos referentes al tema, se seleccionó un trabajo base con el mismo modelo, la misma metodología y se hizo una aportación al trabajo anterior cambiando el parametro de control.

Para encontrar la trayectoria óptima de iluminación para el sistema a controlar, se tomó el modelo matemático, se planteo un problema de control óptimo y se resolvió el sistema de ecuaciones resultantes.

Se empezó el diseño del sistema de potencia seleccionando la lámpara de acuerdo a sus características y una vez elegido el actuador, se eligió la mejor forma de regular la intensidad de la lámpara. Como la lámpara se alimentaba al toma corriente, se eligió un circuito para regular el ángulo de disparo de un tiristor. Debido a la necesidad de evitar el ruido y la perdida de datos, se optó por desarrollar el circuito con un microcontrolador.

Para el sensado de las lámparas se consiguió un sensor de luminosidad de gran espectro.

El control proporcional se implementó con una tarjeta de desarrollo comercial,

esta decisión se tomó, ya que, en el mercado su programación esta orientada a objetos, lo que permite ahorrar tiempo para integrar perifericos necesarios para su programación como: el sensor de luminosidd, reloj de tiempo real y modulo de memoria extraíble para los datos.

Una vez integrado el sistema, se hicieron pruebas en un ambiente cerrado para evitar perturbaciones de luz con una lámpara, luego se hicieron pruebas con 3 lámparas y por último se instaló el sistema con 10 lámparas y se realizó la prueba final en el invernadero. Las pruebas se diseñaron para seguir una trayectoria de prueba guardada. Durante cada tiempo de muestreo se recabaron la respuesta del sensor, al final de la prueba se compararon los datos obtenidos con el sensor y la trayectoria de prueba.

Al final de las pruebas, las graficas resultantes muestran que el sistema electrónico automático de iluminación sigue la trayectoria de prueba como se esperaba.

Introducción

Las plantas son una fuente importante de nutrición para los humanos. Entre los diversos factores ambientales, como la temperatura, la humedad y los fertilizantes, la luz es uno de los factores clave en la producción de plantas.

El fracaso de los cultivos debido a cambios climáticos impredecibles es un motivo de preocupación a nivel mundial. Amenazas como plagas y enfermedades agravan aún más la incertidumbre de los rendimientos de cultivos. Las limitaciones geoclimáticas de la agricultura convencional y su dependencia de fertilizantes y pesticidas dañinos han impulsado los avances en las técnicas de cultivo en interiores. El concepto de agricultura en interiores y sistemas de producción de plantas en ambientes controlados ha surgido como un medio alternativo confiable y sostenible para la producción de cultivos. La iluminación adecuada es fundamental para el crecimiento óptimo de las plantas en interiores [1].

La producción de cultivos en invernaderos es de suma importancia ya que da una ventaja sobre la producción a cielo abierto porque se establece una barrera entre el ambiente externo y el cultivo, creando un microclima que permite proteger el cultivo de condiciones adversas (viento, granizo, plagas, etc.) y controlar factores como la temperatura, radiación, concentración de CO_2 , humedad relativa, etc. En México, el uso de invernaderos para la producción de hortalizas ha aumentado rápidamente, de 721 hectáreas en 1999 a 3 200 hectáreas en 2005. Los datos más recientes muestran que en 2012 se llegó a 12 000 hectáreas de invernaderos, esto sin incluir otras 8 000 hectáreas que corresponden a malla sombra y macro túnel [2].

Como se mencionó antes, uno de los factores que necesitan los cultivos es la energía solar, específicamente la radiación solar. La luz y la fotosíntesis, que es el principal proceso vital en las plantas, están íntimamente conectadas. Sin embargo, solo el 4.6–6 % del total de la energía de radiación solar incidente se utiliza para la fotosíntesis de la planta. Ahora se entiende que la calidad de la luz (el espectro) y la cantidad [densidad de flujo de fotones fotosintéticamente activa (PPDP)] regulan la composición y el contenido de los fitoquímicos, que afecta la calidad nutricional y la post cosecha en muchas especies de plantas, especialmente hortalizas de hoja.

Las plantas contienen una amplia variedad de foto receptores altamente sensibles que perciben incluso pequeños cambios en la calidad de la luz y, en consecuencia,

modular la fotosíntesis o respuestas foto morfogénéticas. Para trabajar la radiación los productores han recurrido a la luz solar y a métodos tradicionales como colocar diferentes filtros plásticos en invernaderos obteniendo resultados satisfactorios.

Sin embargo, debido al clima súbito y al factor estacional, la luz insuficiente afecta seriamente el crecimiento y el rendimiento del cultivo. Debido a esto, muchos estudios se centran en cómo complementar de manera eficiente la luz insuficiente y cómo cada fuente de luz está relacionada con el crecimiento y la productividad del cultivo.

Las dos razones principales para usar iluminación complementaria son aumentar el crecimiento de la planta durante niveles de poca luz y manipular la relación de la duración del día a la duración de la noche (Fotoperiodo) para iniciar o retrasar la floración [3].

En términos generales la modificación del ambiente espectral es una herramienta clave para aumentar la productividad de las plantas y sus características. Sin embargo, para su optimización y aplicación más extendida se requiere el balance nutricional adecuado para que las plantas sean capaces de explotar al máximo la energía contenida en la radiación. Sin embargo, con el rápido avance de las ciencias, hoy en día, se puede producir el espectro completo de luz artificial con la ventaja de ser completamente independiente del sol, lo que permite un control sin restricciones y mucho más amigable. Los diodos emisores de Luz (LED) son la promesa tecnológica para el control de invernaderos sobre otros tipos de fuentes luminosas. La longitud de onda de un LED depende del material semiconductor del que esté hecho. Los leds pueden ir desde la luz ultravioleta “C” (250 nanómetros aproximadamente) hasta longitudes infrarrojas (1000 nanómetros aproximadamente). El costo de operación y de capital es un factor importante para descartar esta tecnología en primera instancia, sin embargo, esta tecnología tiene una tendencia a bajar sus costos en un futuro. La ventaja sobre otras fuentes luminosas es la eficiencia que presenta.

La energía solar absorbida puede definirse como excesiva cuando supera la capacidad de la fotosíntesis para la asimilación. Aunque el exceso de luz es potencialmente nociva, las plantas tienen una gran cantidad de mecanismos que gestionan el exceso de energía absorbida en un nivel molecular de manera que no resulta en foto-oxidativa. La foto-protección es un término bastante amplio que se puede usar para cubrir mecanismos que evitan que la energía de la luz induzca daños a través de la generación de altos niveles de especies reactivas de oxígeno (ROS).

Aunque las ROS son moléculas de señalización importantes en las plantas, pueden tener efectos perjudiciales sobre la fotosíntesis y otros procesos foliares que, en última instancia, reducirán el crecimiento y la aptitud de la planta, el ejemplo más extremo de esto es el blanqueamiento y muerte celular.

Una posibilidad interesante es que la manipulación de vías foto-protectoras es un medio para mejorar tanto la resistencia al estrés como la productividad fotosintética de las plantas de cultivo. Sin embargo, puede haber un equilibrio entre la necesidad de la foto-protección para limitar el daño por un lado y aumentar la productividad en el otro[4].

Por lo tanto es de suma importancia regular la cantidad adecuada de luz sobre los cultivos, en éste documento se muestra una propuesta de un circuito electrónico para regular la intensidad de luz de una lámpara de espectro UV y se comprobará su uso en una cosecha de jitomate (*Solanum lycopersicum L.*).

0.1. La luz en las plantas

Las plantas utilizan el espectro de luz similar al que capta el ojo humano, pero a diferencia de los humanos, éstas captan principalmente la luz roja y la luz azul. La molécula que tienen las plantas que es capaz de absorber la luz solar y utilizar su energía para transformar el agua y el dióxido de carbono en oxígeno y moléculas orgánicas complejas es la clorofila. Este proceso se denomina fotosíntesis.

La clorofila es el pigmento más viejo conocido que facilita el aprovechamiento de la luz roja y la luz azul del espectro de luz incidente. Esta energía se usa en las plantas para fijar el CO_2 en las plantas y para la síntesis de ATP. Por lo tanto, la biosíntesis de una gran cantidad de carbohidratos y numerosas reacciones metabólicas son directamente reguladas por las condiciones de luz ambiental[5].

Las clorofilas de las plantas absorben la luz roja y azul del espectro de luz, reflejando a nuestra vista la luz verde, que no es absorbida por ellas, siendo esta la razón por la cual vemos las plantas de color verde. Pero en las plantas no solo existen los pigmentos verdes de la clorofila; también existen los denominados pigmentos accesorios (carotenoides, xantofilas) y sustancias fenólicas (flavonoides, antocianinas, flavones y flavonoides) que captan otros colores y proporcionan las coloraciones variadas de frutas y flores que atraen a insectos y aves, además pueden contribuir a proteger a los tejidos de la radiación excesiva [6].

0.1.1. Intensidad de luz en las plantas

Para medir la luz visible que percibimos los humanos se utilizan como unidades el lumen o el lux. Pero esta luz no da ninguna información sobre lo que absorben las plantas en realidad, puesto que mide la intensidad de la luz en la zona media del espectro, no en la que es importante para la fotosíntesis. Lo mismo ocurre con las medidas radiométricas en watts que se utilizan para medir el calentamiento, pero que no sirven ni para personas ni para plantas. Las medidas en moles de fotones miden

todos los colores dentro de las longitudes de onda fotosintéticas, y ya hemos visto que no todos los colores producen los mismos efectos. Estas medidas de la intensidad luminosa deben ir acompañadas del espectro de luz concreto, que se mide con un espectrómetro.

La radiación PAR (Radiación fotosintéticamente activa)(400-700 nm) se mide en W/m^2 . Como lo que interesa es en el fondo el número de fotones que inciden sobre una superficie vegetal concreta, se suelen dar las medidas PPF (Densidad de flujo de fotones fotosintéticos) que se mide generalmente en $\mu moles/m^2s$ [6].

Altos valores de transmisión de radiación PAR son importantes para la fotosíntesis, hasta umbrales de saturación a partir de los cuales, nuevos incrementos de la radiación no se traducen en aumentos en la tasa fotosintética de las plantas [7].

0.1.2. El espectro de luz en las plantas

Las plantas responden a las distintas longitudes de onda de la luz PAR. McCree en 1972 estudió el espectro de la luz PAR que era utilizado por las plantas, describiendo picos de absorción en diferentes longitudes de onda, estableciendo la curva del espectro de acción de la fotosíntesis. Dentro del espectro de la radiación fotosintéticamente activa, McCree encontró que para todas las especies de plantas superiores (más de 20) que estudió había dos amplios máximos estrechamente coincidente en la eficiencia fotosintética centrados en torno a los 440 y a los 660 nm.

Existen sustancias que absorben la luz y que se denominan fotorreceptores. Son los fitocromos, las fototropinas y los criptocromos. Además, existe un fotorreceptor específico para la luz ultravioleta, el UVR8. Todos ellos captan luz de distinta longitud de onda:

- Las fototropinas inciden en la ubicación de los cloroplastos y en la apertura estomática. Absorben luz azul.
- Los criptocromos captan estímulos externos relacionados con la luz y controlan el reloj interno de las plantas. Además, están relacionados con las respuestas morfológicas, como la inhibición del alargamiento de los tallos, la expansión de los cotiledones, la producción de antocianos y la floración fotoperiódica. Absorben fotones de las longitudes de onda de UV (ultravioleta), azul y verde.
- Los fitocromos se encargan principalmente de hacerlas florecer y de generar semillas. Afectan a la elongación de los tallos, la expansión de las hojas, el “Síndrome de huida de la sombra” (Shade avoidance) y perciben los cambios entre las proporciones de luz roja y roja lejana. Así, además de la fotosíntesis que produce crecimiento vegetal (biomasa), las otras funciones de las plantas (germinación, floración, etc.) dependen también de la luz, pero no tanto en

su cantidad sino por la presencia de diferentes longitudes de onda en cantidades suficientes para desencadenar un efecto concreto. Las luces infrarroja y ultravioleta también tienen algunos efectos sobre el desarrollo de las plantas.

Los efectos de las diferentes longitudes de onda en las plantas son los siguientes:

- Ultravioleta. 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.
- Azul. 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).
- Verde. 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 la misma. Las plantas cultivadas bajo la luz verde tienen pecíolos y entrenudos largos y elevada temperatura en las hojas.
- Rojo. 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 huída 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 de 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.
- Rojo-lejano. 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 huída de la sombra. La luz roja lejana causa la floración prematura de muchas especies, y la elongación de tallo y pecíolos.

Regulando la cantidad de luz ($\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$) y el espectro se pueden obtener, como hemos visto anteriormente, diferentes características del cultivo que satisfacen las

necesidades del agricultor para cada tipo de instalación y producto (floración, crecimiento vegetativo, etc.). Sin embargo, no solo la biomasa y la floración pueden regularse modificando la luz artificial. La luz que las plantas reciben no sólo sirve para estimular el desarrollo de las plantas, sino que también impulsa la acumulación de compuestos químicos en los cultivos, que pueden o no tener relevancia en la salud humana. Por ejemplo, se puede usar la iluminación para incrementar la obtención de productos que se pueden utilizar en medicina, alimentación o cosmética, como puede ser el contenido de aceites esenciales en plantas aromáticas.

0.1.3. El fotoperiodo de luz en las plantas

La luz juega un papel primordial en el desarrollo 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 de año. Aunque los estudios relacionados con los efectos de la luz son relativamente nuevos, lo que sí se sabe desde hace unas cuantas décadas 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.

En realidad, las plantas no miden las horas de luz, sino que miden más bien las horas de oscuridad. Durante las horas de oscuridad algunas sustancias que inhiben la floración, y que se han acumulado en los tejidos vegetales durante el día se destruyen, por lo que las plantas reciben la señal de florecer. Todo este proceso es muy complejo, porque también está relacionado con las temperaturas ambientales del día y de la noche (por ejemplo, a mayor temperatura más luz necesitan algunas plantas para florecer) o a otros factores como la edad de la planta o el tiempo de exposición a unas horas determinadas de iluminación. En las horas de oscuridad, el proceso

se puede romper si se aplican períodos de luz muy pequeños por la noche en las plantas de día corto, inhibiendo la floración o bien en las plantas de día largo, esos pulsos de luz nocturnos pueden promoverles la floración. Los efectos de la luz no se dan solo en la floración, se dan también en la germinación de las semillas. En realidad, al estar expuestas a la luz solar, en las plantas se establece un equilibrio entre las formas Pr y Pfr. En la oscuridad, el Pfr va decreciendo a favor de Pr. Una interrupción de la oscuridad vuelve a regenerar la cantidad de Pfr, que es la que determinará si las plantas florecen o no. Cuando la densidad de vegetación es elevada la proporción Pr-Pfr es baja, lo que pone en marcha unas respuestas que se conocen como el “Síndrome de huida de la sombra” (Shade avoidance) y que hace que la planta crezca más alargada, se ramifique menos y florezca antes. Estos síntomas son los siguientes:

- alargamiento de hipocótilos
- alargamiento de entrenudos
- menor ramificación, mayor dominancia apical
- floración prematura
- períodos de hojas más largos
- hojas estrechas y menor área foliar

En concreto, Los parámetros a considerar en la iluminación artificial son el espectro de la luz, su intensidad y el fotoperiodo [6].

0.1.4. Lámparas LED como tecnología de vanguardia

Hoy en día los sistemas de iluminación tipo LED es lo más moderno para proporcionar tratamientos a cultivos para modificar características fisiológicas de las plantas.

El crecimiento y el desarrollo han sido estudiados bajo una gran variedad de tratamientos LED en cámaras de crecimiento. Debido a que las plantas utilizan principalmente las porciones rojo y azul del espectro, los estudios se concentran en combinaciones de estos colores.[5]

0.2. Jitomate (*Solanum lycopersicum L.*) y la luz

La planta de jitomate, a través del tiempo y de su evolución se ha adaptado en condiciones de radiación solar directa. La cantidad de luz tiene su efecto directamente en el proceso de la fotosíntesis, y ésta a su vez en la síntesis del carbohidratos

y en consecuencia, en el desarrollo de la planta, en floración y en la producción y calidad de frutos.

Es conveniente que la luminosidad sea la que existe en la propia naturaleza, que es alrededor de 2500 a 3000 $\mu\text{molm}^{-1}\text{s}^{-1}$ y con un fotoperiodo de 12 horas de luz, [8] ya que cantidades menores a ésta, caso particular de los periodos de invierno, manifiestan una disminución en el desarrollo de la planta, una reducción en el amarre de los frutos, baja producción y menor calidad de frutos. Al contrario, con cantidades excesivas de luz la síntesis de proteínas se dificulta y los carbohidratos se acumulan.

La radiación en la planta es de suma importancia, por lo que algunos factores que se manejan en los invernaderos son de relevancia, tales como la densidad de plantación, la intensidad y el sistema de poda y el tutoreo son las practicas más importantes en cuanto al manejo de la radiación del cultivo.

0.2.1. Jitomate y los demás parametros

La humedad relativa más favorable es del 50 al 60 % ; cuando es más alta las anteras se hinchan y el polen no puede liberarse ni caer sobre el estigma y las flores no se polinizan y caen. La humedad relativa del 80 % o más favorece el desarrollo de enfermedades fangosas, principalmente tizón tardío, tizón temprano y moho gris.

