



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA,
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

**TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO EN ELECTRÓNICA EN AUTOMATIZACIÓN Y
CONTROL**

**AUTOMATIZACIÓN DE LA CÁMARA DE CRECIMIENTO DE
CULTIVOS VEGETALES *IN-VITRO* POR PATRONES DE
LUMINOSIDAD E HISTORIAL DE DATOS, PARA LA
EMPRESA GERMOPLANTA CÍA. LTDA.**

AUTOR: FLORES PAZOS, DENIS MICHAEL

DIRECTOR: ING. PROAÑO, VICTOR

CODIRECTOR: ING. LEÓN, RUBÉN

SANGOLQUÍ

2015

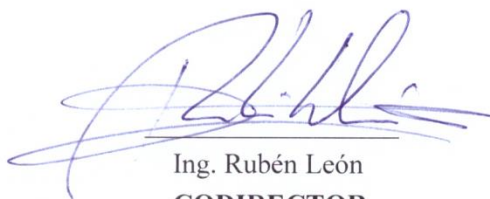
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE**INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL****CERTIFICACIÓN**

Por medio de la presente certificamos que el proyecto de grado, titulado **“Automatización de la Cámara de Crecimiento de Cultivos Vegetales *In-Vitro* por Patrones de Luminosidad e Historial de Datos, para la empresa Germoplanta cía. Ltda.”** Ha sido desarrollado en su totalidad y bajo nuestra dirección y supervisión por el señor “Denis Michael Flores Pazos con cédula de Identidad 1719895771”.

Atentamente



Ing. Víctor Proaño
DIRECTOR



Ing. Rubén León
CODIRECTOR

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE**INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL****DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

DENIS MICHAEL FLORES PAZOS

DECLARO QUE:

El Proyecto de Grado denominado **“Automatización de la Cámara de Crecimiento de Cultivos Vegetales *In-Vitro* por Patrones de Luminosidad e Historial de Datos, para la empresa Germoplanta cía. Ltda.”**, ha sido desarrollado en base a una investigación y trabajo constante y exhaustivo, respetando derechos de propiedad intelectual de terceros, conforme las fuentes que se adjuntan en la Bibliografía.

Consecuentemente este trabajo es de mi autoría.

En virtud de esta declaración, queda sobre mí la responsabilidad del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Sangolquí, 22 de Abril de 2015



Denis Michael Flores Pazos

AUTOR DEL PROYECTO

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE
INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

AUTORIZACIÓN

DENIS MICHAEL FLORES PAZOS

Autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE la publicación, en la biblioteca virtual de la institución del trabajo denominado **“Automatización de la Cámara de Crecimiento de Cultivos Vegetales *In-Vitro* por Patrones de Luminosidad e Historial de Datos, para la empresa Germoplanta cía. Ltda”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, 22 de Abril de 2015



Denis Michael Flores Pazos

AUTOR DEL PROYECTO

DEDICATORIA

A mi Madre Graciela

Por haberme brindado todo su amor y estar a mi lado en cada momento de mi vida apoyándome y orientándome con sus sabios consejos, ser mi soporte en los momentos más difíciles. Gracias a su dedicación conmigo he logrado culminar mis estudios universitarios con constancia, disciplina, dedicación y el entendimiento sobre cada desafío que he afrontado.

A mi hermano Marco

Por sus consejos, ayuda y preocupación en todo hecho y momento y por permitirme formar parte de tu vida recordándome siempre que debo ser un hombre de bien y lo afortunado que soy por formar parte de la familiar.

A mis amigos

Porque siempre hemos estado pendientes de cada uno de nuestros problemas y victorias que se han suscitado a lo largo de la carrera y la vida personal, por brindarme su amistad la cual valoro y la valoraré siempre y por su ayuda en el ambiente académico.

AGRADECIMIENTO

A mi querida Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE por haber sido mi segundo hogar en el cual desarrollé mis conocimientos y actitudes profesionales que me han permitido culminar mi carrera, conocer a mis amigos de por vida y haberme inculcado valores de responsabilidad y ética profesional.

Al ingeniero Víctor Proaño y al ingeniero Rubén León por haberme brindando su ayuda para la culminación de este proyecto de grado, por su orientación y guía con el cual pude cumplir de manera satisfactoria a lo requerido que se planteó en los objetivos.

A mi madre Graciela por ser mi apoyo incondicional en todo momento, por haberme educado y enseñado valores con amor para ser una buena persona y por ser un ejemplo a seguir para mí.

A mis amigos y familiares que han estado conmigo apoyándome a lo largo de estos años de formación universitaria, que con su ayuda he logrado grandes metas en formación profesional.

TABLA DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN	ii
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
GLOSARIO	xiv
RESUMEN.....	xvi
ABSTRACT.....	xvii
CAPITULO I.....	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1.DEFINICIÓN DEL PROYECTO	1
1.1.1.Antecedentes	1
1.1.2.Justificación	2
1.1.3.Alcance del Proyecto.....	3
1.2.OBJETIVOS	5
1.2.1.Objetivo General	5
1.2.2.Objetivos Específicos.....	5
CAPITULO II	6
MÁRCO TEÓRICO.....	6
2.1. Sistemas de Iluminación con LEDS.....	6
2.2. Micropropagación de Especies Vegetales <i>In-Vitro</i>	10
2.3. Crecimiento de Especies Botánicas Utilizando Luz Artificial.....	12
2.4. Sistemas de Enlace de Datos Inalámbrico Bluetooth.....	15
CAPITULO III.....	18
INGENIERÍA BÁSICA	18
3.1. Análisis y Observación del Estado Actual del Sistema	18
3.2. Requerimientos de Funcionamiento del Sistema	21
3.3. Bases y Criterios para Elección de Dispositivos.....	23
3.4. Especificaciones de Dispositivos	28

3.4.1. Microcontrolador PIC18F4550	28
3.4.2. Convertidores de Potencia BUCK	29
3.4.3. Sensores de Temperatura y Humedad DHT-22	30
3.4.4. Sensores de Luz LDR	31
3.4.5. Dispositivo de datos Inalámbrico Bluetooth HC-06	32
3.4.6. Dispositivos Adicionales.....	33
3.5. Detalle de Costos del Sistema	33
3.6. Descripción del Proceso y Filosofía de Control.....	34
CAPITULO IV	38
INGENIERÍA DE DETALLE	38
4.1. Diseño e Implementación de Hardware	38
4.1.1. Sistema de Iluminación LED	38
4.1.2. Instrumentación de Sensores LDR.....	45
4.1.3. Decodificación de Temperatura y Humedad del Sensor DHT-22	48
4.1.4. Sistema Electrónico de Control.....	54
4.1.5. Interfaz de Potencia.....	58
4.1.6. Sistema de Comunicación de Datos Inalámbrico.....	61
4.2. Diseño y Especificaciones del Sistema de Control	64
4.3. Descripción de Diagramas Eléctricos	87
4.4. Descripción de Interconexiones del Sistema	88
4.5. Desarrollo y Especificaciones de Software.....	89
4.5.1. Software desarrollado en la Plataforma Java™	89
4.5.2. Diseño de Interfaz Gráfica del Usuario.....	104
4.5.2. Desarrollo de algoritmo del Microcontrolador.	107
4.6. Diseño de Circuitos Impresos (PCB)	115
4.7. Distribución Física del Sistema.....	122
CAPITULO V	126
ANÁLISIS DE RESULTADOS	126
5.1. Análisis de Parámetros de desempeño del Sistema	126
5.3. Análisis de Eficiencia Energética	131
5.4. Análisis de Impacto del Alcance del Proyecto.....	133
CAPÍTULO VI.....	134

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	134
6.1. Conclusiones	134
6.2. Recomendaciones.....	136
BIBLIOGRAFÍA	138