Las condiciones óptimas para que se produzca la fecundación y el amarre de frutos se pueden establecer entre los 14 y los 18 grados centigrados durante la noche y de 23 a 26 grados durante el día, siendo la temperatura nocturna la principal responsable de los procesos de la planta.

La duración y frecuencia del riego depende de los factores ambientales, tales como: la temperatura, la intensidad de la radiación, el tipo de sustrato, la humedad relativa y la fase fenológica del cultivo.

Conforme la planta se va desarrollando la demanda de agua se incrementa. Durante los primeros treinta días, el jitomate requiere alrededor de 0.3 litros por planta al día, los siguiente cuarenta días el consumo se incrementa a 0.8 litros diarios por plantas y finalmente el resto del ciclo demanda de 1 a 1.5 litros por planta [8].

0.2.2. Control de iluminación

Para poder suministrarle a la planta solamente la cantidad de luz que ella necesita y que no exista desperdicio de energía lumínica, puesto que, un desperdicio de luz se traduce en un mayor costo de cosecha. Se empleara el uso de un control óptimo con ayuda de un modelo matemático derivado del modelo TOMGRO [9] para encontrar una trayectoria de intensidades que la lámpara deberá seguir. Se empleará además un control proporcional para que el sistema de potencia que regula la cantidad de luz

de la lámpara pueda mantenerse en cada valor de intensidad óptima en cada tiempo de muestreo sin que perturbaciones externas como la luz del sol afecten dicho valor.

El uso del control óptimo asegura que el valor de intensidad de luz es el que la planta requiere y permite además que la iluminación proporcionada sea más parecida a la natural.

0.3. Justificación

Aparte del control de microclima los métodos de siembra tradicional no incluyen de manera importante el control de la calidad y la cantidad de la luz. Estudios recientes han encontrado que los diodos emisores de luz verdes y azules son un factor importante para el crecimiento, desarrollo y biosíntesis de metabolitos secundarios en plantas y especialmente la irradiación complementaria de los diodos basados en la combinación de diodos rojos y azules puede mejorar el crecimiento [10].

Con la aplicación de luz artificial las características del cultivo se ven modificadas. Se puede saber que existen muchos métodos para irradiar la luz necesaria para los cultivos como las lámparas de descarga, sin embargo, como nos lo plantea Avinash Agarwal y S. Dutta Gupta en 2016 [1] la tecnología de lámparas con diodos emisores de luz tiene ventajas sobre la tecnología de descarga como economía, variabilidad etc.

Se habla en concreto de que ante la demanda del mercado actual Puebla sea capaz de mejorar su posición relativa en el mercado nacional compitiendo con otros estados no solo produciendo cantidades suficientes de cultivo o mejorando el precio, sino, a través de la implementación de tecnologías modernas focalizadas en el control adecuado de parámetros como la luz, y por medio de éstas tecnologías, se pueda producir cultivos más grandes y enriquecidos.

Con un producto con características superiores a la competencia la preferencia del consumidor estará asegurada y los productos de Puebla podrán competir incluso con el mercado de importación.

Aunque el problema tiene muchas facetas se tratará de enfocar la atención solo en el aspecto tecnológico. En el caso del riego por ejemplo, se usa el riego de temporal y también los productores cuentan con fuentes procedentes de pozos, este es rodado y en algunas parcelas se utiliza tubos desde los pozos. El riego rodado representa un desperdicio de agua. En estados como Guanajuato el riego se realiza por goteo o entubado lo que tecnifica y optimiza más del 80% de sus cultivos.

Se habla que, sólo en el caso de riego la técnica podría mejorar considerablemente si se mudara a tecnologías más modernas. Ahora bien, parámetros como la iluminación se controlan con filtros y mallas desde invernaderos o se usa cultivos

generalmente al intemperie.

0.4. Objetivo General

Diseñar un sistema de iluminación para un sistema de control de microclima para el cultivo de Jitomate (*Solanum lycopersicum L.*).

0.4.1. Objetivo Específico

- Estudiar y realizar el análisis del modelo dinámico del cultivo.
- Diseñar y simular la ley de control
- Diseñar el sistema electrónico de variación de intensidad de la lámpara.
- Construcción del sistema de control de iluminación.
- Implementar y realizar las pruebas físicas del sistema electrónico de variación de intensidad de la lámpara en un invernadero.
- Monitoriar el sistema en funcionamiento y tomar datos.
- Analizar los resultados para sacar conclusiones.

Capítulo 1

Antecedentes del trabajo

1.1. Agricultura protegida

El concepto de agricultura protegida es relativo a la agricultura de campo abierto. Utiliza técnicas artificiales para cambiar los factores climáticos como la luz natural, la temperatura y la humedad para crear condiciones ambientales adecuadas para el crecimiento de animales y plantas, lo que les permite crecer durante todo el día [11].

El cultivo protegido se remonta a hace mucho tiempo como los babilonios y los antiguos chinos. En Europa, la evolución de los invernaderos se puede rastrear desde el siglo XVI a lo largo de tres líneas de desarrollo:

- (i) Camas calientes con cubiertas acristaladas para el cultivo de frutas semi-tropicales, como los melones.
- (ii) Estructuras inclinadas construidas sobre muros orientados al sur para proporcionar protección adicional para las vide.
- (iii) Cobertizos de invernada excesiva para plantas subtropicales, como pequeños naranjos.

Esta última línea de desarrollo se convirtió en conservatorios de naranjas, que culminaron en grandes estructuras de hierro fundido y vidrio como el Palacio de Cristal en Londres durante la época victoriana. El primer invernadero de luz uniforme, una estructura simétrica totalmente acristalada a ambos lados de su eje longitudinal, se construyó a finales del siglo XVIII.

La necesidad de protección contra las heladas fue el ímpetu principal para el desarrollo de áreas de cultivo cubiertas y cobertizos para pasar el invierno. El calor se derivaba de la radiación solar, y además, en edificios más grandes, a veces se usaban fuegos abiertos y estufas. Los hornos con chimeneas para distribuir el calor entraron en uso común durante el siglo XVIII, seguidos por los sistemas de vapor,

agua caliente y aire caliente en el siglo XIX. El calentamiento de la zona de la raíz, que utiliza estiércol animal en descomposición y pozos de corteza, se remonta a la época prerrenacentista y persistió, a escala comercial, hasta principios de este siglo. El calentamiento subterráneo mediante (i) conductos subterráneos se probó por primera vez en el siglo XVIII; (ii) tuberías de vapor y agua caliente en el siglo XIX; y (iii) bobinas de resistencia eléctrica en el siglo XX. Los cobertizos para pasar el invierno a menudo incorporan un alto grado de aislamiento térmico y persianas; estas últimas se cerraron por la noche y pueden considerarse los antecedentes de las pantallas térmicas modernas, cuyo objetivo es reducir la tasa de pérdida de calor de los invernaderos, especialmente durante la noche. Se registraron pantallas o cortinas internas y externas como usadas para invernaderos durante el siglo XVIII. La electricidad también permitió el aire acondicionado y la ventilación controlada, que se introdujeron durante la década de 1930. La influencia de la concentración de gas de dióxido de carbono en el entorno artificial se investigó ya en la década de 1920, pero no fue hasta la década de 1960 que los gases de combustión de los calentadores de combustión de metano se utilizaron como fuente de dióxido de carbono suplementario para el entorno interno. La humidificación y el enfriamiento por evaporación de los invernaderos se introdujeron en la década de 1950.

Como material de cubierta alternativo al vidrio, el papel aceitado se probó en los Países Bajos a fines del siglo XVIII, y era de uso común en Japón hasta bien entrado el siglo XX. La película a base de celulosa también se probó, sin mucho éxito, a principios de este siglo. Después de la Segunda Guerra Mundial, los materiales plásticos (es decir, poliméricos) se hicieron más fácilmente disponibles. Se desarrollaron técnicas para usar láminas de plástico rígidas, y las películas de PVC y polietileno ahora a menudo se unen internamente al marco del invernadero para crear un espacio de aire aislante entre la cubierta exterior y el entorno artificial protegido. Se han desarrollado "túneles de polietileno" baratos y los invernaderos con apoyo aéreo menos comunes. Estos utilizan una película de plástico transparente ligera como material de cubierta [12].

Actualmente agricultura protegida esta presente en diversas partes del mundo, por ejemplo, el sector de invernaderos en Egipto ha logrado muchas historias de éxito relacionadas con la mejora de la seguridad alimentaria para los egipcios al proporcionar al mercado local durante la temporada de invierno una cantidad adecuada de cultivos de hortalizas y plantas ornamentales. Sin embargo, las exportaciones de productos de invernadero a los mercados extranjeros no son suficientes hasta ahora; Existen algunas limitaciones, como la adopción de tecnología moderna para el control del clima en invernaderos y la necesidad de desarrollarlas aún más, así como la implementación de la legislación de seguridad alimentaria durante los diferentes pasos de producción. Recientemente, Egipto ha establecido un megaproyecto nacional

para el establecimiento de 100,000 acres de invernaderos durante los próximos años. Este proyecto necesita mucha infraestructura, materiales, fabricación, mano de obra y técnicos [13].

1.2. Control de microclimas para invernaderos

Controlar el microclima en invernaderos es difícil porque están en juego múltiples variables interdependientes. El sistema de control ambiental de invernadero es un sistema complejo no lineal, de entrada múltiple y salida múltiple (MIMO). Se han utilizado varios tipos de algoritmos de control en el control de los sistemas de invernadero, como los derivados proporcionales-integrales-derivados (PID), no lineales, robustos, lógica difusa (FL), redes neuronales y algoritmos de control híbridos. En general, estos algoritmos de control se pueden clasificar como algoritmos de control clásicos, avanzados, inteligentes o híbridos.

1.2.1. Control PID en invernaderos

El control proporcional-integral-derivativo (PID) se usa más comúnmente en el control de invernaderos debido a su flexibilidad, simplicidad y buen rendimiento. El control PID no es adecuado para aplicaciones avanzadas, especialmente para el control dinámico no lineal. También es propenso a errores de liquidación en los que hay una pérdida de control y retraso de recuperación debido a un gran cambio en el punto de referencia.

Los algoritmos de control avanzados se aplica a los problemas de control que a menudo se caracterizan por retrasos de proceso extremadamente largos, un alto grado de interacción del proceso y múltiples restricciones operativas y perturbaciones del proceso medido. Son capaces de manejar sistemas MIMO no lineales con perturbaciones mejores que el control convencional, pero requieren alguna forma de modelos matemáticos en contraste con el control inteligente. Ejemplos de tales algoritmos son el modelo de control predictivo (MPC), retroalimentación / retroalimentación, controles adaptativos y robustos[14].

1.2.2. Control predictivo por modelo en invernaderos

El control predictivo(MPC) utiliza un modelo de proceso para obtener una variable manipulada, optimizando un objetivo en un intervalo de tiempo futuro. MPC ofrece una mejor opción para los sistemas PID al predecir eventos futuros y tomar medidas de control en consecuencia. Un componente crucial de MPC es un modelo preciso que describe las variables de control del sistema. Hay tres tipos

de modelos aplicados en MPC para controles de invernadero: modelos de primer principio, híbridos y basados en datos. Los modelos de primer principio se basan en ecuaciones de transferencia de calor y balance de masa. No se requieren datos de medición para la identificación de parámetros. Debido a la complejidad y al tiempo computacional de resolverlos, rara vez se usan en MPC. Los modelos híbridos, como los modelos de espacio de estado, se establecen en base a ecuaciones de balance de energía simplificadas y requieren datos de medición para determinar los parámetros clave del modelo. Los modelos de espacio de estado son los modelos más utilizados en MPC para invernaderos. Los modelos basados en datos utilizan datos de entrada y salida para aproximar el comportamiento del sistema en estudio y no proporcionan un significado físico explícito de la relación entre entradas y salidas. Incluyen redes neuronales, modelos autorregresivos, regresión evolutiva y máquinas de vectores de soporte (SVM).

Un modelo completo de invernadero para la operación de control debe incluir el modelo de energía y un modelo de crecimiento de cultivo. Como el propósito de la producción en invernadero es maximizar el rendimiento de los cultivos, es necesario un modelo de crecimiento de cultivos energéticos, tanto las condiciones climáticas como el crecimiento de los cultivos están interconectados y posteriormente afectan el uso de los recursos.

La optimización juega un papel clave en la formulación de un algoritmo MPC. El objetivo aquí es la minimización de una función de costo o la maximización de una función objetivo bajo ciertas condiciones de restricción. Cuando se utilizan múltiples funciones objetivo / costo, se denomina optimización multiobjetivo. Se ha explorado una amplia gama de funciones objetivo / costo en aplicaciones de invernadero[[15],[16],[17]]. El propósito de emplear el algoritmo MPC es el control de las variables deseadas tales como temperatura, humedad, concentración de CO_2 , etc. a través de la manipulación de porcentajes de apertura de ventanas, calentamiento de la temperatura del agua caliente, caudales de sistemas de niebla y flujos de inyección de CO_2 . Raramente se ha estudiado la manipulación energéticamente eficiente de la intensidad y calidad de la luz de crecimiento para el cultivo. Esto podría atribuirse al hecho de que nuestra comprensión del impacto de la intensidad y la calidad de la luz en las plantas es insuficiente para establecer un modelo de componente de iluminación tanto para el consumo de energía como para el crecimiento de la planta [14].

1.2.3. Control de lógica difusa en invernaderos

El Control de lógica difusa (FLC) es preferible a la lógica digital, ya que se puede transmitir en términos más comprensibles para un operador humano, interpolando

los valores de entrada como variables lógicas con valores de 0 a 1. Azaza [18] empleó un sistema inteligente basado en FLC para el control de la temperatura y humedad del invernadero. Con las tasas de ventilación y calefacción como variables de control, se logró un ahorro de 22 % y 33 % en energía y agua, respectivamente. El tiempo necesario para determinar la acción de control para FLC es una restricción. Además, algunas dinámicas no están bien representadas, especialmente cuando se desea tener una exclusividad mutua entre las acciones de control. Para el control de parámetros de invernadero, FL proporciona una buena flexibilidad, especialmente para sistemas con información de modelo incompleta. Sin embargo, el número de reglas requeridas aumenta exponencialmente para la mejora en la precisión. Además, dado que tiene en cuenta la experiencia experta en la formulación del modelo, se requiere un conocimiento exhaustivo de los estados operativos del sistema. Existe la necesidad de controladores difusos de uso general, precisos y de bajo costo para aplicaciones en invernaderos.

1.2.4. Control por redes neuronales en invernaderos

Los controles y redes neuronales son algunas de las formas más complejas de control. Estos sistemas informáticos están formados por elementos de procesamiento altamente conectados que responden dinámicamente a las entradas externas. Las redes neuronales generalmente están dispuestas en capas de nodos interconectados con una función de activación, con patrones presentados a la red por una capa de entrada que señala capas más profundas, con redes neuronales se controlan parámetros de invernadero sin la necesidad de un modelo matemático del comportamiento de la planta [19]. El procesamiento se lleva a cabo mediante un sistema de conexiones ponderadas y luego se vincula a una capa de salida donde se inicia el comando. Sin embargo, una desventaja de este método de control es que requiere un razonamiento basado en conocimiento experto integrado o basado en datos.

1.3. Control óptimo en invernaderos

Existen trabajos sobre el control óptimo de invernaderos alrededor del mundo. Por ejemplo en la universidad de Wageningen en Holanda [20] o en Estados Unidos [21].

En México la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla ha trabajado con el uso de control óptimo y diferentes modelos de cultivos para control de microclima de invernaderos. Ésta universidad ha publicado diversos artículos y tesis sobre el tema.[22]

Uno de los trabajos en específico controla el microclima de un invernadero y

considera el modelo matemático TOMGRO, control óptimo y la temperatura como parámetro de control [23].

Tomando el artículo antes mencionado como base, este trabajo propone partir con el mismo modelo matemático TOMGRO para usar el control óptimo y controlar un microclima, sin embargo, se propone a diferencia del trabajo previo, usar la luz como parámetro de entrada de control en lugar de la temperatura.

Capítulo 2

Modelo matemático usado en la tesis

2.1. Modelos matemáticos de cultivos

Los modelos de simulación constituyen una herramienta fundamental para entender la complejidad que caracteriza los sistemas ecológicos y ambientales. Esto se debe a que son la única herramienta disponible para traducir una colección de hipótesis acerca de procesos ecológicos en una representación de cómo el ecosistema funciona en su totalidad. Estos permiten realizar análisis de impactos tecnológicos, económicos y ambientales, la evaluación de estrategias productivas y los pronósticos del rendimiento de los cultivos. Su empleo se enfoca generalmente a comprender mejor los problemas y anticipar la realidad que se investiga. Un buen modelo es capaz de revelar interacciones entre los diferentes componentes que no eran evidentes al estudiar cada uno de los procesos separadamente y permitirá ensayar experimentos que no se podrían realizar en el sistema real[24].

Debido a su orientación y adaptación hacia la simulación del crecimiento y desarrollo de cultivos anuales, CERES, APSIM y STICS sobresalen dentro del grupo de modelos de producción de cultivos. CERES modela el crecimiento y desarrollo de cereales como cebada, trigo, arroz, maíz y sorgo. En el modelo básico, la tasa de crecimiento se calcula con base en la interceptación de luz y la eficiencia en el uso de la radiación.

APSIM se desarrolló en Australia, por la unidad de investigación de sistemas de producción agrícola, para simular procesos biofísicos del suelo como cambios en el pH, balance de agua, nitrógeno y fósforo, entre otros.

El INRA de Francia en colaboración con otros centros o institutos como CIRAD (Centro de cooperación internacional en investigación agrónomi-ca para el desarrollo), CEMAGREF (Centro de maquinaria agrícola), ITCF (Instituto técnico de cereales y forrajes), CETIOM (Centro técnico inter-profesional de oleaginosas) y AGPM (Asociación general de productores de maíz), entre otros, desarrollaron el

STIC (Simulateur multidisciplinaire pour les cultures standard) a partir de 1996. Las variables de entrada de este modelo están relacionadas con el clima, el suelo y el sistema de cultivo (radiación, temperatura máxima y mínima, precipitación, evapotranspiración, humedad), mientras que las variables de salida incluyen rendimiento en términos de calidad y cantidad, fenología, distribución de masa seca y variables ambientales relacionadas con drenaje y pérdida de nitrato.

Los modelos desarrollados en Wageningen (LINTUL, SUCROS, ORYZA, WOFOST e INTERCOM) son los más grandes y amplios sistemas de modelación. Los mayores logros alcanzados con el desarrollo de este grupo de modelos son:

1. Amplia variedad de enfoques en sistemas de modelación con diferentes escalas y propósitos.
2. Contribución a los sistemas cuantitativos en general y las aplicaciones en niveles jerárquicos.
3. Contribución al entendimiento de los cultivos y sistemas de producción como herramienta de soporte en la formación de profesionales.

Otros modelos de cultivo de interés agrícola son: ALSIM (alfalfa), AUSCANE (caña de azúcar), SUN 51 (girasol), POTATOE (papa), SUBSTOR (yuca, ñame, piña), PNUYGRO (maní), BEANGRO (fríjol), WINSORG (sorgo) y GOS-SYM (algodón), entre otros. En relación con cultivos hortícolas, tomate es una de las especies en la que se han desarrollado varios modelos de simulación; sin embargo, sólo algunos (TOMGRO, TOMSIM, TOMPOUSSE) simulan el crecimiento, desarrollo y producción.

TOMGRO es un modelo que se basa en la fotosíntesis, describe el desarrollo fenológico y el incremento en masa seca de los diferentes órganos de la planta desde trasplante hasta el fin de cosecha, bajo condiciones variables de radiación solar, temperatura y concentración de CO_2 , la acumulación de masa seca responde al balance de carbono: asimilación de CO_2 , respiración de mantenimiento y de crecimiento; mientras que la partición de asimilados obedece a la fuerza vertedero y a la edad del órgano. Por último, la organogénesis y la duración de los órganos dependen principalmente de la temperatura[25].

2.1.1. Modelo usado en este trabajo

Se trabajará con el modelo matemático presentado en [23] y derivado del modelo matemático TOMGRO, por eso en éste apartado se detallará el modelo. La aportación de éste trabajo es optimizar mediante un control óptimo el parámetro de iluminación dentro del modelo.

El cultivo se divide en el número de nodos N , materia seca del dosel W_c , y acumulación de biomasa de la raíz W_r .

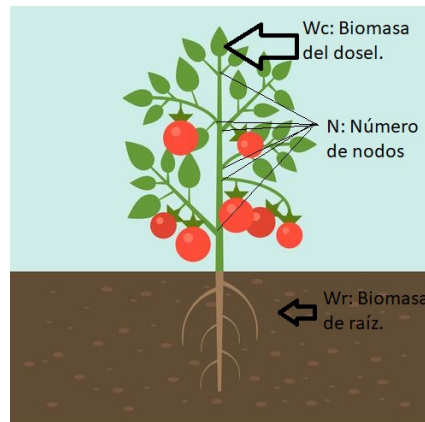


Figura 2.1: Visualización física de las variables de estado del modelo

En la figura 2.1 se hace notar que significan las variables de estado en la planta de jitomate, la materia seca del dosel W_c se refiere a toda la biomasa que se levanta por encima de la tierra, tallo, hojas y fruto.

W_r se refiere a la biomasa que se encuentra por debajo de la tierra, es decir, la biomasa de raíz.

N es el número de nodos que tienen frutos, es decir los nodos más importantes.

2.1.2. Número de Nodos (N)

Un nodo es el punto del tallo donde se origina una hoja o un capullo o una rama ramificada.

La tasa de cambio de la aparición de nodos en la planta con respecto al tiempo se modela con un número máximo de nodos y una función que lo decrementa con respecto a la temperatura.

$$\frac{d}{dt}N = N_m \cdot f_N(T_g) \quad (2.1)$$

donde :

N es el Número de nodos y es adimensional.

N_m es el número máximo de nodos por día (nodos d^{-1}).

T_g es la Temperatura al interior del invernadero ($^{\circ}C$).

$f_N(T_g)$ es la función que modifica el desarrollo del número de Nodos ($^{\circ}C$).

$f_N(T_g)$ es la reducción de desarrollo vegetativo bajo temperaturas no óptimas,

es una función lineal a tramos que depende de la temperatura:

$$f_N(T_g) = \begin{cases} 0 & T_g \leq 8^\circ C \\ 0.55 & T_g = 12^\circ C \\ 1 & T_g = 30^\circ C \\ 0 & T_g \geq 50^\circ C \end{cases} \quad (2.2)$$

2.1.3. Materia seca del dosel W_c

El cambio de la materia seca del dosel en el tiempo representa el crecimiento del cuerpo de la planta que sobresale de la tierra.

$$\frac{d}{dt}W_c = E(P_g - R_m(W_r + W_c))f_c \quad (2.3)$$

donde:

W_c es la biomasa del dosel (g tejido $m^{-2} d^{-1}$).

W_r es la biomasa de la raíz (g tejido $m^{-2} d^{-1}$).

R_m es la velocidad de respiración de mantenimiento (g CH_2O)/(g tejido d).

E es la eficiencia de conversión de el tejido de la planta (g tejido)/(g CH_2O).

P_g es la velocidad de la fotosíntesis bruta en el dosel (g tejido $m^{-2} d^{-1}$).

F_c es la constante para todo nodo y es adimensional.

donde la P_g es una función descrita de la siguiente manera:

$$P_g = D \frac{\tau C p(T_g)}{K} \ln \left| \frac{\alpha K I_o + (1 - m)\tau C}{\alpha K I_o e^{-K Lai} + (1 - m)\tau C} \right| \quad (2.4)$$

donde:

D es el coeficiente de conversión de fotosíntesis ($\mu\text{mol } CO_2$)/(m^2s) a (g CH_2O)/(m^2h).

τ es la conductancia de la hoja a CO_2 ($\mu\text{mol } CO_2$)/($m^2\text{hoja s}$).

C es la concentración de CO_2 en el aire ($\mu\text{mol } CO_2$)/(mol aire).

$p(T_g)$ es el factor de reducción de fotosíntesis y es adimensional.

α es la eficiencia de la utilización de la luz en la hoja ($\mu\text{mol } CO_2$)/($\mu\text{mol fotones}$).

K es el coeficiente de extinción de la luz en el dosel y es adimensional.

I_o es la densidad del flujo de la luz en el tope del dosel ($\mu\text{mol fotones}$)/($m^2\text{suelo s}$).

m es el coeficiente de transmisión de luz de la hoja y es adimensional.

LAI es el índice de area foliar del dosel ($m^2\text{hoja}/(m^2\text{suelo})$).

La función $p(T_g)$ expresa el efecto de la temperatura en la velocidad máxima de la fotosíntesis para una hoja simple, expresada como una ecuación cuadrática con

T :

$$p(T_g) = \left[1 - \left(\frac{\Phi_h - T_g}{\Phi_h - \Phi_1} \right)^2 \right] \quad (2.5)$$

donde:

Φ_h es la temperatura a la cual la fotosíntesis de la hoja es máxima ($^{\circ}\text{C}$).

Φ_1 es la temperatura por debajo donde la fotosíntesis en la hoja es cero ($^{\circ}\text{C}$).

La tasa de respiración de mantenimiento, la cual representa la pérdida de CO_2 debida al gasto y re-síntesis del tejido existente y dependiente de la temperatura:

$$R_m = K_m e^{0.0693(T_g - 25)} \quad (2.6)$$

donde:

K_m es la temperatura a la cual la fotosíntesis de la hoja es máxima ($^{\circ}\text{C}$).

Para la función Densidad del flujo de la luz en el tope del dosel (I_o) se asume una longitud de 12 horas del día por lo cual se propone la siguiente función:

$$I_o = \begin{cases} I_m \text{sen}(2\pi(t_d - 6)) & I_o > 0 \\ 0 & I_o \leq 0 \end{cases} \quad (2.7)$$

donde:

I_m es la máxima densidad de flujo al día ($\mu\text{mol fotonos}/(\text{m}^2\text{suelo s})$).
 t_d es el tiempo solar en días (d).

La ecuación del índice de área foliar del dosel, es una ecuación obtenida empíricamente y denotada de la siguiente forma:

$$LAI = \frac{\rho\delta}{\beta} \ln(1 + e^{\beta(N - n_b)}) \quad (2.8)$$

donde:

ρ es la densidad de la planta (número/ m^2).

δ es la expansión máxima de la hoja por nodo ($\frac{\text{m}^2[\text{hoja}]}{\text{nodos}}$).

β es el coeficientes expolineal (nodos $^{-1}$).

n_b es la máxima tasa de aparición de nodos (nodos).

2.1.4. Biomasa seca de la raíz (W_r)

La función que describe la biomasa total de la raíz es la siguiente:

$$\frac{d}{dt}W_r = E(P_g - R_m(W_r + W_c))(1 - f_c) \quad (2.9)$$

2.2. Modelo de invernadero

Una vez descrito el comportamiento de la planta se deberá describir el comportamiento del invernadero.

2.2.1. Temperatura del aire (T_g)

La primera ecuación del invernadero describe el cambio de temperatura cuando evoluciona el tiempo.

$$C_g \frac{d}{dt}T_g = k_v(T_o - T_g) + \alpha_o I_c + k_r(T_o - T_g) + k_s(T_s - T_g) + \eta I_o \quad (2.10)$$

donde:

T_o es la temperatura externa ($^{\circ}\text{C}$).

I_c es la entrada de calor por radiación de las lámparas ultravioleta. ($^{\circ}\text{C}$).

α_o es la constante que convierte las unidades de intensidad de luz en calor ($\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Wm}^{-2}}$).

T_s es la temperatura del suelo del invernadero ($^{\circ}\text{C}$).

I_o es la radiación de onda corta entrante (Wm^{-2}).

η es el factor de conversión de radiación ($\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Wm}^{-2}}$).

C_g es la capacidad de calor del invernadero ($\text{J}^{\circ}\text{C}^{-1}\text{m}^{-2}$).

k_v es el coeficiente de transferencia de calor por ventilación ($\text{W}^{\circ}\text{Cm}^{-2}$).

k_r es el coeficiente de transferencia de calor en el techo ($\text{W}^{\circ}\text{Cm}^{-2}$).

k_s es el coeficiente de transferencia de calor en el suelo, n ($\text{W}^{\circ}\text{Cm}^{-2}$).

A su vez la variable C_g está descrita de la siguiente manera:

$$C_g = c_p \rho V \quad (2.11)$$

donde:

ρ es el coeficiente del plástico (W/m^2).

c_p es el calor específico del aire (W/Kg).

V es el volumen del invernadero (m^3).

2.2.2. Modelo de Humedad en el aire del invernadero (V_i)

La evolución de la humedad con respecto al tiempo se escribe mediante la siguiente ecuación diferencial.

$$\frac{d}{dt}V_i = \frac{A_g}{v_g}(E_t - G_v(V_i - V_o)) \quad (2.12)$$

donde:

V_i es la concentración de vapor de agua en el aire al interior del invernadero (%).
 V_o es la concentración de vapor de agua en el aire al exterior del invernadero (%).
 $\frac{A_g}{v_g}$ Altura promedio del invernadero (m).
 G_v es el flujo de ventilación ($kg.m^{-3}$).

Igualmente existe una absorción de agua por parte del cultivo llamada transpiración del cultivo y se describe de la siguiente manera:

$$E_t = \frac{2LAI}{(1 + \varepsilon)r_b + r_s} \left[VCD + \frac{\varepsilon r_b}{2LAI} \frac{R_n}{L} \right] \quad (2.13)$$

donde:

L es el calor latente de vaporización de agua constante y cercana (gm^{-3}).
 LAI es el índice de área foliar (adimensional).
 r_b es la resistencia a la transferencia de calor de la capa límite de la hoja ($s m^{-1}$).

al igual que el promedio de calor latente sensible contenida en el aire por el cambio de $1^\circ C$ en la temperatura del aire esta descrito por

$$\varepsilon = 0.7584e^{0.0518T_g} \quad (2.14)$$

El déficit de concentración de vapor del aire esta descrito por:

$$VCD = \frac{100 - V_i}{100} 5.5638e^{0.572T_g} \quad (2.15)$$

La resistencia estomática:

$$r_s = 82 \frac{\frac{R_n}{2LAI} + 4.3}{\frac{R_n}{2LAI} + 0.54} (1 + 0.023(T_g - 24.5)^2) \quad (2.16)$$

junto con la radiación neta del cultivo:

$$R_n = 0.86(1 - e^{-0.7LAI})I_o \quad (2.17)$$

2.3. Modelo completo

Las ecuaciones anteriores no solo describen el crecimiento de la planta de tomate, si no también describe variables físicas importantes para el crecimiento de ésta. Así las 5 ecuaciones son sintetizadas de la siguiente manera:

$$\frac{d}{dt}N = N_m \cdot f_N(T) \quad (2.18)$$

$$\frac{d}{dt}W_c = E(P_g - R_m(W_r + W_c))f_c \quad (2.19)$$

$$\frac{d}{dt}W_r = E(P_g - R_m(W_r + W_c))(1 - f_c) \quad (2.20)$$

$$\frac{d}{dt}T_g = \frac{1}{C_g}(k_v(T_o - T_g) + \alpha_o I_c + k_r(T_o - T_g) + k_s(T_s - T_g) + \eta I_o) \quad (2.21)$$

$$\frac{d}{dt}V_i = \frac{A_g}{v_g}(E - G_v(V_i - V_o)) \quad (2.22)$$

El modelo es una selección de ecuaciones del modelo original TOMGRO. El modelo mostrado en esta tesis es tomado de un capítulo completo de un trabajo previo [26].

2.4. Análisis del modelo usado

Simular el sistema completo da pauta a una selección de variables, estas variables se pueden encontrar en la literatura (Tabla 2.1), las cuales son parámetros medidos para el crecimiento vegetativo y que son idénticos en muchas regiones del mundo. Sin embargo, no todos los parámetros funcionan, algunos de ellos fueron ligeramente modificados, esto se debe principalmente a la región de Puebla donde crece el cultivo y fueron proporcionados por el COLEGIO de POS-GRADUADOS de Puebla (COLPOS) [9], estos parámetros se muestran en la tabla 2.2.

Parámetro	Cantidad	Parámetro	Cantidad
N_m	0.021	E	0.7
D	0.108	τ	0.0664
C	350	K	0.58
m	0.1	α	0.056
I_m	800	ϕ_h	30
ϕ_1	5	ρ	4
δ	0.074	β	0.38
n_b	0.38	r_b	100

Tabla 2.1: Parámetros del modelo tomados de la literatura.

Parámetro	Literatura	Estimado por COLPOS
τ	0.0693	0.0664
α	0.0645	0.056
n_b	13	13.3
δ	0.041	0.074
β	0.22	0.38
ρ	3.5	4

Tabla 2.2: Parametros proporcionados por el COLEGIO DE POS-GRADUADOS

Capítulo 3

Obtención de la trayectoria de entrada de control

3.1. Obtención de la trayectoria de entrada de control

Es necesario aclarar que debido a la similitud con el sistema de control de [26] el desarrollo de control es parecido que en el mostrado en el texto con un cambio en la variable de entrada. Como no se va a usar un sistema de calefacción sino lámparas la entrada ahora se conoce como I_c .

Una vez definido el modelo en el capítulo previo, se necesita resolver el problema de control óptimo, para ello se necesita un criterio de desempeño del sistema, que se usará para general el control. El criterio de desempeño se elige de acuerdo a las necesidades del problema, sin embargo, sea cual fuere el criterio que se elija, para este problema, el índice de desempeño que modela el criterio elegido debe tener la siguiente forma:

$$J = \phi(x(t_f), t_f) + \int_{t_o}^{t_f} L(x(t), u(t), t) dt \quad (3.1)$$

donde t_o y t_f son el tiempo inicial y final ϕ y $L(x(t), u(t), t)$ son funciones escalares, t_f puede ser fijo o libre. Empezando en el estado inicial $x(t_o) = x_o$ y aplicando la señal de control $u(t)$ para $t \in [t_o, t_f]$ se logra que el sistema siga alguna trayectoria de estados, entonces el índice de desempeño asigna un número real único a cada trayectoria del sistema.

En este caso para nuestro sistema el índice de desempeño se encuentra descrito

de la siguiente manera:

$$J = \frac{1}{2}(N^2(t_f) + W_r^2(t_f) + W_c^2(t_f) + V_i^2(t_f)) + \int_{t_o}^{t_f} \frac{1}{2}(-N^2(t) - W_r^2(t) - W_c^2(t) + I_c^2(t)) \quad (3.2)$$

El diseño que de este índice de desempeño se toma en cuenta que se desea maximizar las variables de estados para el cultivo, en este caso el número de nodos, la biomasa del dosel, la biomasa de la raíz, y minimizar la energía suministrada para la temperatura en el interior del invernadero.