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de un Sistema de Iluminación de estado sólido LED.....	7
Figura 2. Cultivos In-Vitro con Cámaras de Crecimiento.	10
Figura 3. Cultivo de Especies Vegetales Utilizando Luces LED.....	13
Figura 4. Comunicación de Maestro con varios Esclavos.	15
Figura 5. Símbolo Utilizado en Dispositivos con Tecnología Bluetooth.	15
Figura 6. Dimensiones de estantería en la cual se trabajará.....	18
Figura 7. Lámparas Fluorescentes Colocadas por estantería.	19
Figura 8. Balastos para Encendido de Lámparas Fluorescentes.	20
Figura 9. Sensor Utilizado para Tomar Datos de Forma Manual.	21
Figura 10. Diodo LED de Potencia de 1 Watt.	24
Figura 11. Diodos de Potencia con su Base Disipadora de Calor.....	24
Figura 12. Sensor de Temperatura y Humedad DHT-22	26
Figura 13. Resistencia Dependiente de la Luz (LDR).	27
Figura 14. Potenciómetro para variar la Luminosidad de Forma Manual.	27
Figura 15. Procesos Entre Hardware y Software del sistema.	35
Figura 16. Circuito en Configuración Mixta de Lámparas LED	39
Figura 17. Planificación de Distribución de LEDs en placa de Acero.....	40
Figura 18. Distribución de LEDs en Placa de Acero.	40
Figura 19. Placas de Acero con LEDs distribuidos.....	41
Figura 20. Distribución de corriente a través de lámpara LED.....	42
Figura 21. Consumo de Tensión de LEDs en ambos tipos de lámpara.	42
Figura 22. Colocación de Rieles Para Lámparas LED.....	44
Figura 23. Ubicación de Lámparas LED sobre la Riel.	44
Figura 24. Datos de Sensor LDR1 – Luminosidad vs Resistencia.	45
Figura 25. Circuito de Instrumentación Utilizado Para Sensores LDR.	46
Figura 26. Voltaje vs Luminosidad de Sección 1 del Sistema.....	48
Figura 27. Diagrama de Conexión entre Sensor DHT-22 y Microcontrolador.	49
Figura 28. Trama de datos General del Sensor DHT-22.....	50
Figura 29. Tiempos de inicialización del sensor DHT-22.	51
Figura 30. Interpretación de bits enviados por sensor DHT-22.	51
Figura 31. Distribución de Información en Trama de Datos DHT-22.....	52
Figura 32. Magnitudes y Escalas a trabajar para sensores LDR.....	55
Figura 33. Magnitudes y Escalas a trabajar en Actuadores.	57
Figura 34. Circuito para Obtención de Señal de Modo de Operación.	58
Figura 35. Convertidor Buck RioRand basado en LM2596.	59
Figura 36. Diagrama Interno de Convertidor Buck RioRand.	60
Figura 37. Diagrama de Interfaz de Potencia en el Sistema.	61
Figura 38. Módulo Bluetooth HC-06.....	62
Figura 39. Enlace de Datos inalámbrica vía Bluetooth.....	63

Figura 40. Forma de Curvas obtenidas de Luminosidad vs Conversor A-D.	65
Figura 41. Estructura de Control en Lazo Cerrado.	67
Figura 42. Respuesta de la Sección 1 ante una Entrada Escalón de 100% PWM.	68
Figura 43. Respuesta de la Sección 2 ante una Entrada Escalón de 100% PWM.	69
Figura 44. Respuesta de la Sección 3 ante una Entrada Escalón de 100% PWM.	69
Figura 45. Respuesta de la Sección 4 ante una Entrada Escalón de 100% PWM.	70
Figura 46. Herramienta <i>Ident</i> de MATLAB® con datos Ingresados.	71
Figura 47. Salida de Secciones 1 y 2 con Respecto a entrada Escalón.	72
Figura 48. Salida de Secciones 3 y 4 con Respecto a entrada Escalón.	72
Figura 49. Ajuste de Funciones de Transferencia Obtenidas para la Sección 1 con respecto a la Toma de Datos.	74
Figura 50. Función de Transferencia de Secciones 1 y 2 en Lazo Cerrado.	80
Figura 51. Respuesta con Controlador en Lazo Cerrado para Secciones 1 y 2.	81
Figura 52. Función de Transferencia de Secciones 3 y 4 en Lazo Cerrado.	82
Figura 53. Respuesta con Controlador en Lazo Cerrado Para Secciones 3 y 4.	83
Figura 54. Formas de Curvas de Luminosidad (Lux) vs Luminosidad (0 a 2046). ...	84
Figura 55. Diagrama de Sistema de Control.	85
Figura 56. Diagrama de Bloques en Simulink para Simulación de Lazo Cerrado. ...	86
Figura 57. Respuesta Obtenida Para la Sección 1.	86
Figura 58. Respuesta Obtenida para la Sección 3.	87
Figura 59. Servicio de Puerto Serial Virtual Generado por módulo HC-06.	93
Figura 60. Árbol del Proyecto Desarrollado en Netbeans IDE.	95
Figura 61. Diagrama Lenguaje Unificado Modelado Paquete Comunicaciones.	96
Figura 62. Diagrama Unificado de Modelado Paquete Modelo.	98
Figura 63. Diagrama de Lenguaje Unificado de Modelado Paquete Controlador. ...	100
Figura 64. Ventana de Control y Monitoreo del Sistema.	105
Figura 65. Ventana del Menú Principal del Sistema.	106
Figura 66. Ventana de Consulta de Base de Datos del Sistema.	107
Figura 67. Diagrama de Flujo de Algoritmo de Microcontrolador Principal.	109
Figura 68. Estructura de dato Serial Recibido.	109
Figura 69. Diagrama de Flujo de Algoritmo de Controlador PI.	113
Figura 70. Cadena de caracteres para Envío de Datos hacia el PC.	114
Figura 71. Circuito en ISIS para Sensores DHT-22.	116
Figura 72. Diseño de Circuito Impreso para Sensores DHT-22.	117
Figura 73. Circuito en ISIS para sensores LDR.	117
Figura 74. Diseño de Circuito Impreso para sensores LDR.	118
Figura 75. Diseño de Circuito Impreso para Potenciómetros.	118
Figura 76. Diseño de Circuito Impreso para Sistema de Control.	120
Figura 77. Modelo Tridimensional Virtual de PCB de Sistema de Control.	121
Figura 78. Ubicación de Potenciómetros en la Estantería.	122
Figura 79. Soporte con Sensor LDR instrumentado.	123
Figura 80. Distribución de Sensores por Sección.	124

Figura 81. Distribución por Sección de Sensores.	124
Figura 82. Caja del Controlador del Sistema con sus Conexiones Externas.	125
Figura 83. Controlador con Fuente en parte Superior de Estantería.	125
Figura 84. Pantalla de Control y Monitoreo Operativa del Sistema.	130

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparativa de Tipos de Luminarias Convencionales vs LED.	9
Tabla 2. Parámetros relevantes actuales de cámaras de crecimiento.	21
Tabla 3. Características Generales del Microcontrolador PIC18F4550.....	28
Tabla 4. Características del Convertidor RioRand Buck.	29
Tabla 5. Características del Sensor DHT-22.....	30
Tabla 6. Características de Sensores LDR.	31
Tabla 7. Características del Módulo Bluetooth HC-06.....	32
Tabla 8. Datos a considerar en el diseño de Lámparas LED	38
Tabla 9. Cálculo de Consumo de Tensión de cada Lámpara	43
Tabla 10. Variables Involucradas en la Comunicación Inalámbrica.....	64
Tabla 11. Parámetros para Función de transferencia de Secciones 1 y 2	75
Tabla 12. Parámetros para la función de Transferencia de Secciones 3 y 4.	75
Tabla 13. Descripción de Campos de Tabla <i>camara</i> de la Base de Datos <i>germoplanta</i>	92
Tabla 14. Resultados Prácticos vs Teóricos obtenidos para la sección 1.....	126
Tabla 15. Resultados Prácticos vs Teóricos obtenidos para la sección 2.....	128
Tabla 16. Resultados Prácticos vs Teóricos obtenidos para la sección 3.....	129
Tabla 17. Resultados Prácticos vs Teóricos obtenidos para la sección 4.....	130
Tabla 18. Relación de consumo Máximo de sistema LED vs Fluorescente	132
Tabla 19. Relación de Consumo Máximo vs 3000 Luxes de lámparas LED.	132

GLOSARIO

Flujo Luminoso	Es la cantidad de luz que fluye en un determinado tiempo, su unidad de medida es el lumen.
Iluminancia	Es la cantidad de luz que incide sobre una unidad de área, su unidad de medida es pie candela o lux dependiendo del sistema de medida utilizado.
LED	De las siglas en inglés: Light-Emitting Diode, que significa Diodo Emisor de Luz. Es un dispositivo semiconductor con capacidad de generar luz al circular corriente a través de él.
Luxómetro	Es un instrumento de medición que permite medir simple y rápidamente la iluminancia real y no subjetiva del ambiente. La unidad de medida que utiliza son los luxes.
Watts	El vatio (Watt en Inglés) es la unidad de medida de potencia del Sistema Internacional de Unidades. Su símbolo es la letra <i>W</i> y equivale a 1 Joule por Segundo.
Micropropagación	Es una técnica de cultivo de la Biotecnología de especies vegetales mediante la extracción de explantes que son colocados en sobre un medio nutritivo en condiciones estériles.
Explante	Es un tejido vegetal vivo separado de su órgano propio y transferido a un medio artificial de crecimiento.
Protoplasto	Se refiere al primer cuerpo organizado de una especie, son células de plantas que han perdido parcialmente su estructura celular que son compuestos mediante varias técnicas.
Fitohormonas	También conocidas como hormonas vegetales, son sustancias producidas por células vegetales en sitios estratégicos de la planta y son capaces de regular de manera predominante los fenómenos fisiológicos de las plantas.
Auxinas	Es un grupo de fitohormonas que actúan como reguladoras del crecimiento vegetal. Esencialmente provocan la elongación de las células
Citocininas	Es un grupo de fitohormonas que promueven la división y diferenciación celular. Mediante esta hormona las plantas pueden dar origen a la formación de sus órganos.

Yema Apical	Es un órgano complejo de las plantas formado por células con capacidad de división que darán lugar a hojas y flores, apical es aplicada cuando se encuentra en la punta de la ramilla.
Yema Axilar	Es la yema que está ubicada en la axila de la hoja, zona también conocida como las laterales de la hoja.
Fúngico	Palabra utilizada para hacer referencia de pertenencia o relatividad a los hongos.
Espectro Visible	Es la región del espectro electromagnético que el ojo humano es capaz de percibir, su rango se encuentra entre las longitudes de onda de 400 a 700nm.
Piconet	Es una red informática cuyos nodos utilizan tecnología Bluetooth, puede constar de dos a siete dispositivos.