El problema de control óptimo u optimización es encontrar un control admisible $u^*(t)$ el cual causa que el sistema

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t) \quad (3.3)$$

siga una trayectoria admisible $x^*(t)$ que minimiza una medida de desempeño:

$$J = \phi(x(t_f), t_f) + \int_{t_o}^{t_f} L(x(t), u(t), t) dt \quad (3.4)$$

con un vector de multiplicadores de Lagrange variantes en el tiempo $\boldsymbol{\lambda}(t)$ como sigue:

$$J = \phi(x(t_f), t_f) + \int_{t_o}^{t_f} L(x(t), u(t), t) + \boldsymbol{\lambda}^T(\mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t) - \dot{\mathbf{x}}) dt \quad (3.5)$$

y definiendo la función escalar Hamiltoniana $H(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \boldsymbol{\lambda}(t))$ como:

$$H(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \boldsymbol{\lambda}(t)) = L(x(t), u(t), t) + \boldsymbol{\lambda}^T \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t) \quad (3.6)$$

Integrando la ecuación:

$$J = \phi(x(t_f)) - \boldsymbol{\lambda}^T(t_f)x(t_f) + \boldsymbol{\lambda}^T(t_o)x(t_o) + \int_{t_o}^{t_f} (H(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \boldsymbol{\lambda}(t)) + \dot{\boldsymbol{\lambda}}^T(t)x(t)) dt \quad (3.7)$$

considerando ahora una variación infinitesimal en $u(t)$, $\delta u(t)$. Esta variación produce una variación en la trayectoria de los estados $\delta x(t)$ y una variación en el índice de desempeño δJ . Esta última variación puede ser calculada como sigue:

$$\delta J = \left[\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} - \boldsymbol{\lambda}^T \right) \right]_{t=t_f} + [\boldsymbol{\lambda}^T \delta x]_{t=t_f} + \int_{t_o}^{t_f} \left[\left(\frac{\partial}{\partial x} H + \boldsymbol{\lambda}^T \right) \delta x + \frac{\partial}{\partial x} H \delta u \right] dt \quad (3.8)$$

Para evitar tener que determinar las funciones $\delta x(t)$ producidas por $\delta u(t)$ se eligen

los multiplicadores $\lambda(t)$ de tal manera que los coeficientes de $\delta x(t)$ y $\delta x(t_f)$ en la ecuación anterior desaparezcan. Está ecuación se consideran los co-estados. Eligiendo entonces:

$$\dot{\lambda}^T = -\frac{\partial}{\partial x}H = -\frac{\partial}{\partial x}L - \lambda^T \frac{\partial}{\partial x}f \quad (3.9)$$

con las condiciones de la frontera:

$$\lambda^T(t_f) = \frac{\partial}{\partial x}\phi(t_f) \quad (3.10)$$

Entonces δJ se transforma en:

$$\delta J = \lambda^T(t_o)\delta x(t_o) + \int_{t_o}^{t_f} \frac{\partial}{\partial u}H\delta u dt \quad (3.11)$$

Si $x(t_o)$ esta especificada, entonces $\delta x(t_o) = 0$. Para una solución estacionaria se requiere $\delta J = 0$ para una variación arbitrario $\delta u(t)$. Esto sucede solamente sí:

$$\frac{\partial}{\partial u}H = \frac{\partial}{\partial u}L + \lambda^T \frac{\partial}{\partial u}f = 0 \quad (3.12)$$

en $t_o \leq t \leq t_f$, está ecuación es llamada la condición estacionaria.

La condición estacionaria representa que no va a existir cambio en el índice de desempeño con respecto a las variables de estado cuando varíe la entrada del sistema. Esto quiere decir que el sistema se mantendra en la trayectoria deseada apesar de variaciones indeseadas.

En nuestro caso con las ecuaciones descritas del modelo dinámico del cultivo y microclima se construye la siguiente ecuación Hamiltoniana

$$\begin{aligned} H(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \boldsymbol{\lambda}(t)) = & \frac{1}{2}(-N^2(t) - W_r^2(t) - W_c^2(t) + I_c^2(t) - V_i^2(t)) + \\ & + \lambda_1(t)\dot{x}_1(t) + \lambda_2(t)\dot{x}_2(t) + \lambda_3(t)\dot{x}_3(t) + \lambda_4(t)\dot{x}_4(t) + \\ & + \lambda_5(t)\dot{x}_5(t) \end{aligned} \quad (3.13)$$

donde cada uno de los co-estados se obtiene de la siguiente manera:

debido a la ecuación que es el índice de área foliar, una función dependiente de los nodos. Esto excluye a los estados x_1 y x_4 de la ecuación Hamiltoniana, por lo tanto:

$$\dot{\lambda}_1 = -\frac{\partial}{\partial N}H = -\left(-N + \lambda_1 \frac{\partial}{\partial N}x_2 + \lambda_2 \frac{\partial}{\partial N}x_3 + \lambda_5 \frac{\partial}{\partial N}x_5\right) \quad (3.14)$$

desarrollando cada una de las derivadas parciales con regla de la cadena:

$$\frac{\partial}{\partial N} x_2 = E f_c \frac{\partial}{\partial N} P_g \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial}{\partial N} P_g = \frac{DC\tau p(T_g)}{K} \left(\frac{\frac{\partial}{\partial N} \left(\frac{\alpha K I_o + (1-m)\tau C}{\alpha K I_o e^{-KLai} + (1-m)\tau C} \right)}{\left(\frac{\alpha K I_o + (1-m)\tau C}{\alpha K I_o e^{-KLai} + (1-m)\tau C} \right)} \right) \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial}{\partial N} \left(\frac{\alpha K I_o + (1-m)\tau C}{\alpha K I_o e^{-KLai} + (1-m)\tau C} \right) = \left(\frac{-\alpha K I_o (\alpha K I_o + (1-m)\tau C)}{(\alpha K I_o e^{-KLai} + (1-m)\tau C)^2} \right) \frac{\partial}{\partial N} e^{-KLai} \quad (3.17)$$

$$\frac{\partial}{\partial N} e^{-KLai} = -K e^{-KLai} \frac{\partial}{\partial N} LAI \quad (3.18)$$

$$\frac{\partial}{\partial N} LAI = \frac{\rho \delta e^{B(N-N_b)}}{1 + e^{B(N-N_b)}} \quad (3.19)$$

por tanto:

$$\frac{\partial}{\partial N} x_2 = \frac{E f_c DC\tau p(T_g) \alpha K I_o \rho \delta e^{B(N-N_b)}}{(1 + e^{B(N-N_b)}) (\alpha K I_o e^{-KLai} + (1-m)\tau C)} \quad (3.20)$$

debido a la gran similitud entre la biomasa del dosel con el de la raíz, la derivada parcial de x_3 es:

$$\frac{\partial}{\partial N} x_3 = \frac{E(1-f_c) DC\tau p(T_g) \alpha K I_o \rho \delta e^{B(N-N_b)}}{(1 + e^{B(N-N_b)}) (\alpha K I_o e^{-KLai} + (1-m)\tau C)} \quad (3.21)$$

para el quinto estado se considera la transpiración del cultivo, esta variable es dependiente de LAI y esta a su vez de los nodos, por tanto:

$$\frac{\partial}{\partial N} x_5 = \frac{A_g}{V_g} \frac{\partial}{\partial N} E_t \quad (3.22)$$

la ecuación de la transpiración del cultivo puede reescribirse:

$$E_t = \frac{1}{(1 + \varepsilon)r_b + r_s} \left(2LAI \cdot VCD + \frac{\varepsilon r_b R_n}{L} \right) \quad (3.23)$$

esta disposición facilita la derivada parcial con respecto de los nodos

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial N} E_t &= \left(2LAI \cdot VCD + \frac{\varepsilon r_b R_n}{L} \right) \frac{\partial}{\partial N} \left(\frac{1}{(1 + \varepsilon)r_b + r_s} \right) + \\ &+ \left(\frac{1}{(1 + \varepsilon)r_b + r_s} \right) \frac{\partial}{\partial N} \left(2LAI \cdot VCD + \frac{\varepsilon r_b R_n}{L} \right) \end{aligned} \quad (3.24)$$

$$\frac{\partial}{\partial N} \left(\frac{1}{(1 + \varepsilon)r_b + r_s} \right) = \frac{-\frac{\partial}{\partial N} r_s}{((1 + \varepsilon)r_b + r_s)^2} \quad (3.25)$$

$$\frac{\partial}{\partial N} r_s = (1 + 0.023(T_g - 24.5)^2) \frac{\partial}{\partial N} \left(\frac{\frac{R_n}{2LAI} + 4.3}{\frac{R_n}{2LAI} + 0.54} \right) \quad (3.26)$$

$$\frac{\partial}{\partial N} \left(\frac{\frac{R_n}{2LAI} + 4.3}{\frac{R_n}{2LAI} + 0.54} \right) = \left(\frac{-3.76}{\left(\frac{R_n}{2LAI} + 0.54\right)^2} \right) \frac{\partial}{\partial N} \frac{R_n}{2LAI} \quad (3.27)$$

$$\frac{\partial}{\partial N} \frac{R_n}{2LAI} = \frac{1}{2} \frac{(LAI \frac{\partial}{\partial N} R_n - R_n \frac{\partial}{\partial N} LAI)}{LAI^2} \quad (3.28)$$

$$\frac{\partial}{\partial N} R_n = 0.602e^{-0.7LAI} I_o \frac{\partial}{\partial N} LAI \quad (3.29)$$

$$\frac{\partial}{\partial N} \left(2LAI \cdot VCD + \frac{\varepsilon r_b R_n}{L} \right) = 2VCD \frac{\partial}{\partial N} LAI + \frac{\varepsilon r_b}{L} \frac{\partial}{\partial N} R_n \quad (3.30)$$

para el segundo co-estado:

$$\dot{\lambda}_2 = -\frac{\partial}{\partial W_c} H = -(-ER_m f_c \lambda_2 - ER_m(1 - f_c) \lambda_3 - W_c) \quad (3.31)$$

y el tercer co-estado:

$$\dot{\lambda}_3 = -\frac{\partial}{\partial W_r} H = -(-ER_m f_c \lambda_2 - ER_m(1 - f_c) \lambda_3 - W_r) \quad (3.32)$$

el cuarto co-estado implica a cada uno de los estados por lo tanto:

$$\dot{\lambda}_4 = -\frac{\partial}{\partial T_g} H = -\left(\frac{\partial}{\partial T_g} x_1 + \frac{\partial}{\partial T_g} x_2 + \frac{\partial}{\partial T_g} x_3 + \frac{\partial}{\partial T_g} x_4 + \frac{\partial}{\partial T_g} x_5 \right) \quad (3.33)$$

para cada derivada parcial con respecto de la temperatura al interior del invernadero:

$$\frac{\partial}{\partial T_g} \dot{x}_1 = N_m(-3.22 \times 10^{-6} T_g^3 + 2.3 \times 10^{-4} T_g^2 - 6.1 \times 10^{-6} T_g + 7.68 \times 10^{-2}) \quad (3.34)$$

$$\frac{\partial}{\partial T_g} \dot{x}_2 = E \left(\frac{\partial}{\partial T_g} P_g - \frac{\partial}{\partial T_g} R_m(W_c + W_r) \right) f_c \quad (3.35)$$

$$\frac{\partial}{\partial T_g} \dot{x}_3 = E \left(\frac{\partial}{\partial T_g} P_g - \frac{\partial}{\partial T_g} R_m(W_c + W_r) \right) (1 - f_c) \quad (3.36)$$

$$\frac{\partial}{\partial T_g} \dot{x}_4 = -\frac{1}{C_g} (k_v + k_r + k_s) \quad (3.37)$$

$$\frac{\partial}{\partial T_g} \dot{x}_5 = \frac{A_g}{V_g} \frac{\partial}{\partial T_g} E_t \quad (3.38)$$

y cada derivada parcial con respecto de la temperatura al interior del invernadero

$$\frac{\partial}{\partial T_g} P_g = \frac{D\tau C}{K} \ln \left| \frac{\alpha K I_o + (1-m)\tau C}{\alpha K I_o e^{-KLai} + (1-m)\tau C} \right| \frac{\partial}{\partial T_g} p(T_g) \quad (3.39)$$

$$\frac{\partial}{\partial T_g} p(T_g) = 2 \left(\frac{\phi_h - T_g}{\phi_h - \phi_1} \right) \quad (3.40)$$

$$\frac{\partial}{\partial T_g} R_m = 0.0693 R_m \quad (3.41)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial T_g} E_t = 2LAI \left[\left(VCD + \frac{\varepsilon r_b}{2LAI} \frac{R_n}{L} \right) \frac{\partial}{\partial T_g} \left(\frac{1}{(1+\varepsilon)r_b + r_s} \right) \right. \\ \left. + \left(\frac{1}{(1+\varepsilon)r_b + r_s} \right) \left(\frac{\partial}{\partial T_g} VCD + \frac{r_b R_n}{2LAI \cdot L} \cdot \frac{\partial}{\partial T_g} \varepsilon \right) \right] \end{aligned} \quad (3.42)$$

$$\frac{\partial}{\partial T_g} \left(\frac{1}{(1+\varepsilon)r_b + r_s} \right) = -\frac{\left(r_b \frac{\partial}{\partial T_g} \varepsilon + \frac{\partial}{\partial T_g} r_s \right)}{[(1+\varepsilon)r_b + r_s]^2} \quad (3.43)$$

$$\frac{\partial}{\partial T_g} \varepsilon = 0.0572 \varepsilon \quad (3.44)$$

$$\frac{\partial}{\partial T_g} r_s = 3.772 \left[\left(\frac{\frac{R_n}{2LAI} + 4.3}{\frac{R_n}{2LAI} + 0.54} \right) (T_g - 24.5) \right] \quad (3.45)$$

$$\frac{\partial}{\partial T_g} VCD = 3.18032 e^{0.572 T_g} \quad (3.46)$$

Para el quinto y ultimo co-estado:

$$\dot{\lambda}_5 = -\frac{\partial}{\partial V_i} H = \frac{A_g}{V_g} \left(\frac{0.1113 e^{0.572 T_g} LAI}{(1+\varepsilon)r_b + r_s} + G_v \lambda_5 \right) \quad (3.47)$$

la ecuación para la condición de estado estacionario

$$\frac{\partial}{\partial u} H = I_c + \lambda_4 = 0 \quad (3.48)$$

$$I_c = -\lambda_4 \quad (3.49)$$

por tanto, la ecuación queda

$$C_g \frac{d}{dt} T_g = k_v(T_o - T_g) - \lambda_4 + k_r(T_o - T_g) + k_s(T_s - T_g) + \eta I_o \quad (3.50)$$

Entonces para encontrar la función vector de control $u(t)$ que produce un valor estacionario del índice de desempeño J deben resolverse las ecuaciones diferenciales de los estados y los co-estados.

Sin embargo por el tiempo inverso las ecuaciones cambian, esto debido a que tenemos los sistemas, los estados con una condición inicial, y los co-estados con una condición final, por ese motivo se utiliza el tiempo inverso,

$$\tau = t_f - t \quad (3.51)$$

$$\frac{d}{dt} \tau = -1 \quad (3.52)$$

$$d\tau = -dt \quad (3.53)$$

Por tanto, el sistema de ecuaciones completo queda de la siguiente manera:

$$\dot{x}_1 = N_m \cdot f_N(T) \quad (3.54)$$

$$\dot{x}_2 = E(P_g - R_m(W_c + W_r))f_c \quad (3.55)$$

$$\dot{x}_3 = E(P_g - R_m(W_c + W_r))(1 - f_c) \quad (3.56)$$

$$C_g \dot{x}_4 = k_v(T_o - T_g) - \alpha_4 + k_r(T_o - T_g) + k_s(T_s - T_g) + \eta I_o \quad (3.57)$$

$$\dot{x}_5 = \frac{A_g}{v_g}(E - G_v(V_i - V_o)) \quad (3.58)$$

$$\dot{\lambda}_1 = \lambda_1 \frac{\partial}{\partial N} \dot{x}_2 + \lambda_2 \frac{\partial}{\partial N} \dot{x}_3 + \lambda_5 \frac{\partial}{\partial N} \dot{x}_5 - N \quad (3.59)$$

$$\dot{\lambda}_2 = -(ER_m f_c \lambda_2 + ER_m(1 - f_c) \lambda_3 + W_c) \quad (3.60)$$

$$\dot{\lambda}_3 = -(ER_m f_c \lambda_2 + ER_m(1 - f_c) \lambda_3 + W_r) \quad (3.61)$$

$$\dot{\lambda}_4 = \frac{\partial}{\partial T_g} \dot{x}_1 + \frac{\partial}{\partial T_g} \dot{x}_2 + \frac{\partial}{\partial T_g} \dot{x}_3 + \frac{\partial}{\partial T_g} \dot{x}_4 + \frac{\partial}{\partial T_g} \dot{x}_5 \quad (3.62)$$

$$\dot{\lambda}_5 = -\frac{A_g}{V_g} \left(\frac{0.1113e^{0.572T_g} LAI}{(1 + \varepsilon)r_b + r_s} + G_v \lambda_5 \right) \quad (3.63)$$

3.2. Simulación del cultivo de jitomate en un periodo de cosecha con el sistema de control usado

Para la simulación se utilizó el software de simulación libre OCTAVE y se simuló el modelo matemático con ayuda de la función `ode45` obteniendo las gráficas correspondientes a cada variable de estado y a cada multiplicador de lagrange. Las condiciones iniciales de los estados representan como inicia el sistema, ningún nodo, sin presencia de biomasa del dosel ni de raíz, con 20 grados centígrados de temperatura inicial, 0.7 en porcentaje de humedad. Las condiciones iniciales de los multiplicadores de lagrange son las condiciones en el tiempo final. Estos valores fueron elegidos para la simulación y pueden ser cambiados de acuerdo a las necesidades del productor.