RESUMEN

En el presente proyecto, denominado Automatización de la Cámara de Crecimiento de Cultivos Vegetales *In-Vitro* por Patrones de Luminosidad e Historial de Datos, para la empresa Germoplanta cía. Ltda, se plantea como principal meta a cumplir el diseño e implementación de un sistema automatizado de crecimiento de especies vegetales adecuado en una estantería metálica de cuatro secciones. El sistema permite el control de la intensidad luminosa por sección en la unidad lux con el fin de realizar el proceso de crecimiento eficaz de las plantas mediante fotosíntesis, reduciendo el índice de mortandad y mejorando la producción. El sistema también cuenta con la adquisición de datos de temperatura, humedad y luminosidad, con fin de monitoreo en tiempo real y almacenamiento de un historial para estudios de crecimiento, fotosíntesis y patrones de luz a seguir para el adecuado desarrollo de las especies vegetales, dicho historial se almacena en una base de datos mediante el sistema de gestión MySQL. El usuario dispondrá de una interfaz gráfica en computador desarrollada bajo la plataforma Java™, la cual tiene las funciones principales de establecer parámetros de control, monitoreo en tiempo real y búsqueda de historial del sistema. El control establece la intensidad de la luz y tipo de especie a tratar, el monitoreo muestra los valores de temperatura, humedad y luminosidad. El software internamente cuenta con un motor de búsqueda basado en sentencias SQL que posibilita tener varias opciones para encontrar la información requerida para estudios. Para realizar el proceso de control, el sistema consta de luminarias LEDS de potencia y sensores ubicados por sección para generar realimentación de variables. El sistema de control esta comandado por un microcontrolador PIC18F4550 capaz de procesar señales de entrada analógicas y digitales provenientes de los sensores, y de enviar señales digitales con modulación de ancho de pulso (PWM) que permiten la variación de intensidad de la luz a través de una interfaz de potencia que utiliza convertidores BUCK con fin de regulación de tensión y corriente. El sistema de control mantiene un enlace de datos constante con el computador mediante tecnología inalámbrica Bluetooth, con el que se facilita la movilidad y evita el cableado dentro del laboratorio. Los dispositivos inalámbricos se encuentran a una distancia adecuada para el funcionamiento eficiente de este tipo de comunicación.

PALABRAS CLAVES:

- **LED**
- **CONVERTIDOR BUCK**
- **MICROCONTROLADOR**
- **BLUETOOTH**
- **BASE DE DATOS MYSQL**
- **PLATAFORMA JAVA**

ABSTRACT

This Project called, Automation of the Growth Chamber of *In-Vitro* Vegetable Crops, by brightness patterns and Data History for the company Germoplanta Cía. Ltda. proposes as its main goal the design and implementation of an automated system that allows control of the light intensity in the unit lux to appropriate the growing of plant species on a metal shelf with four sections. Light control makes the growth process by photosynthesis more effective, reducing mortality rate and improving the production. The system also features data acquisition of temperature, humidity and light that allows the real-time monitoring and storing of a record for studies of growth, photosynthesis and light patterns to follow proper development of the plant species. This record is stored in a database using the MySQL management system. The final user have a graphical computer interface developed under the Java Platform which has as main functions setting control parameters, real-time monitoring and search system history, the control sets the intensity of light and species type to be treated. The monitoring shows the values of temperature, humidity and light with indicators. The software internally has a search engine based on SQL statements that allows having several options to find the information required for the studies. To make the process control, the system consists of LED lights and sensors located in each section to generate feedback variables. The control System is commanded by a PIC18F4550 microcontroller capable of processing analog and digital input signals from sensors, and sending digital signals with pulse width modulation (PWM) that allow the variation of light intensity through a power interface that uses BUCK Converters to regulate voltage and current. The control system maintains a constant link of data with the computer using Bluetooth wireless technology, which facilitates mobility and prevents wiring inside the lab. The wireless devices have a suitable distance for the efficient functioning of this type of communication.

KEYWORDS:

- **LED**
- **BUCK CONVERTER**
- **MICROCONTROLLER**
- **BLUETOOTH**
- **MYSQL DATABASE**
- **JAVA PLATFORM**

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1.DEFINICIÓN DEL PROYECTO

1.1.1. Antecedentes

En la actualidad, muchas de las especies de plantas existentes van perdiendo la capacidad de producir semillas y deben ser propagadas por procesos artificiales, conocidos como procesos de multiplicación vegetativa, los cuales pueden ser procedimientos sencillos, como la propagación por segmentos de plantas, hasta procedimientos más complejos como es el cultivo de tejidos in vitro.

Con el avance de la Biotecnología, se han desarrollado formas de micropropagación utilizando medios de cultivo líquidos con el objetivo de automatizar la propagación de plantas, aumentar su número y disminuir los costos de producción.

La empresa Germoplanta Cía. Ltda. Ubicada en la Ciudad de Quito entre las calles Almendros y Viñedos, Sangolquí; se encarga de la micropropagación de todo tipo de plantas, brindándole al cliente un producto libre de enfermedades con mayor rendimiento productivo.

Uno de los procedimientos que se realiza para la obtención de estos productos es la exposición de las plantas a la luz artificial, con fines de obtener un crecimiento controlado aprovechando el proceso de fotosíntesis.

Las estanterías donde se produce el proceso de crecimiento, están equipadas con lámparas fluorescentes en las cuales se coloca las plantas en frascos para la

exposición a luz artificial constante durante un periodo de tiempo. Todo esto realizado con interacción humana, mediante control manual de interruptores de encendido y toma de tiempo.

El proceso en el cual se controla el crecimiento de las plantas requiere ciertos niveles de luminosidad de manera que sea el más óptimo, dicha variación no puede ser lograda con el equipo actualmente instalado, ya que las lámparas fluorescentes no poseen la característica de variar su luminosidad, el sistema no es automático en su tiempo de funcionamiento y no consta con el almacenamiento de datos históricos, siendo estas las dificultades presentadas por el sistema para controlar el crecimiento de la planta.

1.1.2. Justificación

La nueva era tecnológica busca desarrollar sistemas automáticos e innovadores para todo tipo de industria, siendo el campo de la biotecnología uno de los más actuales y mediante el cual la humanidad ha podido desarrollar importantes avances científicos y mejoramiento de la calidad en la industria alimenticia.

Mediante la automatización de los procesos realizados en la propagación y desarrollo de plantas clonadas, podemos obtener un producto final de alta calidad que en el campo de la agricultura ecuatoriana significa una importante inversión, ya que al tener una planta que reúna todas las características de crecimiento adecuado.

Sin embargo los sistemas automáticos para obtener todos los requisitos de un producto de alta calidad resultan bastante costosos, debido a la poca cantidad de empresas que se dedican a su elaboración y porque son vendidos por empresas internacionales, siendo una gran oportunidad el diseño e implementación de estos sistemas en la industria ecuatoriana, mejorando la calidad de los productos a un costo mucho menor.

Actualmente la empresa cuenta con una producción aproximada de 100.000 plantas de diferentes variedades vegetales, este número puede incrementar gracias a la automatización de los procesos de micropropagación como es la cámara de crecimiento, ayudando a reducir el índice de mortandad, produciendo plantas saludables y resistentes, para luego ser trasladadas al invernadero.

La implementación del sistema automático de las estanterías de crecimiento de la empresa Germoplanta Cía. Ltda. Permitirá poder controlar el crecimiento de cada especie vegetal basándose en patrones de luminosidad que se obtiene mediante el análisis de crecimiento de los mismos, además de que la empresa ya cuenta con protocolos obtenidos para varias especies; también se podrá acceder a un histórico de datos de luminosidad con finalidad de estudio del comportamiento de crecimiento de las especies por parte del personal de la empresa.

1.1.3. Alcance del Proyecto

El proyecto pretende automatizar la etapa de crecimiento de las plantas mediante luz artificial, realizando el diseño del sistema de control utilizando microcontroladores, para luces tipo LED que serán ubicadas en las estanterías de la cámara de crecimiento; para que estas respondan adecuadamente en la cantidad de luxes que deben emitir de acuerdo a la especie colocada o manualmente mediante un software en PC, dicha emisión de luminosidad tiene que estar asociada de acuerdo a lo obtenido en los patrones diarios de luminosidad que permitan a la especie un crecimiento óptimo.

Cabe mencionar que una de las razones de utilizar luces de tipo LED es su gran ahorro energético en relación a cualquier otro tipo, significando que a largo plazo el costo por consumo energético será el mínimo.

El software de gestión se utilizará desde la oficina de Germoplanta, evitando así que pueda existir contaminación debido al ingreso de personas al laboratorio. Para

desarrollo de este software se utilizará la plataforma Java™, aprovechando así su Licencia General Pública (GNU GPL), ya que esto nos garantiza la libertad de desarrollo de software libre, significando un ahorro en implementación.

El software tiene como principal objetivo de ser una interfaz humano máquina para control y monitoreo en tiempo real de la luminosidad emitida en cada estantería y poder generar un historial en una base de datos MySQL de cada variable involucrada por día para fines de estudio del crecimiento de la especie por parte del personal, esto es importante porque al obtener un patrón de luminosidad óptimo para una especie puede ser aplicado directamente.

Posterior a esto se necesita realizar el enlace para intercambio de datos entre el sistema de control y el software, esto será realizado vía inalámbrica utilizando tecnología Bluetooth, de manera que no se tenga que llevar cableado al laboratorio y no haya problemas en mantenimiento de las instalaciones o movilidad de la cámara de crecimiento.

Obteniendo esto, con el proyecto implementado se logrará alcanzar una producción de mucha mejor calidad que la que se obtiene actualmente, con lo cual se mejora la eficiencia productiva y por ende el aumento de la cartera de clientes en la empresa GERMOPLANTA, con futura verificación del desempeño del sistema implementado para su posible reproducción en otros laboratorios de Biotecnología Vegetal, teniendo un sistema automatizado económicamente más accesible y fabricado dentro del Ecuador.

Finalmente, hay que tomar en cuenta que a más de mejorar significativamente el crecimiento, calidad y productividad de cualquier variedad de planta, se disminuye la mano de obra por consecuencia del control y monitoreo automatizado de los equipos (estanterías) de multiplicación.

1.2.OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo General

Realizar el diseño e implementación del sistema automático para la cámara de crecimiento de diferentes especies vegetales en el laboratorio de la empresa Germoplanta Cía. Ltda.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Realizar el diseño e implementación de las lámparas LED con fin de reducción de costos de adquisición de materiales para implementación.
- Diseñar el sistema de control de las lámparas para control de su intensidad luminosa por medio de PWM utilizando microcontroladores.
- Realizar la instrumentación de sensores para medición de temperatura, humedad relativa e intensidad luminosa de cada sección del sistema.
- Desarrollar un software que permita la gestión remota inalámbrica del sistema, con capacidad monitoreo y control en tiempo real de cada sección del sistema.
- Almacenar los valores de temperatura, humedad relativa e intensidad luminosa en una base de datos en MySQL para generar un historial que facilite el estudio del crecimiento de las especies botánicas.
- Establecer una comunicación continua vía inalámbrica utilizando tecnología Bluetooth entre el sistema de control ubicado dentro del laboratorio y el computador en la oficina, evitando la contaminación del laboratorio por ingreso de personas y cableado.
- Realizar un motor de búsqueda para el historial almacenado, basado en sentencias SQL, para facilitar la obtención de la información requerida para estudios.

CAPITULO II

MÁRCO TEÓRICO

2.1. Sistemas de Iluminación con LEDS

La luz es necesaria en cualquier tipo de entorno ya que gracias a ella la visión de entornos es posible para cualquier ser vivo y mediante la interacción con los objetos el sistema visual de los usuarios es capaz de dar su interpretación de colores, modificar la apariencia de espacio, estética, ambientación y forma. Para el diseño de un sistema de iluminación se requiere del conocimiento de dichas interpretaciones y conocimiento de métodos y tecnología para su implementación, especialmente una creatividad que permita la adecuada distribución de la iluminación.

La iluminación se define como la luz que incide sobre una superficie, medidas en pies candela o luxes. Cuando esta se distribuye de acuerdo a un plan técnico económico se convierte en Ingeniería de Iluminación que da soluciones que permiten optimizar la relación entre el usuario y su medio ambiente.

La eficiencia energética de un sistema de iluminación depende de su eficiencia en la instalación como su utilización, en la instalación depende del diseño en la distribución del espacio donde están colocados los sistemas, equipos auxiliares que se utilicen y el tipo de luminarias. Con respecto a la utilización está la posibilidad de reducir el consumo energético de las instalaciones mediante el aprovechamiento de la luz natural apagando las luminarias en caso de no ser necesarias. (JIMÉNEZ, 2012).

Para obtener una eficiencia adecuada se debe considerar dos parámetros importantes involucrados en el cálculo de la iluminación. El flujo luminoso que es la cantidad de luz que fluye en un determinado tiempo y su unidad de medida es el

lumen. La Iluminancia que es la cantidad de luz que incide sobre un área y su unidad de medida es el pie candela o lux, es muy utilizada para el diseño de sistemas de iluminación ya que la gran cantidad de aplicaciones son realizadas sobre superficies planas sin irregularidades como punto de partida ideal para los cálculos correspondientes. (HOLOPHANE, 2015).

El primer espectro visible práctico LED fue desarrollado en 1962 y con el desarrollo de los LED hasta un nivel tan alto, en la actualidad es escogido como la mejor alternativa de iluminación, mejor que el bulbo incandescente, luz de neón y fluorescente en muchas áreas. Se predice que con el ya remoto desarrollo de los LED, las fuentes de iluminación convencionales actuales cederán paso a los LED en un futuro próximo. La gran ventaja que estos poseen frente a otros tipos de fuentes de iluminación radica en su eficiencia energética.

La iluminación LED tiende a ser la más utilizada gracias a las mejoras que consiguen obtener una mejora espectacular en la industria dedicada a la iluminación y además es más fácil controlar un arreglo de LEDS que cualquier otra lámpara. Este tipo de sistema tiene sus requerimientos especiales con respecto a los convencionales, el primero y más notorio es la fuente de alimentación de corriente continua y regulada requerida para obtener una salida de iluminación constante y desarrollar una larga vida del dispositivo, sin embargo tiene ventajas igualmente notorias como es el que no necesitan calentamiento ni tampoco lo generan y no requieren de altos voltajes de alimentación para su encendido. (JIMÉNEZ, 2012).

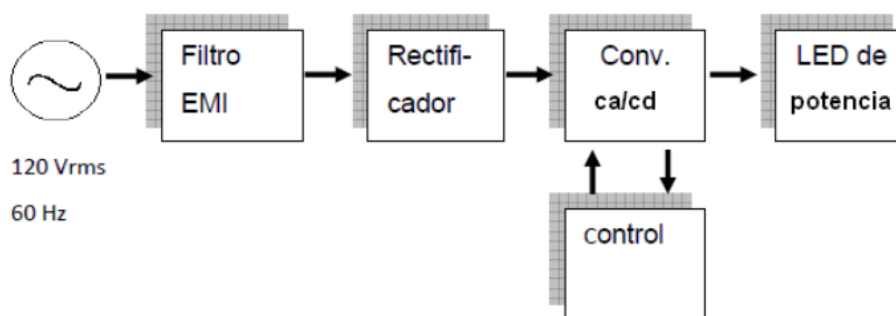


Figura 1. Esquema de un Sistema de Iluminación de estado sólido LED.

(Fuente: JIMÉNEZ, 2012)

Las fuentes de iluminación LED reemplazan a las fluorescentes lineales mediante un arreglo rectilíneo de LEDS en configuración serie y paralelo, montados en un formato tubular con bases bi-pin que son compatibles con los portalámparas fluorescentes estándar. Para este tipo de luminaria se utiliza LEDS que no tienen un ángulo de apertura amplio (no mayor a 60 grados) por lo que a diferencia de tubos fluorescentes convencionales con un patrón de luz omnidireccional este será más direccional desde donde se coloque en el techo, dicha característica no se encuentra en la información encontrada por el fabricante la cual tiene un enfoque principalmente orientado a la eficiencia y ahorro energético, larga vida, bajo mantenimiento y composición libre de mercurio. (JIMÉNEZ, 2012).

Las lámparas LED no necesitan de balastro como es el caso de fluorescentes o mercurio, sino de un regulador que rectifique la tensión alterna y controle la corriente suministrada, dicho controlador generalmente se encuentra dentro del tubo, por lo que a pesar de ser compatibles con el portalámparas fluorescente las conexiones de los balastros deben ser removidas. Sin embargo hay muchas características que hacen a las luminarias LED la mejor alternativa como fuente de iluminación y proporcionar una amplia gama de uso, dichas características de manera general son:

- Pequeño tamaño, un LED puede ser sumamente pequeño y proporcionar un haz de luz de altas prestaciones lumínicas.
- Consumo de electricidad bajo, los LED tienen un consumo de electricidad bajo que está entre los 2 a 3.6 volts y 0.02 a 0.7 Amperios.
- Larga vida de funcionamiento a una tensión nominal, la corriente y el ambiente adecuado que les permite tener una vida promedio de 50000 horas.
- Alta eficacia luminosa y baja emisión de calor, los LED a diferencia de otros tipos de fuente luminosa convierten casi toda la energía usada en luz, por lo que su rendimiento energético se traduce en alta eficacia luminosa a baja potencia.
- Protección de medio ambiente, estas lámparas no contienen ni plomo ni mercurio por ende no hay contaminación ambiental.

- Irrompible, este dispositivo está completamente encajado en un recinto de resina epoxi sin generar partes móviles por lo que es resistente a vibraciones o impactos, por lo que es mucho más robusto que una lámpara incandescente o fluorescente convencional.
- Tiempo de encendido, un LED se enciende en aproximadamente 60 nano segundos mientras que un incandescente es 10 milisegundos o 1 segundo o más para fluorescentes.
- Alta eficiencia luminosa, un LED actual emite una gran cantidad de luz, su eficiencia es mayor que 80 lúmenes por watt, por lo que puede reemplazar a una lámpara de sodio de 400 Watt con una LED de 100 Watt.