Una vez hecha la simulación las gráficas arrojan los siguientes resultados para las variables de estado.

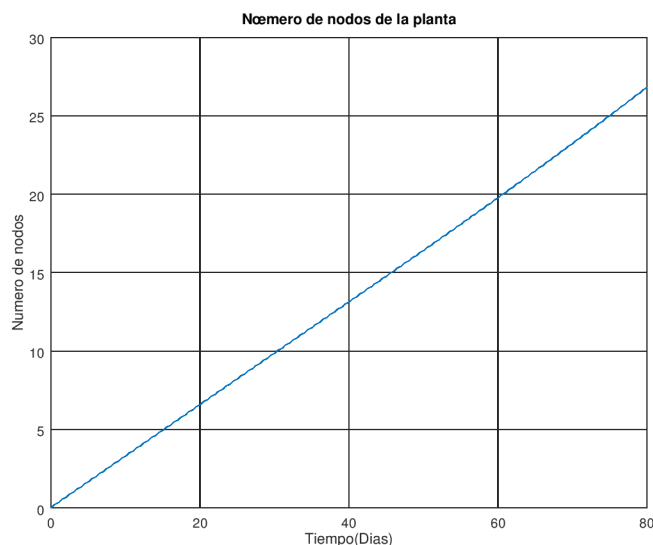


Figura 3.1: Resultado del número de nodos N de la simulación en un periodo de cosecha

En la figura 3.1 se muestra el crecimiento estimado de los nodos en 80 días de plantación, y muestra una tendencia lineal a la alza conforme evoluciona el tiempo.

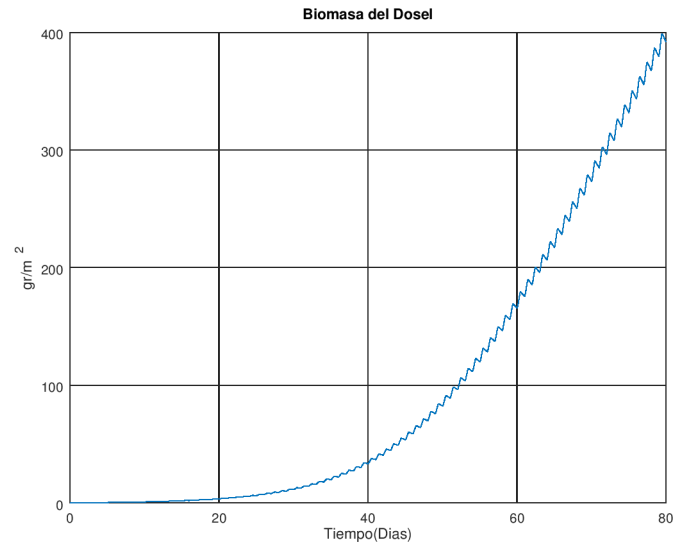


Figura 3.2: Resultado de la biomasa del invernadero de la simulación en un periodo de cosecha

En la figura 3.2 se muestra el detalle de crecimiento de la biomasa de 80 días de cosecha.

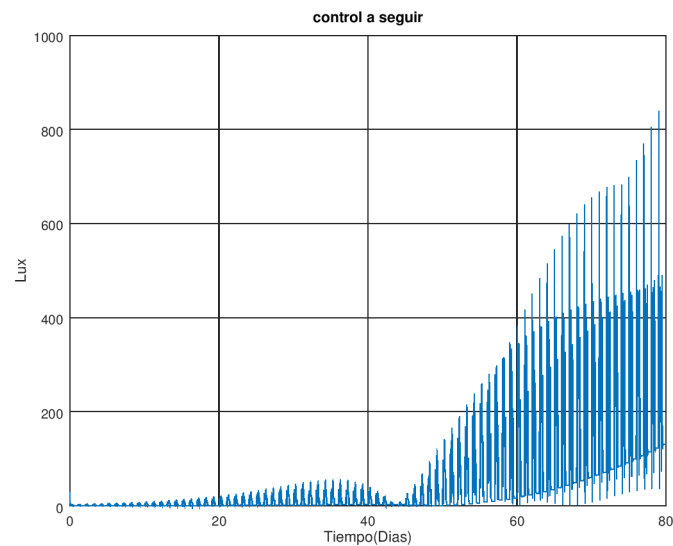


Figura 3.3: Entrada de energía lumínica al sistema

En la figura 3.3 se muestra toda la trayectoria que el sistema de control debe de seguir durante los 80 días de plantación.

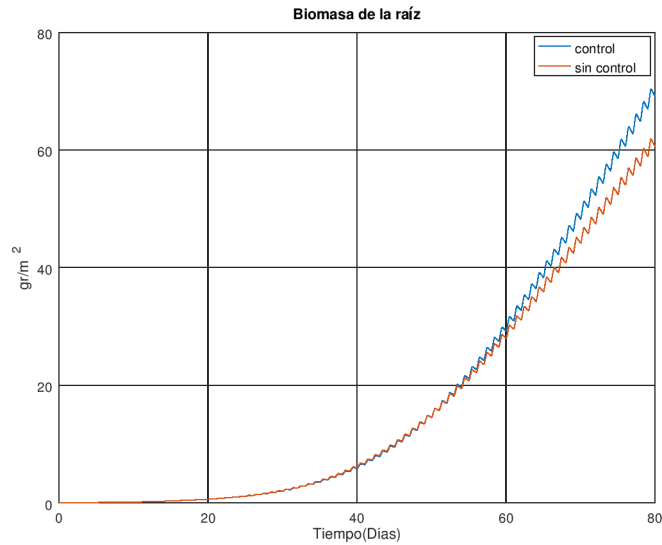


Figura 3.4: Comparación de crecimiento de la raíz en 80 días de cosecha

Para apreciar la efectividad del sistema se muestra en la figura 3.4 una comparación del crecimiento de la biomasa de la raíz. La gráfica muestra que la biomasa se incrementa.

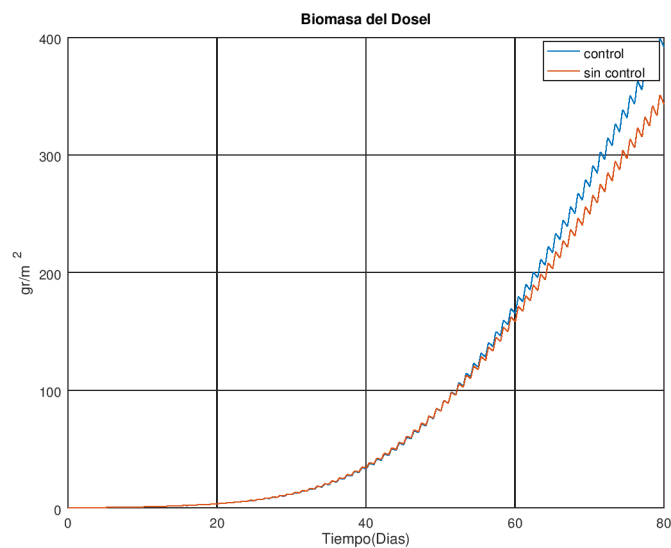


Figura 3.5: Comparación de crecimiento de la biomasa del dosel en 80 días de cosecha

La biomasa del dosel también aumenta con respecto al cultivo expuesto a la luz solar.

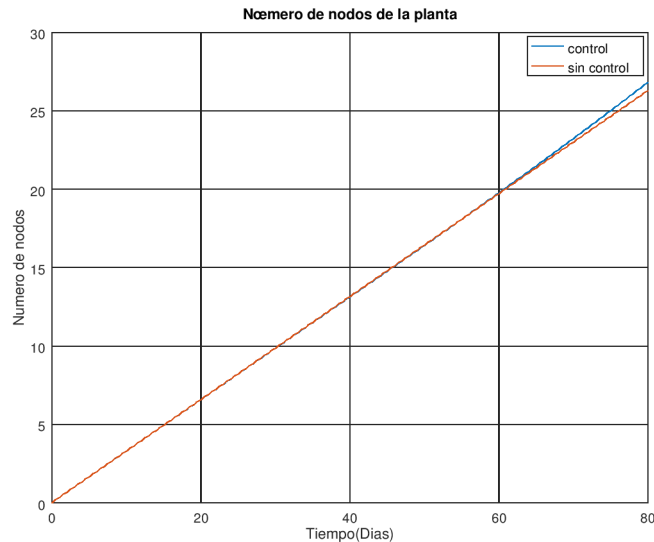


Figura 3.6: Comparación de crecimiento del número de nodos en 80 días de cosecha

La línea roja muestra el crecimiento de la biomasa en un periodo de cosecha sin uso del control propuesto, la línea azul muestra el crecimiento de la biomasa en el mismo periodo de cosecha pero con el uso del control propuesto.

Si vamos a analizar la biomasa seca del dosel W_c que es la gráfica que interesa al hablar de frutos como lo es el jitomate, se puede apreciar en la figura 3.5 que el aumento de biomasa es aproximadamente del 15 % si se usa el sistema con respecto a si no se usa. En las demás gráficas de la figura 3.4 y la figura 3.6 también hay un crecimiento en la biomasa de la raíz y del número de nodos, sin embargo, como lo que se utiliza de la planta de jitomate es el fruto que se encuentra en el dosel, al hablar de resultados en este documento, sólo se utilizará el valor del dosel.

El número de nodos no se incrementa tanto como la raíz y el dosel con la presencia de la luz artificial.

3.2.1. Interpretación de los resultados de la simulación

La explicación del comportamiento de la gráfica 3.4 se debe a la aceleración de los procesos de crecimiento. Las plantas no distinguen entre el día y la noche o entre estaciones y años como lo hacen los humanos, ya que solo perciben el tiempo en que no existe luz y con esa información fijan la duración del periodo a florecer. Aumentando la duración, la intensidad y la calidad hasta los parámetros óptimos con ayuda del modelo, se logra engañar a la planta y hace que ésta inicie la floración antes que en condiciones normales. Así cuando la planta llega a la cantidad esperada antes de los 80 días programados, y como la planta de jitomate sigue desarrollándose, cuando verdaderamente llega a los 80 días la producción de biomasa se incrementa.

Para lograr esos resultados en la cosecha se necesita usar el sistema automático de iluminación y ingresar la trayectoria de entrada a seguir del sistema. Para ello, la ecuación de estado estacionario el término λ_4 mostrado en la figura 3.3 se convierte en la trayectoria de entrada buscada para inyectarle al sistema.

Capítulo 4

Diseño electrónico del sistema de control de iluminación

4.1. Tarjeta de potencia desarrollada para el sistema

En el mercado la mayoría de los reguladores de intensidad de luz o dimmers, trabajan con una entrada de modulación por ancho de pulso o una variación de voltaje, también incluyen un circuito de detección de cruce por cero. Para lograr los objetivos planteados, se necesita implementar un dispositivo modular (un sistema maestro que controla varios esclavos) con una comunicación de datos más robusta que los dispositivos comerciales.

El dispositivo implementado utiliza la comunicación serial para recibir la información de ángulo de fase y tiene la ventaja de hacerlo menos susceptible al ruido.

Al ser un dispositivo modular, se pueden conectar varios circuitos de control de fase vía comunicación serial.

Se diseña un circuito que modifica el ángulo de fase para controlar la intensidad de luz de una lámpara. La etapa de entrada que controla el ángulo de fase se implementa con un TRIAC (triodo para corriente alterna), cuyo pulso de disparo se genera a través de un microcontrolador.

En el detector de cruce por cero se implementa un transformador para bajar la tensión de la línea a 6 volts de voltaje alterno. El voltaje de salida se rectifica con un puente de diodos de bajo consumo de corriente que se conecta con un optoacoplador K817P8. Un inversor de la familia 7404 acopla la señal de salida a nivel de voltaje digital. En la figura 4.1 se muestra el diagrama esquemático.

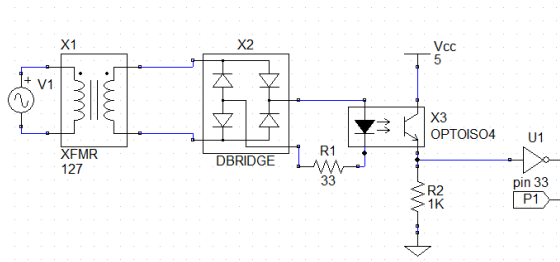


Figura 4.1: Diagrama electrico del detector de cruce por cero de la etapa de potencia del circuito del control del invernadero.

Un microcontrolador PIC18F4550 detecta el pulso de cruce por cero en el pin 33 y manda una señal de activación en el pin 20. La señal de control se conecta con un opto-aislador MOC3010 que dispara un triac. El sistema completo que se encarga de regular la intensidad de la lámpara se muestra en la figura 4.2.

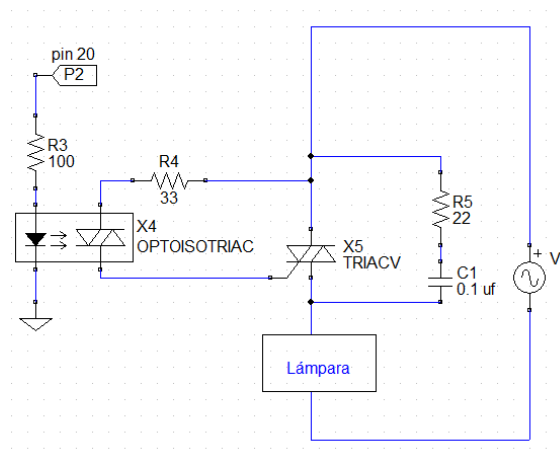


Figura 4.2: Diagrama electrico del circuito de potencia del circuito del invernadero.

La figura 4.3 muestra la pantalla del osciloscopio del circuito. La medición se realiza entre las terminales del TRIAC. Existe voltaje entre el cruce por cero y el disparo debido al capacitor que esta en paralelo con la lámpara.

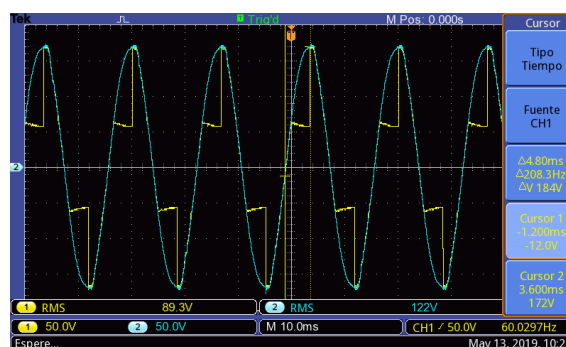


Figura 4.3: Pantalla del osciloscopio del circuito en operación.

Desde una computadora personal, el usuario envía el valor de intensidad de luz deseado. Una tarjeta de control, recibe el dato, lo convierte en el intervalo de 0 a 256 y lo manda al circuito de control de fase. Se lee el puerto serial y se espera un cruce por cero. Después, se calcula un tiempo de retardo para la señal de salida de 127 v. Posterior al tiempo de retardo se genera un pulso de 500 μs que activa el TRIAC. El diagrama de la figura 4.4 muestra la lógica del programa del microcontrolador.

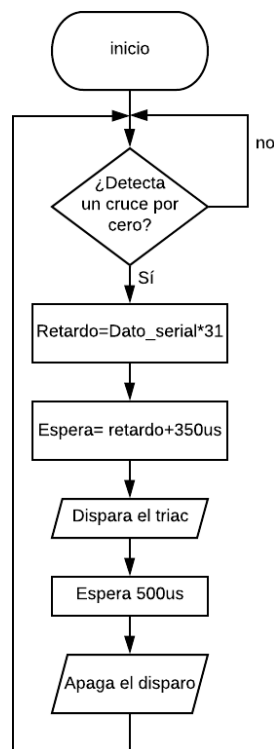


Figura 4.4: Diagrama de flujo del programa del microcontrolador del circuito de potencia del invernadero.

El cálculo para el disparo del TRIAC se realiza al multiplicar el ángulo deseado por 31. Este valor se calcula al tomar en cuenta que la frecuencia es de 60 Hz, que es aproximadamente 16666 μs . Debido a que se trabaja entre cruces por cero, se toma la mitad del periodo, es decir 8333 μs . Como el microcontrolador se comunica con paquetes de información de un byte de 8 bits. Se elige el valor de 31 para ajustar los 8333 μs en 256 unidades.

Por resultados experimentales, para garantizar un buen funcionamiento en el TRIAC, éste debe ser activado al menos con 350 μs después del cálculo del ángulo de disparo.