El inconveniente mayor de las luminarias LED es su precio elevado en comparación a las fuentes de luz convencionales, sin embargo su ahorro energético supone una recuperación de la inversión a largo plazo el cual es aproximadamente un año y 3 meses y puede variar dependiendo de la tarifa energética del país.

Tabla 1.

Comparativa de Tipos de Luminarias Convencionales vs LED.

LED de 15W	Bombilla Incandescente	Lámpara Bajo consumo	Lámpara Halógena	Lámpara LED
Consumo Real	100W	30W	50W	15W
Consumo por Hora (kWh)	0.1	0.03	0.050	0.015
Consumo en 1 Año (kW)	365	109.5	182.5	54.75
Costo energético en 1 Año	\$ 61.32	\$ 18.40	\$ 30.66	\$ 9.19
Vida útil (horas)	1000	3000	3000	Alrededor de 50000

(Fuente: Bombillas Bajo Consumo, 2014)

2.2. Micropropagación de Especies Vegetales *In-Vitro* (SALGADO, 2015)

Un cultivo *In-Vitro* es aquel realizado sobre un medio nutritivo en condiciones estériles. Puede ser aplicado a plantas, semillas, embriones, órganos, explantes, células y protoplastos. El cultivo *In-Vitro* ha demostrado un gran avance en el campo de la Biotecnología Vegetal y para lograr su propósito existe una diversa cantidad de tecnologías en laboratorios e invernaderos. A este sistema de propagación se le conoce como micropropagación como base principal el cultivo *In-Vitro* de tejidos vegetales, la cual es una de las aplicaciones para producción masiva de plantas de interés económico o biológico.

Para lograr un cultivo exitoso de las plantas, los tejidos y semillas deben ser esterilizados de manera superficial y se colocan sobre soluciones nutritivas especiales a las cuales se les incorpora combinaciones adecuadas de auxinas y citocininas, dos de las principales fitohormonas del crecimiento vegetal. Con esta aplicación y el cultivo controlador como el pH, la luz, la temperatura y humedad es posible reproducir todos los factores que puedan incidir en el crecimiento y desarrollo de los tejidos de las plantas *In-Vitro*.



Figura 2. Cultivos *In-Vitro* con Cámaras de Crecimiento.

(Fuente: Revista Saber más, 2015)

Los cultivos In-Vitro se mantienen en cuartos con cámaras de crecimiento con luz artificial, en una temperatura promedio de 25°C a una intensidad de 25 a 35 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{seg}$ con un periodo de 12 horas de luz. El primer paso para iniciar un cultivo In-Vitro adecuado es la elección del explante, la edad fisiológica del explante es un factor importante para la formación de órganos, entre más joven más fácil será su adaptación y respuesta al cultivo in-vitro. El explante mayormente utilizado para procesos de micropropagación son las yemas apicales y axilares de las plantas.

La micropropagación tiene la característica de ser asexual ya que parte de un segmento de una planta madre para la replicación masiva de plantas genéticamente idénticas, denominadas clones. Con la utilización de las técnicas de la Biotecnología se incrementa de manera exponencial el número de plantas en microexplantes, en los cuales se forman diminutos brotes que se desarrollan hasta la formación de la planta mediante el fenómeno de la regeneración vegetal. El número de plantas que se regeneren en un explante y el tiempo de cultivo dependen de la especie vegetal, una vez que las plantas se han multiplicado y desarrollado in-vitro deben ser trasplantadas a suelo o sustrato específico para cada especie pasando por un periodo de aclimatación, en el cual se adaptan a las condiciones de humedad de una cámara de crecimiento o del invernadero, disminuyendo progresivamente la humedad relativa e incrementando progresivamente la intensidad de luz. Las plantas primeramente se cultivan en contenedores cubiertos por un plástico y posteriormente son plantadas en maceta para su crecimiento y desarrollo en el invernadero.

La técnica de cultivo in-vitro ha abierto nuevas posibilidades para el manejo de la genética básica y obtener nuevos cultivares, además que a importancia de la micropropagación trae consigo varias ventajas las cuales son:

- Permite obtener plantas de alto registro fitosanitario, es decir que al someter el tejido vegetal a este sistema de cultivo se eliminan totalmente las enfermedades de tipo bacteriano y fúngico y en algunas ocasiones de tipo viral.

- Las plantas obtenidas mediante este sistema son réplicas exactas entre si y fieles copias de la planta progenitora.
- El número de plantas obtenidas por cultivo in-vitro es muy superior al obtenido por cualquier otro método de propagación.
- En algunas ocasiones es posible acortar los tiempos de producción de plantas.
- Permite tener espacios relativamente pequeños con una gran cantidad de plantas.
- Facilita el almacenamiento y transporte de plantas.
- Se eliminan problemas de largas cuarentenas a que son sometidas las plantas en las fronteras cuando se trata de introducirlas de un país a otro.

2.3. Crecimiento de Especies Botánicas Utilizando Luz Artificial

(NAVARRO, 2013)

El crecimiento de las plantas ha sido estudiado y analizado utilizando varias fuentes artificiales de luz desde lámparas de alta presión de Sodio (HPS), Halogenuros Metálicos (MH), Fluorescentes y Fluorescentes compactos tipo Agrolite o domésticos (CFL) aplicada bajo varias especies vegetales. Con la llegada y el auge de las luces LED se realizaran hoy en día todo tipo de estudio y comparativa con respecto a las anteriores mencionadas, siendo las principales diferencias la eficiencia energética y lumínica.

Mientras que las lámparas MPS o MH solo aprovechan el 10% y las fluorescentes/CFL sobre el 50% del gasto en crear la luz que es de interés para la planta, una lámpara LED tiene una efectividad del 90%. Esto permite un rendimiento por Watt mucho más eficiente que las demás luminarias y nos permite utilizar mucho menos potencia eléctrica, hasta 3 veces menos de momento y obtener un resultado similar.

La gran ventaja de la utilización de LEDS para el cultivo de especies vegetales es la posibilidad de elegir la gama de espectros con lo cual se puede eliminar los que la

planta no utiliza y realizar reforzamiento o debilitamiento de los espectros elegidos según la especie o gusto. Con la implementación de los espectros que deseamos se obtiene una efectividad alta ya que no se desperdicia la energía en forma de calor y luz inservible para la planta. Las plantas según su etapa de vida tienen necesidades lumínicas por lo que los espectros para crecimiento y floración e intensidad a aplicar deben ser estudiados.



Figura 3. Cultivo de Especies Vegetales Utilizando Luces LED.

(Fuente: HOLOPHANE, 2015)

Crecimiento

En el crecimiento de la planta es donde las luces LED se llevan la mejor eficiencia posible, los demás tipos de fuentes de iluminación no significan rival para ellas, Con 100/120 Watts/m² el rendimiento es similar a una lámpara de 400W MH o MPS y el resultado de crecimiento se encuentra entre las 18 horas de luz diarias.

El espectro que es utilizado para esta etapa es el azul, incluso algunos cultivadores llegan a utilizar solo este tipo de luz durante el crecimiento, si bien las pruebas realizadas en plantas indican a que requieren de más colores estas varían dependiendo de la etapa de su vida, por ejemplo la luz roja ayuda a ramificar y crear

ramas y el azul estimula la acumulación de agua en el follaje. El espectro más recomendable para el crecimiento es 40% Azul, 30% rojo claro y 30% Rojo profundo, cada fabricante tiene su configuración de colores, la mayoría basadas en la planta del tomate. Muchos cultivadores se decantan por luminarias LED con luz blanca, los LED blancos son los más utilizados en todos los campos de la iluminación y por lo tanto son los más desarrollados y potentes, posiblemente se ganen efectividad lumínica pero se corre el riesgo de perder la inmunidad que solamente se consigue al escoger los espectros de colores contra los insectos.

Floración

En esta etapa es la más exigente con respecto a las luminarias, muchas plantas son devoradoras de luz y la calidad de esta influye directamente en los resultados de una forma rotunda. Para floración y con la potencia que rinden actualmente las mejores luminarias debe estar entre unos 160/180 Watt/m² para obtener buenos resultados, por debajo de estas cifras también funcionan pero los resultados obviamente no son los mismos. Los espectros como en crecimiento dependen del fabricante y se puede encontrar hasta configuraciones de 4 colores que en varias especies obtienen grandes resultados convirtiéndolos en las mejores fuentes de iluminación con LED para floración.

La cantidad de especies vegetales en el mundo crea muchas dudas sobre la luz y las plantas con respecto al cultivo utilizando LEDS, sin embargo para el cultivador, experimentador y biotecnologías de hoy en día las características de eficiencia energética, rendimiento y flexibilidad que brindan estas luces resultan atractivas, generando una gran cantidad de estudios sobre el desempeño que estas generan sobre las plantas.

2.4. Sistemas de Enlace de Datos Inalámbrico Bluetooth (KIOSEA, 2014)

Los sistemas inalámbricos de comunicación Bluetooth utilizan la técnica del Espectro Ensanchado por Saltos de Frecuencia (FHSS) que es igualmente utilizada por Wi-Fi, esta técnica consiste en dividir la banda de frecuencia de 2.402 hasta 2.480 GHz en 79 canales con 1 MHz de ancho cada uno, estos canales se denominan saltos. Para transmitir la señal se utiliza una secuencia de canales que sea conocido tanto por el emisor como receptor, al cambiar canales con una frecuencia de 1600 veces por segundo, el estándar Bluetooth puede evitar la interferencia con otras señales de radio.

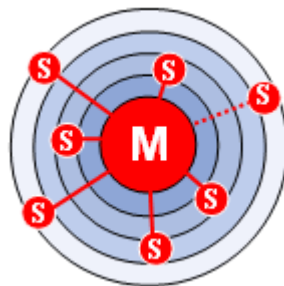


Figura 4. Comunicación de Maestro con varios Esclavos.

(Fuente: KIOSKEA, 2014)

El estándar Bluetooth se basa en una comunicación de tipo maestro/esclavo, con una capacidad de formarse una red de un maestro que establece comunicación con varios dispositivos esclavo dentro del área, denominada también “piconet”. En una misma área pueden coexistir hasta 10 redes piconet y un dispositivo maestro puede conectarse con hasta 7 dispositivos a la vez, dentro de la red a cada dispositivo se le asigna una dirección lógica de 3 bits, obteniendo un máximo de 8 dispositivos con el maestro.



Figura 5. Símbolo Utilizado en Dispositivos con Tecnología Bluetooth.

(Fuente: Bluetooth.Org, 2015).

El dispositivo maestro puede establecer conexión e intercambio de datos con un solo dispositivo a la vez, por lo que para realizar dicha tarea intercambia rápidamente de esclavo pareciendo que establece conexión con todos simultáneamente. El estándar Bluetooth permite que dos piconet puedan conectarse entre sí y formar una red más amplia denominada “scatternet” la cual es comúnmente encontrada donde se utilizan dispositivos especiales tipo puente entre redes.

El establecimiento de conexión entre dos dispositivos Bluetooth sigue una serie de procedimientos complejos que llegan a garantizar un cierto grado de seguridad:

- Modo Pasivo: Dispositivos energizados esperando comunicación
- Solicitud: Búsqueda de Puntos de acceso.
- Paginación: Sincronización con los puntos de acceso.
- Descubrimiento del servicio del punto de acceso.
- Creación de un canal con el punto de acceso.
- Emparejamiento mediante el PIN (Código de Seguridad)
- Utilización de la Red.

Durante el uso normal de un dispositivo Bluetooth este se encuentra en “Modo Pasivo”, es decir que está constantemente escuchando la red, el establecimiento de la comunicación empieza con la denominada “Solicitud”, durante la cual el dispositivo maestro envía datos de solicitud a todos los dispositivos que se encuentren dentro de su rango, denominados puntos de acceso. Todos los dispositivos que reciben la información responden al maestro con su dirección.

El dispositivo maestro elige una dirección y se sincroniza con dicho dispositivo mediante una técnica denominada “Paginación”, que principalmente consiste en la sincronización de su reloj y frecuencia con el punto de acceso. De esta manera se establece el enlace con el punto de acceso que le permite al maestro ingresar a la fase de “Descubrimiento del Servicio”, mediante el Protocolo de Descubrimiento de Servicios (SDP). Cuando esta fase termina el dispositivo maestro está listo para crear un canal de comunicación con el punto de acceso utilizando el protocolo L2CAP.

Según sean las necesidades del servicio, es posible establecer un canal adicional denominado RFCOMM que funciona por el canal L2CAP para proporcionar un puerto serial virtual, de hecho muchas aplicaciones se han diseñado para que puedan conectarse de esta manera, independientemente del hardware utilizado. El punto de acceso puede incluir un mecanismo de seguridad denominado “Emparejamiento” que restringe el acceso y brinda cierto grado de seguridad en la red, el emparejamiento se realiza con una clave cifrada comúnmente conocida como PIN (Número de Identificación Personal), para esto el punto de acceso envía una solicitud de emparejamiento al dispositivo maestro y en caso de ser correcto se lleva a cabo la conexión estableciendo la comunicación libre por el canal.

CAPITULO III

INGENIERÍA BÁSICA

3.1. Análisis y Observación del Estado Actual del Sistema

Al iniciar el proyecto se observó en el Laboratorio de la Empresa la posesión de aproximadamente quince estanterías con finalidad de funcionamiento de cámaras de crecimiento, teniendo varias que cuentan con cinco secciones y otras con cuatro, las estanterías más actuales y que serán las que se produzcan a futuro tienen cuatro secciones y cuentan con un ancho mayor a las de cinco, las dimensiones de la estantería en la cual se trabajará son 180 cm de alto, 60 cm de ancho, 130 cm de largo.

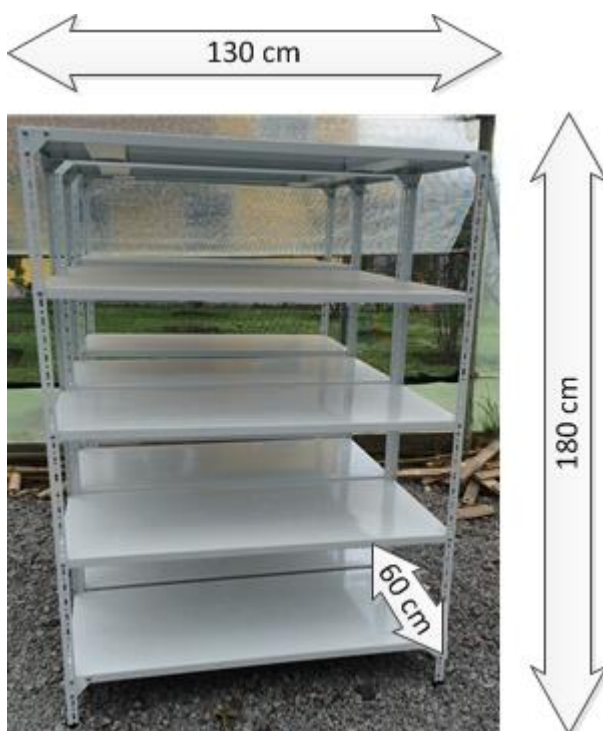


Figura 6. Dimensiones de estantería en la cual se trabajará

Cada una de estas estanterías posee un equipamiento eléctrico que consta de cuatro o dos luces fluorescentes, este número depende del tipo de especie que comúnmente se coloque, su luz es blanca pura de aproximadamente 5000K a 5500K, son lámparas tipo tubo de 1m de largo y 32 Watt cada uno, por lo que se necesita de balastos eléctricos para su encendido, los cuales están ubicados en la parte superior de la estantería, dichos balastos de igual manera varían pudiendo ser cuatro balastos de 4x32W o cuatro balastos de 2x32W dependiendo de la cantidad de lámparas instaladas, cada piso de las estanterías posee un interruptor con lo cual se enciende o apaga manualmente las luces por estantería completa.



Figura 7. Lámparas Fluorescentes Colocadas por estantería.

Debido a la utilización de este tipo de lámpara la variación de intensidad luminosa es imposible por lo que al necesitar menos cantidad de luz para ciertas especies se coloca menos tubos fluorescentes y al necesitar más lo contrario, la cantidad máxima de lámparas son cuatro, con lo cual se generan aproximadamente 3500 luxes, y se reduce gradualmente en 875 luxes por lámpara aproximadamente hasta llegar a una con la cual se midió 850 luxes aproximados, por lo que se puede establecer que cada tubo fluorescente emite alrededor de 850 a 875 luxes. Además al no contar con un sistema de control, para poder adecuar la cantidad de luz a la cual se expone las plantas, se utiliza temporizadores manuales de pared para controlar las horas de

encendido y apagado de toda la estantería, por lo que a ciertas horas por determinados tiempos las plantas recibirán luz.

Sin embargo esto no evita que al realizarse el encendido, la luz emitida por los tubos fluorescentes sea la máxima posible, siendo no siempre la cantidad adecuada para la especie, ya que la cantidad de luz que necesita puede variar dependiendo de la edad y especie de la planta, y esto supone un aumento en el índice de mortandad generado por la exposición excesiva de la luz.



Figura 8. Balastos para Encendido de Lámparas Fluorescentes.

Un problema actual que supone la utilización de este tipo de luz es el calor que generan, al estar en uso por varias horas las condiciones climáticas cambian generándose mayor temperatura y cambios en la humedad relativa, al evitar esto lograríamos un ambiente más controlable en el cual a futuro se podría implementar un control de temperatura y humedad mejorando las condiciones climáticas para la multiplicación de especies.

Cada cámara de crecimiento no tiene ningún sensor de temperatura o humedad por lo que estos datos son escritos a mano en un registro por los operarios mediante un medidor digital de estas magnitudes, estos valores significan información valiosa para el estudio y perfección de la técnica de multiplicación de las plantas, ya que permite obtener las condiciones climáticas óptimas para su crecimiento.