Después de que el sistema de potencia funcionó en la tablilla de prueba, se mudó el programa a un microcontrolador PIC16f628a debido a características que se dan a continuación:

1. El empaquetado del microcontrolador PIC18f4550 tiene 40 pines, mientras que el empaquetado del PIC16f628a tiene 18 pines, por lo que, el microcontrolador PIC16f628a es más pequeño que el PIC18F4550.
2. El precio del microcontrolador PIC18f4550 dobla al precio del microcontrolador PIC16F628a.
3. El microcontrolador PIC16F628a tiene la posibilidad de comunicarse vía serial al igual que el PIC18F4550, ambos microcontroladores son de 8 bits y la memoria es suficiente para el uso que se espera darle.
4. Debido a que los dos microcontroladores los fabrica la empresa microchip la programación se puede mudar de uno a otro debido a que poseen el mismo lenguaje de programación, una arquitectura similar y comparten algunas librerías.
5. El pin 33 cambio por el pin 10 y el 20 por el pin 6 ya que tienen pines con las mismas funciones en diferente distribución.

4.1.1. Lámpara de luz de espectro completo

Para la iluminación del invernadero se usa una lámpara led de crecimiento para plantas de interior de 45 watts de la marca Osunby.

La lámpara tiene las siguientes características:

1. Espectro completo de luz. Desde infrarrojo (730-735 nanómetros) hasta ultravioleta(390-395 nanómetros).
2. Cobertura auto ajustable. Dependiendo del ciclo de la planta, se recomienda, 10-12 pulgadas de espacio entre la lámpara y la planta.
3. Fácil manejo e instalación.
4. Gran cantidad de horas de vida útil (50000 horas).
5. Alimentación convencional (127 V/60 Hz).

En la figura 5.5 se muestran las dimensiones de la lámpara. Ésta mide 12.2 x 12.2 x 1.4 pulgadas. En la figura 4.6 se presenta el espectro que produce la lámpara cuyo diseño esta pensado para obtener el mayor crecimiento de las plantas.

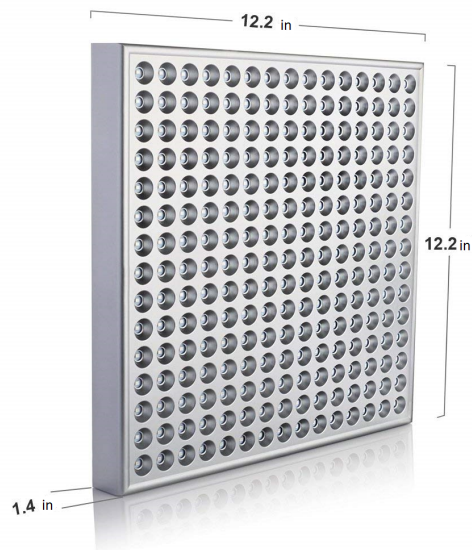


Figura 4.5: Dimensiones de la lámpara de luz de espectro completo usada en el sistema en pulgadas.

Según el fabricante, la lámpara debe estar a una altura de 60.96 cm . Con esta altura, la superficie iluminada que cubre es de 91.44 cm^2 .

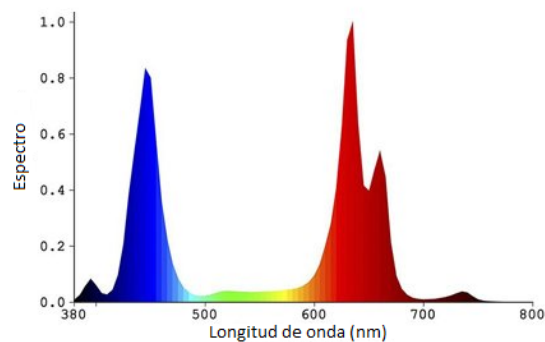


Figura 4.6: Espectro de la lámpara de luz de espectro completo.

4.1.2. Caracterización de la lámpara de espectro completo

Para medir la luminosidad de la lámpara se usó el sensor de luminosidad TSL2591 en un cuarto cerrado a una altura de 0.6096 m . Entre mediciones existe un retardo de 0.5 s para la estabilidad del sensor.

En la figura 4.7 muestran los datos que se recopilaron. Se registraron los valores del sensor en lux y se hizo variar el ángulo de disparo del TRIAC. Se debe tomar en cuenta que la lámpara tiene un comportamiento lineal desde 2 hasta los 3 rad como se muestra en la figura la figura 4.7. En la región de comportamiento lineal se establece el punto de control.

En el intervalo de 0 a 1.99 *rad* se tiene una región de saturación de 1140 lux como se muestra en la figura 4.7.

Se debe aclarar que, existe un nivel de intensidad de 100 lux en el cuarto, por lo que, a partir de los 3 *rad* la gráfica de la figura 4.7 se mantiene el valor en 100 lux.

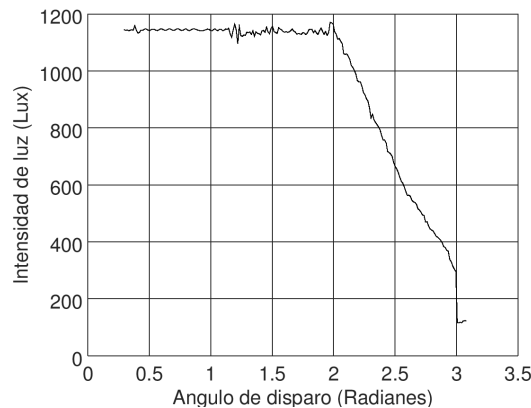


Figura 4.7: Gráfica del comportamiento de la lámpara de espectro completo.

4.1.3. Desarrollo electrónico del controlador

La figura 4.8 presenta el diagrama de bloques del sistema de control completo. La computadora manda el valor deseado de intensidad lumínica a un microcontrolador maestro pic 18F4550. El microcontrolador calcula el error, lo multiplica por la ganancia proporcional y lo transmite via serial con el protocolo RS232 al modulo de control de disparo. Un segundo microcontrolador PIC16f628a de la familia microchip recibe el dato y genera el retardo proporcional al ángulo deseado para disparar el TRIAC. La lámpara se ilumina debido a la energía suministrada por el TRIAC. El sensor recibe la iluminación de la lámpara sumada con la del medio ambiente y la transmite al controlador por comunicación serial por medio del protocolo de comunicación I2C. Se aclara que las pruebas en el invernadero se realizaron al rededor de las 7 pm, por lo que, el ambiente era oscuro y no existía perturbaciones de luz solar o ambiental, tal como se logró con el armario a la hora de hacer la caracterización de la lámparay hacer las pruebas del sistema.

El controlador regresa a la PC el valor de luminosidad. Se pensó en un control PID para prevenir cambios bruscos en la iluminación, sin embargo, como era improbable un cambio drástico en la iluminación ambiental se dejó el control proporcional con el criterio de que para su aplicación es suficiente con ese tipo de control.

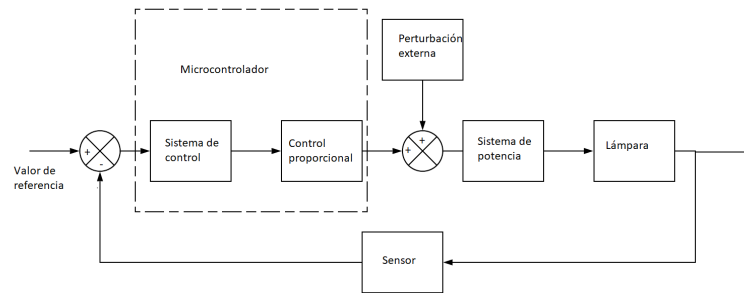


Figura 4.8: Diagrama a bloques del sistema de control.

Con el sensor de luminosidad y la lámpara se cerró el lazo de control, se retroalimentó el valor de entrada del integrado TSL2591. Se utilizó un pic18F4550 como controlador, en el cual se implementó un algoritmo de control de ganancia proporcional. La ganancia del control proporcional se sintonizó por prueba y error hasta encontrar el valor de 0.4.

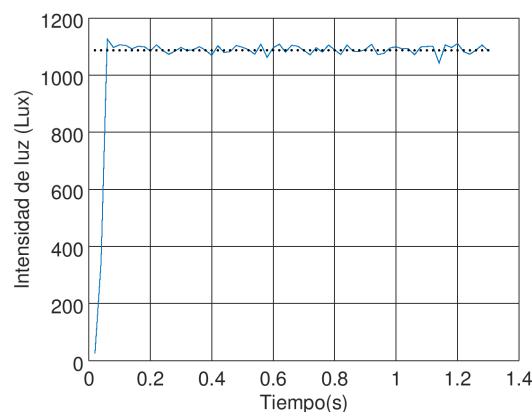


Figura 4.9: Gráfica del comportamiento del sistema de control de invernadero a un nivel de iluminación.

En la figura 4.9 se muestra el comportamiento del sistema de control con un valor establecido de 1087 lux. El control llega al punto deseado y se mantiene con una variación aproximada de 15 lux.

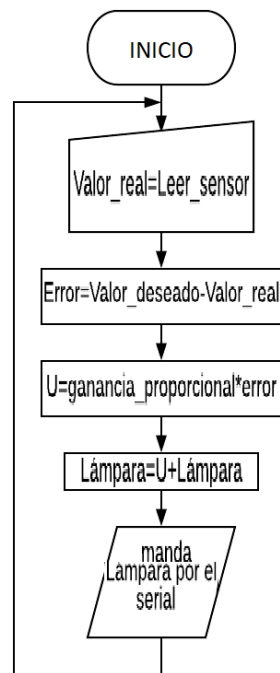


Figura 4.10: Diagrama de flujo del bloque de control del sistema de control de invernadero.

En la figura 4.10 se presenta un diagrama de flujo del controlador.

Una vez implementado y probado con una y tres lámparas, se necesitó probar el sistema en el invernadero. Para ello, era indispensable ingresar la trayectoria de entrada resultante de la solución del problema de control óptimo, de esta forma, el sistema no necesita de un operador, sino que, se convierte en un sistema totalmente automático. Por eso, se integró al sistema un módulo de tarjeta microSD con comunicación SPI, y un reloj en tiempo real DS3231.

Durante el proceso de implementación se vió la necesidad de cambiar el controlador maestro el PIC18f4550 por la tarjeta de desarrollo arduino mega, ya que, la tarjeta facilita el manejo de los periféricos como la tarjeta SD, el módulo de reloj e incluso el sensor de luminosidad puesto que, como su programación esta orientada a objetos, muchos de los desarrolladores comparten librerías de funciones para facilitar su uso, además de que contiene la suficiente memoria para todo el programa resultante.

Con el módulo lector de SD, la trayectoria de control se pudo guardar en una microSD no fue necesario el uso de la computadora para vaciar los datos de entrada, sin embargo, se siguió usando la computadora para monitoriar todo el proceso desde la interfaz de la pantalla serial del IDE de arduino.

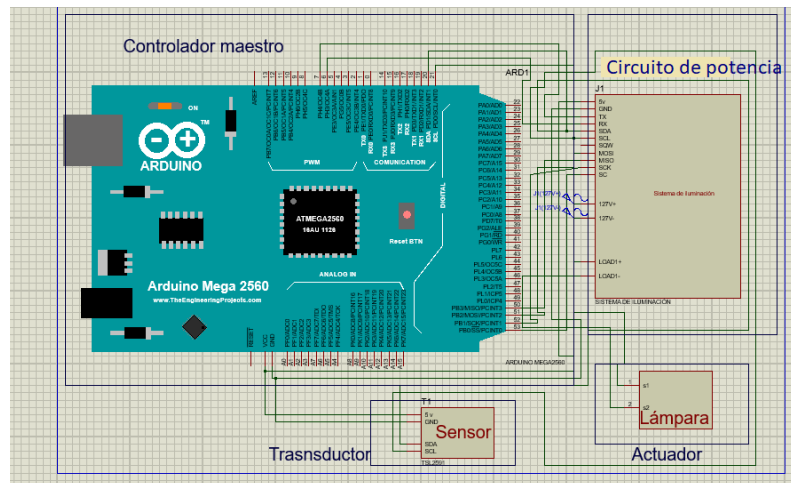


Figura 4.11: Circuito esquemático del circuito del sistema de control de invernaderos completo.

En la figura anterior se muestra un circuito esquemático de todo el sistema final, la caja negra de la potencia incluye el circuito impreso elaborado en la tesis, en ese mismo módulo va incluido el reloj en tiempo real y el módulo de la tarjeta microSD, en la caja negra del sensor va el modulo TSL2591, y en el actuador va la lámpara.

Una vez integrado todo el sistema se vió la necesidad de aumentar la corriente de alimentación del sistema de control, por una fuente de alimentación de 5v externa, pues ya no era suficiente al aumentar el número de dispositivos alimentados por la misma fuente de 5v de la computadora. Se usó una fuente de alimentación ya hecha de 5v que soportaba hasta 3 amperes que se ve representada en el esquemático por terminales de 5v.

4.1.4. Periféricos usados en la tarjeta del sistema de control de luminosidad

Las características más importantes que manda el fabricante en su hoja de datos del del reloj en tiempo real DS3231, la tarjeta micro SD y el sensor de luminosidad TSL2591 se muestran a continuación:

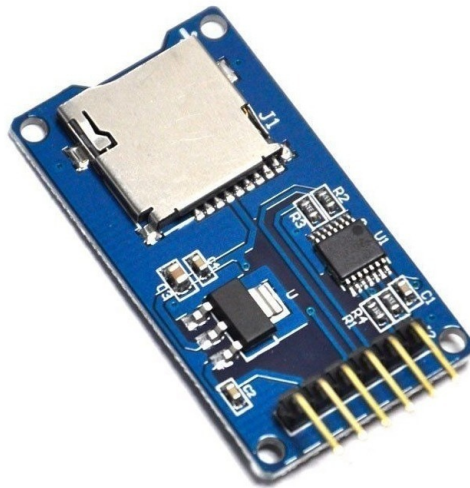


Figura 4.12: Módulo lector microSD usado en el sistema de iluminación para guardar los datos del sensor.

El modulo lector tiene las siguientes características:

1. Voltaje de Operación: 3.3V - 5V
2. Comunicación por SPI

La tarjeta de desarrollo arduino soporta la comunicación SPI y es compatible con el nivel de alimentación de 5 v.



Figura 4.13: Reloj en tiempo real DS3231 usado en el sistema de iluminación.

El reloj en tiempo real tiene las siguientes características:

1. Voltaje de Operación: 3.3V - 5V
2. RTC de alta precisión DS3231 con oscilador interno
3. Exactitud Reloj: 2ppm
4. Dirección I2C del DS3132: Read(11010001) Write(11010000)
5. Memoria EEPROM AT24C32 (4K * 8bit = 32Kbit = 4KByte)
6. Comunicación I2C, solo utiliza 2 cables.
7. Salida de onda cuadrada programable
8. La batería puede mantener al RTC funcionando por 10 años.
9. Puede ser usado en cascada con otro dispositivo I2C, la dirección del AT24C32 puede ser modificada (por defecto es 0x57)

Se alimenta con 5 v por lo que no tiene problema con conectarse al sistema, se comunica serialmente con el protocolo I^2C por lo que es compatible con el sistema.



Figura 4.14: Sensor de intensidad lumínica TSL2591 usado en el sistema de control de iluminación.

El sensor de intensidad lumínica TSL2591 cuenta con:

1. Voltaje de entrada: 3 a 5V
2. Rangos de temperatura: -30 hasta 80 °C

3. Rango: 188 uLux a 88,000 Lux

4. Direcciones I2C: 0x29.

Se alimenta con 5 v por lo que no tiene problema con la alimentación, además, la temperatura ambiente de 15 grados no le afecta y las variaciones del invernadero no superan los 80 grados, por si fuera poco, el rango de luz es adecuado para la aplicación y se comunica vía serial con el protocolo I^2C que es compatible con la tarjeta de desarrollo arduino mega.

4.2. Impreso elaborado de la tarjeta de potencia

En la figura 4.15 se muestra las pistas del circuito impreso que se fabricó de la sección desarrollada de potencia. Se uso el software autotrax para el diseño, se configuró a una capa. En la figura donde se encuentran las pistas se muestra el diseño final de las pistas del circuito impreso. Por último, se exportaron los archivos gerber.

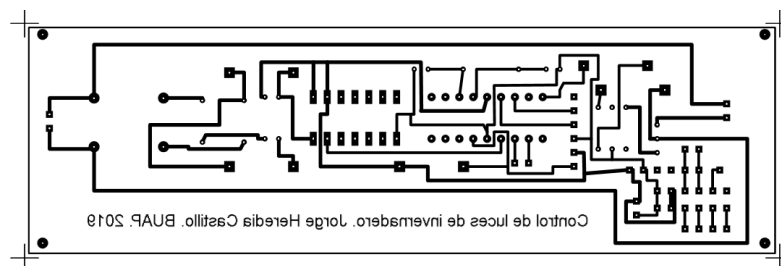


Figura 4.15: Pistas de circuito impreso del bloque de potencia del circuito de control de iluminación de invernadero.

Una vez hecho el diseño se fabrico por el método de maquinado en un router CNC. Se usaron los archivos gerber para crear archivos de código g. Los parámetros del código G usados fueron: Las dimensiones de un cortador de 0.1 mm de punta con un ángulo de 60 grados, se configuró a una velocidad de avance de 10 pulgadas por minuto, una profundidad de corte de 0.002 pulgadas y una velocidad de giro de 1000 rev/min.