Figura 9. Sensor Utilizado para Tomar Datos de Forma Manual.

En el siguiente cuadro se resume el estado actual de las cámaras de crecimiento con los parámetros más relevantes.

Tabla 2.

Parámetros relevantes actuales de cámaras de crecimiento.

Nº Tubos Fluorescentes por Sección (Piso)	Intensidad Luminosa (Luxes)	Potencia Consumida (Watts)
1	850 a 875	32
2	1500 a 1700	64
3	2500 a 2600	96
4	3400 a 3600	128

3.2. Requerimientos de Funcionamiento del Sistema

Para que el nuevo sistema sea totalmente eficaz y aceptable se deben cumplir con varios requerimientos técnicos, además lo que se busca es que el proyecto posibilite la menor cantidad de costo económico posible, ya que pretende ser un proyecto reproducible a mayor escala empezando por el laboratorio de la empresa Germoplanta Cía. Ltda. Y aumentar su alcance hacia empresas y personas que se dediquen a la producción de especies vegetales a nivel nacional, por lo que este requerimiento es crítico en la elaboración de todo el proyecto.

Los requerimientos técnicos que debe cumplir este sistema de acuerdo a lo establecido con las personas de la empresa son los siguientes:

- Debe permitir el control de la intensidad luminosa en luxes, con un error máximo de $\pm 5\%$, para la confiabilidad de resultados obtenidos.
- Su tiempo de respuesta al ingresarse un valor a establecer debe ser muy rápido, de ser posible imperceptible para no perjudicar el estado de las plantas.
- Debe contar con la posibilidad de manipular la intensidad luminosa en modo manual, que será utilizando perillas ubicadas en el sistema por sección, y en modo automático ingresando el valor de luminosidad desde el software implementado en la computadora.
- Contará con sensores que le permitan la medición de temperatura en grados centígrados en un rango de 0 a 40 grados, y con una resolución en la medida de 0.1 grados.
- Contará con sensores que permitan la medición de humedad relativa porcentual en un rango de 0 a 100 %, con una resolución en la medida de 0.1% de humedad relativa.
- El sistema debe contar con dos secciones que emitan luz blanca pura similar a la utilizada con las lámparas fluorescentes, y dos secciones que emitan luz en combinación especial para cultivo y floración.
- Se debe generar un histórico de los datos de temperatura, humedad, luminosidad y la especie colocada por sección, el cual se almacenaría en una base de datos que permita posteriormente su búsqueda para realizar estudios.
- El software implementado en el computador debe contar con una interfaz gráfica de usuario amigable y fácil de utilizar, en la cual se tendrá las opciones de control y monitoreo del sistema, y búsqueda de información en la base de datos.
- El sistema debe ser capaz de estar operativo de manera continua solamente con interrupciones programadas para mantenimiento, siendo un factor crítico el de la permanencia de la luz sobre las plantas para su óptimo crecimiento.

- El sistema debe ser capaz de regular la intensidad luminosa incluso con la ausencia del computador y en caso de presentarse un corte de energía eléctrica, el sistema debe ser capaz de volver a establecer los valores anteriores al iniciar nuevamente.

3.3. Bases y Criterios para Elección de Dispositivos

El proyecto de automatización de la cámara de crecimiento requiere de un sistema confiable y eficiente al momento de trabajar, considerando a todo momento que el coste económico debe ser el mínimo posible, por lo que adicionalmente a especificaciones requeridas por los dispositivos se cuenta a todo momento este requerimiento.

Actuadores

El proyecto se requiere la construcción de las lámparas LED, ya que de esta manera se puede obtener un ahorro de alrededor del 50% con respecto a comprar luminarias LED comercialmente elaboradas. Al tratarse de tecnología nueva que en estos días se está empezando a utilizar los costos son elevados, por ejemplo un foco ahorrador de 40 Watts cuesta alrededor de 2 a 3 dólares mientras que un LED de 10 watts que es lo equivalente cuesta 8 a 10 dólares, significando de 3 a 4 veces su precio. Además hay que considerar que las luces LED comerciales no traen un sistema de regulación de intensidad luminosa, requiriendo de reguladores especiales externos que aumentan el costo y que además solo permiten su control manual.

Como para el caso del proyecto realizar la elaboración de las lámparas supone un ahorro considerable y facilita el control de luminosidad al tratarse de un diseño tratado desde inicio, esta medida es necesaria. Basado en esto se empieza por escoger los actuadores los cuales serán LED de potencia de 1 Watt con consumo de corriente de 300 mA, estos dispositivos semiconductores son capaces de otorgar una intensidad luminosa de 90 luxes (lumen/m^2). Normalmente se los coloca con pasta térmica sobre una base disipadora de calor.



Figura 10. Diodo LED de Potencia de 1 Watt.

Para distribución de la luz se colocará 60 LED en cada piso, obteniendo un total 5400 Luxes en intensidad máxima utilizando 300 mA de corriente, estos 60 LED estarán distribuidos en 4 grupos de 15 LED, siendo considerados estos 15 como una lámpara individual y con fines de distribuir mejor la carga eléctrica que estos suponen.



Figura 11. Diodos de Potencia con su Base Disipadora de Calor.

Los dos primeros pisos de la estantería estarán equipados con luces LED de color similar a las ya existentes, por lo cual será luz blanca normal de 6000K, y los dos últimos pisos de la estantería estarán equipados con una combinación especial de luces LED utilizada para cultivo de plantas, esta combinación cuenta con 70% luz Roja de 625 nm y 30% luz Azul de 465 nm (10 LED Rojos y 5 Azules), de igual manera estos LED son de 1 Watt, con la diferencia que tienen diferentes consumos de voltaje. La base para utilizar esta combinación está justificada por la razón de que la luz roja estimula el crecimiento de la planta y la luz azul provoca que la planta

conserve el agua en el follaje, información indicada en la sección de cultivo de especies vegetales con luz artificial. Con la empresa se decidió implementar esta distribución de luces, asegurando ya la técnica con luz blanca que se aplica actualmente con las dos primeras secciones y empezando a investigar la reacción de las especies con las dos últimas secciones encontrando nuevos patrones y protocolos a seguir para obtener un óptimo crecimiento de las especies vegetales. En total son 240 LED, 120 Blancos 6000K, 80 Rojos 625nm y 40 Azules 465nm.

Sensores

Para la obtención de temperatura y humedad se optó por buscar y seleccionar un sensor que sea capaz de obtener las dos medidas en un solo conjunto, así se obtiene un beneficio al reducir las entradas requeridas en el microcontrolador, y menor cantidad de cables en la estantería, además de ser capaz de tener una resolución de 0.1 °C y 0.1 % de Humedad Relativa, siendo el factor más importante de los requerimientos de esta medición.

Existen dos sensores que son capaces de obtener estas dos medidas y enviarnos una señal digital codificada en la cual se encuentra el dato de cada variable, estos son DHT-22 y BMP180, se ha escogido el sensor DHT-22 al ser un sensor que nos entrega los datos de temperatura en grados centígrados (°C) y humedad relativa en porcentaje (%), el sensor BMP180 difiere en que entrega el valor de humedad relativa en mili bares. Como las características técnicas del sensor DHT-22 son las que se acogen de mejor manera a las requeridas este es el sensor escogido para la implementación.

El sensor DHT-22 posee internamente un sensor capacitivo de poliéster para medir la humedad relativa y un termistor para medir la temperatura. Requerimos cuatro de estos sensores en total para la toma de datos en cada sección.

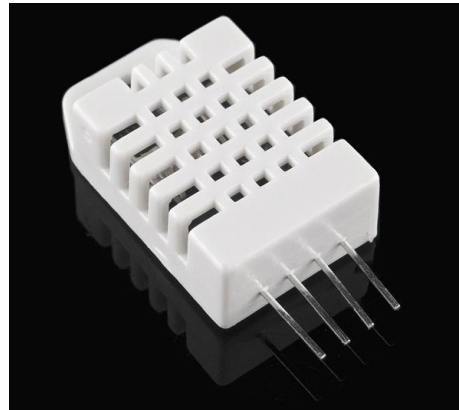


Figura 12. Sensor de Temperatura y Humedad DHT-22

Para que el sistema pueda realizar el control de la intensidad luminosa de manera fiable, es necesario utilizar sensores de luz que generen una retroalimentación, con el fin de obtener un sistema de control en lazo cerrado. Existen varios tipos de sensores de luz, muchos de ellos de tecnología ON-OFF como son los fotodiodos o fototransistores, a pesar de poder obtener valores de luz, el rango en el cual se puede trabajar es muy corto, haciéndolos poco útiles para este fin, también existen sensores instrumentados que envían información mediante comunicación I2C.

Los sensores que se utilizará para medir la intensidad luminosa, son Resistencias Dependientes de la Luz (LDR) o también conocidas como Fotorresistencias, estos sensores varían su resistencia dependiendo de la luz que incida sobre ellas, se construyen con cristales que generalmente son sulfuro de cadmio y seleniuro de cadmio. La selección de estos sensores es debida a su bajo costo, una LDR cuesta aproximadamente 50 centavos de dólar, mientras que un sensor más sofisticado llega a costar 6 a 8 dólares, y se puede obtener los mismos resultados y precisión con una LDR realizando la instrumentación y programación adecuada.