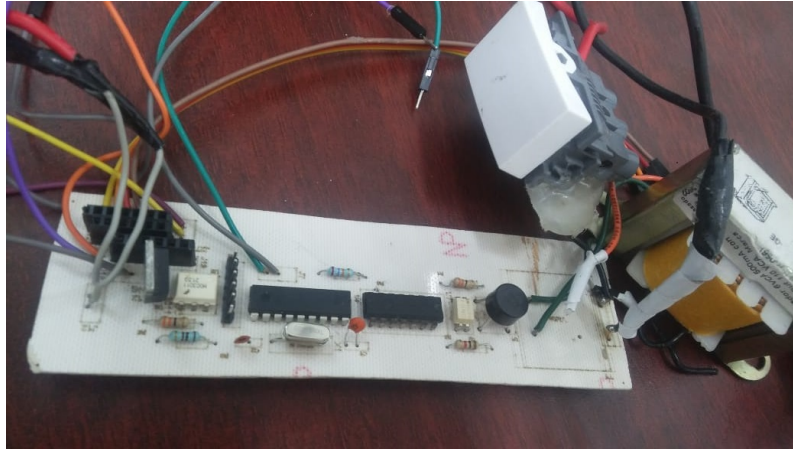


Figura 4.16: Fotografía del circuito impreso de la parte de potencia del sistema de control de iluminación de invernaderos.

En la figura anterior se muestra el impreso de la parte de potencia terminado, se usaron terminales SIP tipo hembra para conectar los periféricos y cables tipo jumper para conectar el impreso hacia la tarjeta de desarrollo arduino. El impreso mide 14 cm de largo por 4 de ancho y es de fibra de vidrio y cobre.

Se grabó la posición de los componentes con un rotulador laser.

Por ultimo, durante las pruebas se notó un calentamiento en el TRIAC MAC12NG por lo que se optó por adaptarle un disipado comercial para evitar futuros daños con el paso del tiempo.

Capítulo 5

Implementación del sistema en el invernadero

5.1. Prueba del sistema de control en el ambiente cerrado

En la figura 5.1 se muestra una fotografía de la prueba inicial del sistema electrónico con una lámpara. Ésta se realizó en un armario cerrado con recubrimiento de Mylar para evitar la entrada de iluminación externa y simular las condiciones de la noche.



Figura 5.1: Armazón de pruebas del sistema de control del invernadero.

Se realizó una prueba de funcionamiento del sistema de control el 7 de noviembre del 2019 de 11:00 a 13:00 horas en la ciudad de Puebla. Para la prueba se usó un armario cerrado, el sistema de control y una computadora.

La figura 5.2 muestra el armario de pruebas y su distribución. El armario mide 24x24x48 pulgadas y se ajustó para que la lámpara quedara justo arriba del sensor

a la altura adecuada de 24 pulgadas que recomienda el fabricante de la lámpara.

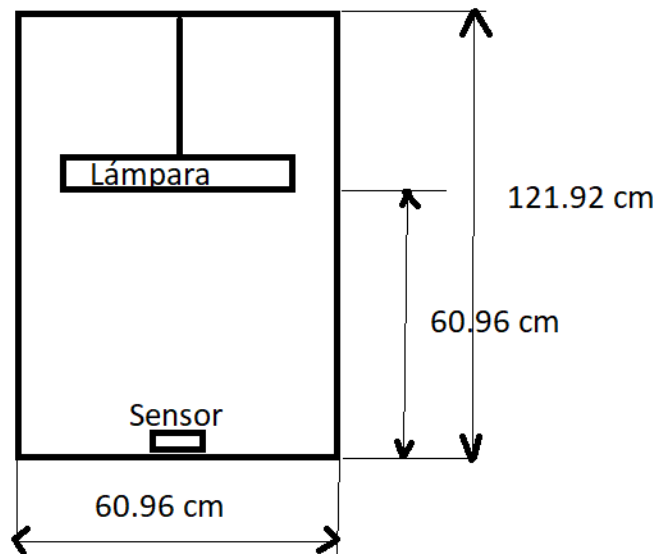


Figura 5.2: Esquema del montaje del armazón de pruebas del sistema.

El armario se ajustó para tener las mismas condiciones del invernadero. Las pruebas del sistema se realizaron con una trayectoria escalonada de puntos que el sistema tenía que seguir. Desde 100 lux hasta 500 lux aumentando 50 lux cada 4 minutos. El tiempo de muestreo se fijó en 1 minuto, los datos se tomaron durante la prueba y se almacenaron en una tarjeta SD. Una vez obtenidos los datos del sensor, se grafican y se muestran en la figura 5.3.

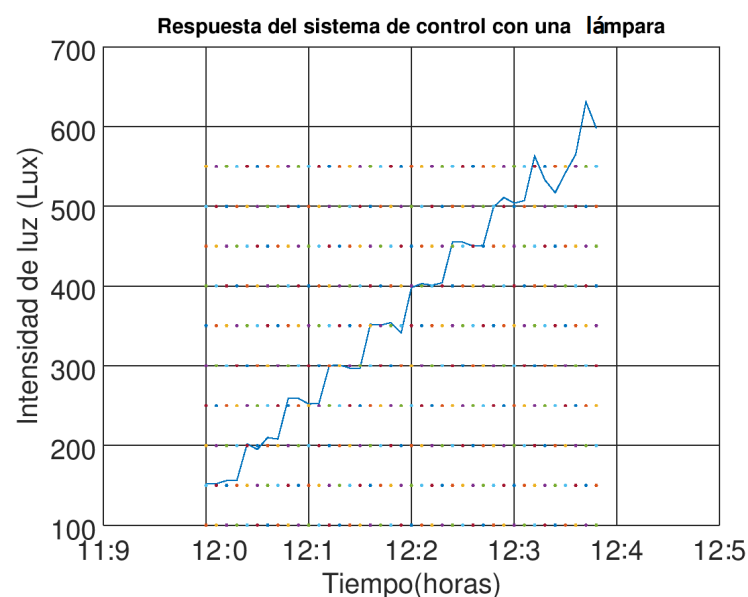


Figura 5.3: Gráfica de la prueba del comportamiento del sistema con una lámpara.

En la gráfica 5.3 se nota que el sistema sigue la trayectoria guardada de escalones, por lo tanto, la prueba del sistema asegura que el sistema puede seguir la trayectoria generada del modelo matemático sin complicaciones.

Una vez realizada la prueba se almacenan los datos del modelo matemático en la tarjeta SD para que el sistema completo en el invernadero se pueda seguir la trayectoria deseada y el sistema pueda simular la luz del sol e incrementar su intensidad para cubrir los objetivos de este trabajo.

Una parte importante de la implementación de la prueba la prueba fue que se necesita una fuente de alimentación con mayor suministro de corriente, debido a que la de la computadora falla al alimentar a todo el sistema de control, esto se debió a que existe una gran cantidad de elementos de carga en el sistema de control. Estos elementos son: el reloj, el modulo lector SD, el microcontrolador, y el opto acoplado y las 10 lámparas. Así, para controlar el elemento de potencia se necesitó conectar una fuente de alimentación independiente de los elementos de control.

5.2. Pruebas del sistema de control en el invernadero

Se implementó el sistema en un invernadero de 8 metros de largo por 4 metros de ancho. El invernadero tiene un recubrimiento de plástico y esta soportado por tubulares cuadradas de acero comercial con un recubrimiento de pintura blanca. El invernadero esta unido por sugesión de tornillo. Los tubulares se unen entre ellos por tornillos, además el recubrimiento se une a los tubulares con tornillo.



Figura 5.4: Imagen del interior del invernadero.

Cuenta con una puerta para acceder a el invernadero y todo el invernadero es de tipo tunel o semicilíndrico.

5.2.1. Instalación de las lámparas en el invernadero

En la figura 5.5 se muestra como se instalaron las 10 lámparas a lo largo del invernadero para iluminar con su luz la totalidad de la superficie del mismo.

Para instalar las lámparas se hicieron dos filas de 5 lámparas con alambre de acero. Se puso dos tiras de alambre doble trenzado de extremo a extremo del invernadero. Se hicieron barrenos en el tubular a 1.33 metros del extremo de cada lado del invernadero. Los 1.33 metros aseguran 3 espacios y 2 líneas correctamente centradas entre los 4 metros de ancho del invernadero.

Se legió el número de 10 lámparas debido a la máxima radiación PAR que puede soportar la planta de jitomate. Segun la literatura que es alrededor de 2500 a $3000 \mu\text{molm}^{-1}\text{s}^{-1}$ y con un fotoperiodo de 12 horas de luz, [8]. Tomando en cuenta la superficie del invernadero 32 m^2 la altura de las lámparas , y el espectro de luz completo se necesitan 10870 lux en todo el invernadero que se cubren con 10 lámparas que producen 1200 lux máximo cada una.

La altura a la cual estaban ajustadas las lámparas fue de 1.2 metros. Las 10 lámparas se conectaron en paralelo con cable calibre 14 AWG. Cabe señalar que el triac soporta bien 10 lámparas de 40 watts ya que la capacidad máxima del triac es de 12 amperes (MAC12N) de corriente entre sus terminales y cada lampara consume 363 mA. El conjunto de 10 lámparas mejoran el funcionamiento del sistema ya que al aumentar la carga se evitan los problemas de conducción, sin embargo el dispositivo MAC12NG aumenta su temperatura.

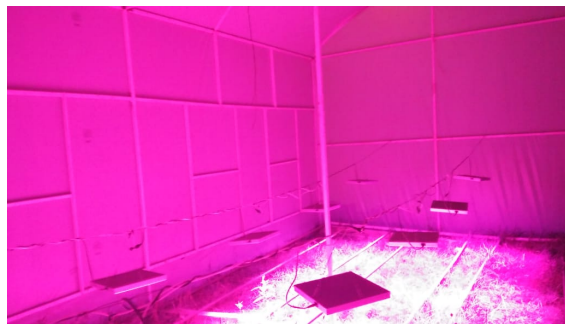


Figura 5.5: Fotografía que muestra el resultado de las conexiones de las lámparas dentro del invernadero.

Según el fabricante, la lámpara debe estar a una altura de 60.96 cm . Con esta altura, la superficie iluminada que cubre es de 91.44 cm^2 .

El sensor de retroalimentación se colocó en la posición central extrema del arreglo de las 10 lámparas como se aprecia en la figura 5.6. Con los datos obtenidos se controlan la intensidad de las demás lámparas.

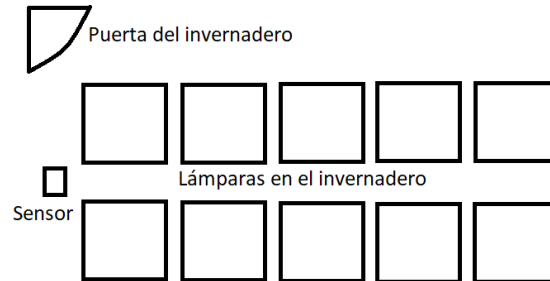


Figura 5.6: Esquema de la distribución de las lámparas en el invernadero.

5.2.2. Prueba del sistema en el invernadero

En la figura 5.7 se muestra una fotografía del día en que se tomaron los datos de la prueba en el invernadero. Una vez instalado el sistema de iluminación en el invernadero se guardó la trayectoria de control en la memoria SD para realizar las pruebas. Se conectó el sistema cuando empieza a oscurecer como se aprecia en la figura 5.7, a partir de las 5 pm y se toman datos del sistema desde las 7:22 pm a las 7:57 pm el 11 de diciembre del 2019 en la ciudad de Puebla. Fueron recabados datos desde 100 lux hasta 500 lux con cambios cada 4 minutos, incrementos de 50 lux y tiempo de muestreo de 1 minuto.



Figura 5.7: Fotografía de la toma de datos de la prueba del sistema desarrollado dentro del invernadero.

La gráfica de los resultados se muestra en la figura 5.8.

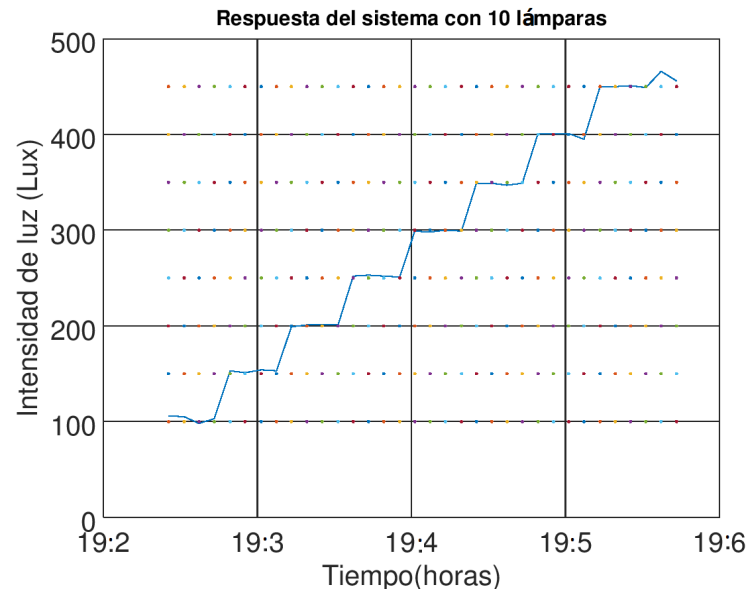


Figura 5.8: Gráfica de prueba del comportamiento del sistema en el invernadero con 10 lámparas y un sensor.

Aunque son muy parecidas la figura 5.8 y la figura 5.3, muestran los resultados de la misma prueba en diferentes escenarios y con mayor o menor número de lámparas.

El sistema de control logra darle las mismas condiciones de luminosidad tanto a una superficie de $32 m^2$ (invernadero), como a una superficie de $3.716 m^2$ (armario). Lo que asegura que independiente mente de la superficie, mientras exista un número suficiente de actuadores, el sistema de control logrará dar la cantidad de luz requerida por la trayectoria de entrada, y tambien, que sigue una trayectoria de entrada deseada sin problema alguno. Tambien, al aumentar el número de lámparas, aumentó la carga del circuito de potencia, por lo tanto, mejoró la conducción del tiristor del circuito de potencia, lo que se nota en una mejor respuesta en la gráfica 5.8 con respecto a la gráfica de la figura 5.3.

Conclusiones

Se cumplieron con los objetivos de la tesis, se hizo el estudio y el análisis del modelo dinámico del cultivo, se diseñó el sistema electrónico y se probó en el invernadero. Las pruebas en el invernadero arrojaron que el sistema puede seguir una trayectoria de puntos con una variación máxima de 5 lux de error con respecto al punto establecido.

No se puede utilizar cualquier lámpara, porque las plantas absorben la radiación roja y azul y desechan la verde, por eso, la lámpara elegida en este trabajo está dentro del espectro del rojo y azul y asegura con eso el crecimiento en la planta. También, el comportamiento de la lámpara no es lineal, por lo que el circuito de control asegura mantener un nivel de iluminación deseado.

El uso del sistema aquí planteado le ayudará a los productores de jitomate a incrementar su cosecha en un 15% con respecto a una cultivo sin el sistema de control, mientras se mantengan los parámetros constantes de humedad, temperatura, concentración de CO_2 , etc.

En trabajos futuros se podría realizar una cosecha de jitomate en el invernadero con los demás parámetros constantes y usando el sistema de control, para comparar los resultados experimentales con los arrojados por el simulador matemático.

Apéndice A

Programa del microcontrolador encargado de generar el disparo para el triac.

El siguiente programa fue editado en el IDE de mikroC PRO para pic. Se configurò el programa para el microcontrolador PIC16f628a y se le hizo trabajar con un cristal de 4 Mhz.

```
#define Detec_Zero  PORTB.F0
#define Triac       PORTB.F4

char Dato2;
//Declaraci n de la funci n de interrupciones.
void interrupt ( void )
{
//Se eval a si la interrupci n disparada por
//recepci n serial.
    if( PIR1.F5 )
    {
        //Se lee el dato de entrada.
        Dato2 = UART1_Read();
        //PORTB=Dato2;

        PIR1.F5 = 0;
    }
}

void Vdelay_us(unsigned time_us);
```

```
void main() {
    unsigned int Retardo=0;
    //unsigned int Dato;
    Dato2=0;
    //Se activa la interrupci n por
    //recepci n serial.
    PIE1 = 0b00100000;
    INTCON = 0b11000000; //INTCON = 0b11110000;

    UART1_Init(9600);
    Delay_ms(100);

    TRISB=0x01;
    //TRISB=0x00;
    PORTB=0;
    //TRISD=0b00000000;

    while(1)
    {
        if(Detec_Zero == 1)
        {
            //Dato = ADC_Read(0);
            //Dato =Dato>>2;
            Retardo=Dato2*28;
            Vdelay_us(Retardo+350);
            Triac=1;
            Vdelay_us(500);
            Triac=0;
        }
    }
}

void Vdelay_us(unsigned time_us)
{
    unsigned ncyc;
    ncyc = Clock_MHz()>>2;
    ncyc *= time_us>>4;
    while (ncyc--)
```

```
{  
    asm nop;  
    asm nop;  
    asm nop;  
}  
}
```

Apéndice B

Algoritmo desarrollado para la tarjeta de desarrollo Arduino Mega

El siguiente programa es el usado para el controlador desarrollado en la tarjeta arduino mega. Para compilarlo se necesita cargar la librería del reloj RTC, del sensor de luz y del lector SD.

```
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include <Wire.h>
#include <GFRTC.h>
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include "Adafruit_TSL2591.h"
#include <SoftwareSerial.h>
#define TCAADDR 0x70
  extern "C" {
#include "utility/twi.h"
#include "RTClib.h"
SoftwareSerial mySerial(7, 8); // RX, TX

Adafruit_TSL2591 tsl = Adafruit_TSL2591(2591);
int pausa=1000;
char retardo[15];
char valor[20];
int id;
int m_valor;
  String arreglo="";
int lamp;
```

```
float vmin ,vmax ,l_min ,l_max ;
float signo , error , data ;

float eu ;
double u ,kp ;

float res ,m ,y ;
volatile bool rtcflag = false ;
int UltimaPocicion=0 ;
    const int outputPin = LED_BUILTIN ;
    float date ;
bool state = false ;
bool bandera=false ;
File logFile ;
File myFile ;
// RTC_DS1307 rtc ;
RTC_DS3231 rtc ;
void tcaseselect(uint8_t i) {
    if (i > 7) return ;

    Wire.beginTransmission(TCAADDR);
    Wire.write(1 << i);
    Wire.endTransmission ();
}

void displaySensorDetails(void)
{
    sensor_t sensor ;
    tsl.getSensor(&sensor);
    Serial.println(F("-----"));
    Serial.print (F("Sensor:      ")); Serial.println(sensor.name);
    Serial.print (F("Driver Ver:   ")); Serial.println(sensor.version);
    Serial.print (F("Unique ID:    ")); Serial.println(sensor.sensor_id);
    Serial.print (F("Max Value:    ")); Serial.print(sensor.max_value);
    Serial.print (F("Min Value:    ")); Serial.print(sensor.min_value);
    Serial.print (F("Resolution:   ")); Serial.print(sensor.resolution);
    Serial.println(F("-----"));
    Serial.println(F(" "));
    delay(500);
```

```
}
void multiplexor(void)
{while (!Serial);
  delay(1000);

  Wire.begin();

  Serial.begin(9600);
  Serial.println("\nTCAScanner ready!");

  for (uint8_t t=0; t<8; t++) {
    tcaselect(t);
    Serial.print("TCA Port #"); Serial.println(t);

    for (uint8_t addr = 0; addr<=127; addr++) {
      if (addr == TCAADDR) continue;

      uint8_t data;
      if (! twi_writeTo(addr, &data, 0, 1, 1)) {
        Serial.print("Found I2C 0x"); Serial.println(addr,HEX);
      }
    }
  }
  Serial.println("\ndone");
  tcaselect(0);}
void configureSensor(void)
{
  /* Display the gain and integration time for reference sake */
  Serial.println(F("-----"));
  Serial.print (F("Gain:          "));
  tsl2591Gain_t gain = tsl.getGain();
  switch(gain)
  {
    case TSL2591_GAIN_LOW:
      Serial.println(F("1x (Low)"));
      break;
    case TSL2591_GAIN_MED:
      Serial.println(F("25x (Medium)"));
      break;
```

```
    case TSL2591_GAIN_HIGH:
        Serial.println(F("428x (High)"));
        break;
    case TSL2591_GAIN_MAX:
        Serial.println(F("9876x (Max)"));
        break;
}
Serial.print (F("Timing:          "));
Serial.print (( tsl.getTiming() + 1) * 100, DEC);
Serial.println(F(" ms"));
Serial.println(F("-----"));
Serial.println(F(""));
}
void readAndDisplayTime() {
    // structure to hold data from RTC
    struct timelib_tm datetime;

    Serial.print(F("Got interrupt signal, time is = "));

    // get date and time
    if (GFRTC.read(datetime)) {
        // read ok, print data from RTC
        print2digits(datetime.tm_hour);
        Serial.write(':');
        print2digits(datetime.tm_min);
        Serial.write(':');
        print2digits(datetime.tm_sec);
        Serial.print(F(", Date (D/M/Y) = "));
        Serial.print(datetime.tm_mday);
        Serial.write('/');
        Serial.print(datetime.tm_mon);
        Serial.write('/');
        Serial.print(timelib_tm2y2k(datetime.tm_year));
        Serial.println();
    } else {
        // error reading the RTC
        Serial.println(F("Cannot read RTC.));
    }
}
```

```
/**
 * Helper function to print always two digits
 */
void print2digits(int number) {
  if (number >= 0 && number < 10) {
    Serial.write('0');
  }
  Serial.print(number);
}

void isrhandler()
{
  rtcflag = true;
}

void setup()
{

  mySerial.begin(9600);
  Serial.begin(9600);
  // prepare the GFRTC class, this also calls Wire.begin()
  multiplexor();
  Serial.println(F("Starting Adafruit TSL2591 Test!"));
  if (tsl.begin())
  {
    Serial.println(F("Found a TSL2591 sensor"));
  }
  else
  {
    Serial.println(F("No sensor found ... check your wiring?"));
  }

  GFRTC.begin(true);

  // check if we can communicate with RTC
  if (GFRTC.isPresent()) {
    Serial.println(F("RTC connected and ready."));
  } else {
    Serial.println(F("Check RTC connections and try again."));
    for (;;)
  }
}
```

```
}

// enable interrupt output on INT/SQW pin from DS3231
GFRTC.setIntSqwMode(E_INTERRUPT_OUTPUT);

// configure the alarm hora, minuto, segundo, dow
GFRTC.setAlarm(E_ALM1_MATCH_SECONDS, 0, 0, 20, 0);

// enable the interrupts for alarm 1
GFRTC.setAlarmInterrupt(E_ALARM_1, true);

// clear the interrupt flag by reading it
GFRTC.getAlarmInterruptFlag(E_ALARM_1);

pinMode(2, INPUT);
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(2), isrhandler, FALLING);

Serial.print(F("Iniciando SD ..."));
if (!SD.begin())
{
    Serial.println(F("Error al iniciar"));
    return;
}
Serial.println(F("Iniciado correctamente"));

if (!rtc.begin()) {
    Serial.println(F("Couldn't find RTC"));
    while (1);
}

// Si se ha perdido la corriente, fijar fecha y hora
if (rtc.lostPower()) {
    // Fijar a fecha y hora de compilacion
    rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)));

    Serial.println(F("Starting Adafruit TSL2591 Test!"));
```

```
if (tsl.begin())
{
  Serial.println(F("Found a TSL2591 sensor"));
}
else
{
  Serial.println(F("No sensor found ... check your wiring?"));
  while (1);
}

//Inicio de configuracion del sensor
displaySensorDetails();
configureSensor();

//Variables para leer el sensor y pasarlo a luxes
//El valor de foco apagado es 245 la fase se va a 180 grados
//el valor de maximo encendido es 10 la fase de siaparo se
//va a 0 grados
//Los luxes maximos en el cubo son l_max=1380 con luz de dia
//l_min =390
  vmin=245;
vmax=10;

l_min=100;
l_max=1380;

//Pendiente
m=(vmin-vmax)/(l_max-l_min);//(245-10)/1380-100)=235/1280
m=0.18;

//La variable lamp esta entre 0 y 255 para la lampara
lamp=20; //Lampara prendida al maximo
signo=1;
u=0;
error=0;
kp=0.4;

//y=m*(data-l_min)+vmin;
  y=10.0;
```

```
        lamp=(int)y;
    }
}

// Funcion que simula la lectura de un sensor
int readSensor()
{
    simpleRead();
    advancedRead();

    return res;
}

void simpleRead(void)
{
    uint16_t x = tsl.getLuminosity(TSL2591_VISIBLE);
    //uint16_t x = tsl.getLuminosity(TSL2591_FULLSPECTRUM);
    //uint16_t x = tsl.getLuminosity(TSL2591_INFRARED);

    Serial.print(F("[ ")); Serial.print(millis()); Serial.print(F(" ms ]
    Serial.print(F("Luminosity: "));
    Serial.println(x, DEC);
}

void advancedRead(void)
{
    uint32_t lum = tsl.getFullLuminosity();
    uint16_t ir , full;

    ir = lum >> 16;
    full = lum & 0xFFFF;
    //Serial.print(F("[ ")); Serial.print(millis()); Serial.print(F(" ms
    //Serial.print(F("IR: ")); Serial.print(ir); Serial.print(F("
    "));
    //Serial.print(F("Full: ")); Serial.print(full); Serial.print(F("
    "));
    //Serial.print(F("Visible: ")); Serial.print(full - ir); Serial.print
    "));
```

```
    res=tsl.calculateLux(full , ir );
    Serial.print(F("Lux: ")); Serial.println(res , 6);
}
void logValue(DateTime date , int value)
{
    logFile.print(date.year() , DEC);
    logFile.print('/');
    logFile.print(date.month() , DEC);
    logFile.print('/');
    logFile.print(date.day() , DEC);
    logFile.print(" ");
    logFile.print(date.hour() , DEC);
    logFile.print(':');
    logFile.print(date.minute() , DEC);
    logFile.print(':');
    logFile.print(date.second() , DEC);
    logFile.print(" ");
    logFile.println(value);
}
```

```
void loop()
{
    if (rtcflag) {
        // clear flag and display time
        rtcflag = false;

        // check if interrupt is generated by alarm 1
        if (GFRTC.getAlarmInterruptFlag(E_ALARM_1)) {
            logFile = SD.open("datalog.txt" , FILE_WRITE);

            if (logFile) {
                int value = readSensor();
                DateTime now = rtc.now();

                logValue(now, value);
            }
        }
    }
}
```

```
        logFile.close();

    }

    else {
        Serial.println(F("Error al abrir el archivo"));
    }
    myFile = SD.open("archivo.txt");//abrimos el archivo
    int totalBytes=myFile.size();
    String cadena="";

    if (myFile) {
        // if(UltimaPocicion>=totalBytes)    UltimaPocicion=0;
        myFile.seek(UltimaPocicion);

        id=0;
        m_valor=0;

        //--Leemos una l nea de la hoja de texto-----
        while (myFile.available()) {

            char character=myFile.read();
            cadena=cadena+character;

            if(m_valor==1)
            {
                valor[id]=character;
                id++;
            }
            else
            {
                if(character ==','') {m_valor=1; id=0;}
                else
                {
                    retardo[id]=character;
                    id++;
                }
            }
        }
    }
}
```

```
        if(caracter==10)//ASCII de nueva de l nea
        {
                UltimaPocicion=myFile.position();

                break;
        }
}
//-----
myFile.close(); //cerramos el archivo

Serial.println("");
Serial.print("Cadena Leida:");
Serial.println(cadena);
Serial.print("Retardo:");
Serial.println(atoi(retardo));
Serial.print("Valor:");
Serial.print(atoi(valor));

delay(2500);
} else {
    Serial.println("Error al abrir el archivo");
}

state = true;
Serial.print("Activado");
}
}

data=atoi(valor);
Serial.println("");
Serial.print("data=");
Serial.println(data);

error=data-res;
```

```
Serial.println("");
Serial.print("Error=");
Serial.println(error);

    if(error < 0) eu=-error;
    else eu=error;

    u=0.4*eu;

Serial.println("");
Serial.print("eu=");
Serial.println(eu);

Serial.println("");
Serial.print("u=");
Serial.println(u);

//y= m*u;
y= 0.18*u;

    if(data < res+5 && data > res-5)
    {
        Serial.println("Alcanzado");
        delay(3000);
    }
    else
    {
        signo=res-data; //res es el valor actual de luxes
                        //data es el deseado
        if(signo > 0)
        {
            lamp=lamp+y;
```

```
    }
    if (signo < 0)
    {
        lamp=lamp-y;
    }

}
if (lamp<=0) lamp=0;
if (lamp>=255) lamp=255;

mySerial.write(lamp);

Serial.println("");
Serial.print("lamp=");
Serial.println(lamp);

advancedRead();
Serial.println(y);
delay(2000);

}

}
```

Bibliografía

- [1] S. Dutta Gupta Avinash Agargal. Impact of light-emitting diodes (leds) and its potential on plant growth and development in controlled-environment plant production system, agricultural and food engineering department, indian institute of technology kharagpur, kharagpur. , *Indian Institute of Technology Kharagpur*, 1:1–16, 2016.
- [2] Antonio Juárez Maldonado et Al. Análisis de crecimiento de cultivo de tomate en invernadero. *Mex. Cien. Agríc.*, 6:1–954, 2015.
- [3] H. Bang J.Lee, H. Kang and S. Kang. Dynamic greenhouse supplemental light source control with wireless sensor network, international conference on ict convergence(ictc). *Jeju Island*, 1:23–27, 2012.
- [4] Krishna K. Niyogi Erik H. Murchie. Manipulation of photoprotection to improve plant photosynthesis. *Plant Physiology*, 1:1–7, 2011.
- [5] Avinash Agarwal and S. Dutta Gupta. Impact of light-emitting diodes (leds) and its potential on plant growth and development in controlled-environment plant production system. *Bentham Science Publishers*, 1:1–16, 2016.
- [6] Stiina Kotirantah Silvia Bures, Miguel Urrestarazu Gavilán. Iluminación artificial en agricultura. *bibliotecahorticultura*, 1:1–46, 2018.
- [7] A. Iglesias, N. y Muñoz. Comparación de la transmisión de la radiación fotosintéticamente activa (par) en invernaderos ... *Horticultura Argentina*, 26(60):1–7, 2007.
- [8] Erik R. Navarro López Ezequiel Velazco Hernández, Raúl Nieto Ángel. *Cultivo del tomate en hidroponia e invernadero*, volume 4. 2011.
- [9] José Arturo Mancilla Morales. Desarrollo de un simulador de un cultivo de jitomate (*lycopersicum esculentum mill*) con aplicación de nitrógeno para invernaderos en aquixta, puebla. *Colegio de Postgraduados del Estado de Puebla*, 1:1–218, 2017.

- [10] Myung-Min Oh Ki-Ho Son. Growth, photosynthetic and antioxidant parameters of two lettuce cultivars as affected by red, green, and blue light-emitting diodes. *Korean Society for Horticultural Science and Springe*, 1:1–15, 2015.
- [11] Xiaojie Shi, Xingshuang An, Qingxue Zhao, Huimin Liu, Lianming Xia, Xia Sun, and Yemin Guo. State-of-the-art internet of things in protected agriculture. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 19(8), 2019.
- [12] Brian Norton. *Greenhouses*, pages 201–212. Springer Netherlands, Dordrecht, 2014.
- [13] Safya El-Gayar, Abdelazim Negm, and Mohamed Abdrabbo. *Greenhouse Operation and Management in Egypt*, pages 489–560. Springer International Publishing, Cham, 2019.
- [14] E. Iddio, L. Wang, Y. Thomas, G. McMorrow, and A. Denzer. Energy efficient operation and modeling for greenhouses: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 117:109480, 2020.
- [15] J.K. Gruber, J.L. Guzmán, F. Rodríguez, C. Bordons, M. Berenguel, and J.A. Sánchez. Nonlinear mpc based on a volterra series model for greenhouse temperature control using natural ventilation. *Control Engineering Practice*, 19(4):354 – 366, 2011.
- [16] Xavier Blasco, Miguel Martínez, Juan Senent, and Javier Sanchis. Model based predictive control using genetic algorithms. application to greenhouses climate control. In José Mira and Alberto Prieto, editors, *Connectionist Models of Neurons, Learning Processes, and Artificial Intelligence*, pages 457–465, Berlin, Heidelberg, 2001. Springer Berlin Heidelberg.
- [17] K. Ito. Greenhouse temperature control with wooden pellet heater via model predictive control approach. In *2012 20th Mediterranean Conference on Control Automation (MED)*, pages 1542–1547, July 2012.
- [18] M. Azaza, C. Tanougast, E. Fabrizio, and A. Mami. Smart greenhouse fuzzy logic based control system enhanced with wireless data monitoring. *ISA Transactions*, 61:297 – 307, 2016.
- [19] Víctor M. Castaño Alejandro Castañeda-Miranda. Smart frost control in greenhouses by neural networks models. pages 102–114, 2017.
- [20] L.H. Rajaoarisoa, N. K. M’Sirdi, and J-F. Balmat. Micro-climate optimal control for an experimental greenhouse automation. *Communications, Computing and Control Applications (CCCA), IEEE*, 2:1–6, 2012.

-
- [21] T. Takakura, A. Jordann, and L. Boyd. Dynamic simulation of plant growth and environment in the greenhouse. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 964:964–971, 1971.
- [22] Nubia Ilia Ponce. Diseño de un control electrónico automático para la concentración de dióxido de carbono en un microclima de jitomate fundamentado en un sistema dinámico. *Tesis*, 1:1–136, 2015.
- [23] I López Cruz G. Mino Aguilar E. Ochoa Pineda S. Lemak E.J Córdoba Gutiérrez, J.M Gutiérrez Arias. Control óptimo para el control de temperatura en el cultivo de tomate en invernadero basado en un sistema dinámico. *Pistas educativas.*, 28:1–13, 2017.
- [24] Naivy Hernández, F Soto, and A Caballero. Modelos de simulación de cultivos: Características y usos. *Cultivos Tropicales*, 30:00 – 00, 03 2009.
- [25] Chaves C. B. y Flórez R. V.J. López M., M.A. Modelos de cultivos y modelos fenológicos. *Editorial Universidad Nacional de Colombia.*, 1:153–177, 2011.
- [26] Erick Javier Córdoba Gutiérrez. Contrucción de un dispositivo electrónico de control óptimo de temperatura de un microclima fundamentado en un modelo dinámico. *Tesis*, 1:1–134, 2018.