Cabe recalcar que estos sensores son inversamente proporcionales, por lo que un incremento de luz sobre ellas generará disminución en su resistencia y un decremento de luz generará un incremento en su resistencia. Gracias a que su tiempo de respuesta es de aproximadamente 100 milisegundos, se convierten en una gran

opción para realizar el control de luminosidad en lazo cerrado teniendo un tiempo ideal para realizar el muestreo de la señal mediante un microcontrolador.

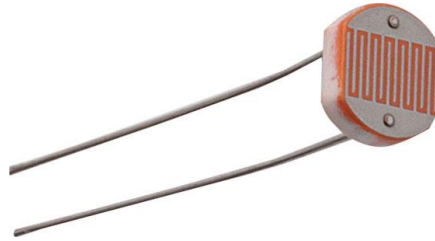


Figura 13. Resistencia Dependiente de la Luz (LDR).

Al tratarse de sensores que proporcionan una señal analógica de resistencia será necesario convertir esta señal a una magnitud que pueda ser captada por el microcontrolador e interpretada como un valor en programación. Para realizar la variación de luminosidad el elemento más económico y fácil de utilizar es el potenciómetro resistivo de tres terminales mediante este podemos obtener la variación de resistencia con respecto a la posición en la que se encuentre colocada la perilla convirtiéndolo en un medio ideal para familiarizar la variación de luminosidad con el usuario final ya que muchos dispositivos del mercado utilizan estos elementos para simbolizar una variación como es el ejemplo de los equipos de sonido y la perilla de volumen.



Figura 14. Potenciómetro para variar la Luminosidad de Forma Manual.

3.4. Especificaciones de Dispositivos

3.4.1. Microcontrolador PIC18F4550

Los microcontroladores de Microchip son los primeros en ventas a nivel mundial por sus prestaciones que permiten flexibilidad en el desarrollo de aplicaciones, entre las cuales están una gama amplia de familias que se adaptan a las necesidades, las herramientas para desarrollo de aplicaciones son comunes y las más utilizadas, las funcionalidades utilizadas se encuentran embebidas tales como módulos USART, generadores PWM, convertidores A/D, entre otros con un precio bastante competitivo y buen soporte web de la compañía Microchip.

El microcontrolador PIC18F4550 trabaja con registros de 8 bits y posee un total de 40 terminales, con una arquitectura interna Harvard que tiene buses diferentes para la comunicación con la memoria de programas y memoria de datos lo que permite la ejecución de las instrucciones mientras se lee en la memoria de programa la siguiente instrucción, también conocido como proceso pipeline. Este microcontrolador cuenta con varias características que lo hacen ideal para el desarrollo de este proyecto contando con una gran velocidad, memoria y capacidad de cálculos matemáticos.

Tabla 3.

Características Generales del Microcontrolador PIC18F4550

Característica	Descripción
Arquitectura	RISC Harvard avanzada 16 bits con 8 bits de datos
Instrucciones	77
Memoria de programa	64Kbytes y hasta 2 Mbytes en ROM
Memoria Interna	3096 bytes RAM y 1KBytes EEPROM
Frecuencia Oscilador Externo	Hasta 40MHz y multiplicada hasta 48MHz para USB 2.0
Periféricos	De comunicación avanzada (CAN y USB)
Programación	Pila de 32 niveles

3.4.2. Convertidores de Potencia BUCK

Para realizar el acoplamiento de señales de alta potencia desde el microcontrolador hacia las lámparas LED se requiere de una etapa de potencia que para el proyecto se escogió los convertidores DC-DC de potencia Buck, siendo comúnmente utilizados como drivers de lámparas LED comerciales con el fin de regular la tensión y corriente suministrada. Dado el precio reducido de estos dispositivos comerciales con referencia a la realización de los mismos se optó por comprarlos reduciendo costos y tiempo de implementación.

El proyecto requiere en total de 16 convertidores, uno para cada lámpara que tenga la capacidad de disminuir la tensión de la fuente de 12 Volts y suministrar una corriente al menos de 2 Amperios para asegurar que la carga tendrá la corriente adecuada y no exista sobrecalentamiento del dispositivo. Se compró convertidores Buck basados en el circuito integrado LM2596 de la marca China RioRand que cumplen con todos los requisitos necesarios para las lámparas y además tienen un tamaño pequeño que facilita la colocación de los mismos con el controlador.

Tabla 4.

Características del Convertidor RioRand Buck.

Característica	Descripción
Entrada	Desde 3 a 40 volts (el voltaje de entrada debe de ser al menos 1.5 volts mayor al que se quiere obtener en la salida)
Salida	Desde 1.5 a 35 volts, con una corriente máxima de 2 Amperios.
Componentes	Capacitores de estado sólido SANYO de 36 μ F y bobina de alta inductancia.
Dimensiones	45mm de largo, 20mm de ancho y 14 mm de alto
Ajuste	Regulador con potenciómetro de precisión para ajuste fino de tensión de salida, corriente auto regulada por circuito integrado

3.4.3. Sensores de Temperatura y Humedad DHT-22

La medición de temperatura y humedad relativa de cada sección es muy importante para mantener un estudio de las mejores condiciones climáticas de las especies, mediante los sensores DHT-22 se puede tomar dichas medidas cumpliendo los requisitos necesarios establecidos por la empresa, dichos sensores trabajan con una señal digital que debe ser decodificada que si bien implica una dificultad en la realización del proyecto mejora la precisión de medida, ya que al estar colocados a una distancia entre 1 y 4 metros dependiendo de la sección estos no sufren distorsiones tan drásticas como los sensores de señales analógicas de tensión, mejorando la fiabilidad que se tiene en la medida establecida.

Para el proyecto se requiere 4 de estos sensores que deben ser colocados en cada sección respectivamente, una de sus características importantes es el tiempo en el que se toma cada muestra de 2 segundos, que no afecta el rendimiento del sistema para estudio pero ralentiza el proceso iterativo del microcontrolador, por lo que a pesar de no tener un valor nuevo disponible continuamente se estará intentando captar una nueva señal del sensor con el fin de no generar paradas en el bucle de control.

Tabla 5.

Características del Sensor DHT-22

Característica	Descripción
Fuente de Alimentación	3.3 o 5 Volts
Señal de Salida	Señal digital por un canal simple bidireccional
Sensor Interno	Temperatura-Termistor Humedad-Capacitor de Polímero
Rango de Operación	Humedad 0-100 %RH Temperatura -40-80 °C
Precisión	Humedad $\pm 2\%$ RH Temperatura $\pm 0.5^\circ\text{C}$
Resolución	Humedad 0.1%RH Temperatura 0.1°C
Repetibilidad	Humedad $\pm 1\%$ RH Temperatura 0.2°C
Frecuencia de Sensamiento	0.5 Hz – 2 Segundos

3.4.4. Sensores de Luz LDR

Los sensores LDR tienen un alta sensibilidad al cambio de luz incidente lo que los convierte en sensores ideales para aplicaciones que requieran de rigurosos controles de luminosidad, sin embargo tienen muchas características que dificultan su utilización como es su no linealidad y su repetibilidad, ya que al ser tan sensibles a los cambios mínimos de luz la señal que generan tiende a volverse ruidosa requiriendo que exista un filtrado sea analógico o digital. Para este proyecto se requirió de 8 LDR que están colocados en parejas por sección con la finalidad de cubrir la luz sobre toda la superficie rectangular de la estantería.

Al no contar con una variedad específica de modelos comerciales estos sensores requieren de la toma de datos para poder obtener la curva característica de su comportamiento, inclusive si el material es el mismo son diferentes teniendo tareas adicionales que ser programadas para la obtención de la luminosidad. Para el proyecto era necesario la utilización de estos sensores debido a que son uno de los pocos que son capaces de captar un rango de frecuencias de luz tan alto en los cuales está la luz visible, ultravioleta (UV) e infrarroja (IR).

Tabla 6.

Características de Sensores LDR.

Característica	Descripción
Material Semiconductor	Seleniuro de Cadmio o Sulfuro de Cadmio
Resistencia Típica	1MΩ en la oscuridad y 100Ω con luz brillante
Espectro captado	Luz Visible 380nm a 780nm, Infrarrojo cercano de 800nm a 2500nm y Ultravioleta de onda larga 315nm a 400nm
Tiempo de respuesta típico	Aproximadamente una décima de segundo.
Aplicaciones	Medidores de Luz, cámaras, relojes con radio, alarmas de seguridad, sistemas de encendido y apagado en calles, etc.

3.4.5. Dispositivo de datos Inalámbrico Bluetooth HC-06

La comunicación inalámbrica para aplicaciones que se presten para su implementación es una tendencia actual, ya que esto mejora la comodidad que tiene el usuario al momento de utilizar alguna aplicación, dentro de estas tenemos radiofrecuencia de largo y corto alcance. Para la realización de este proyecto al encontrarse el sistema a una distancia corta desde la oficina en la cual se lo va gestionar se optó por una comunicación Bluetooth mediante la cual no necesitamos de dos dispositivos similares para el envío y recepción de datos.

El módulo HC-06 es un dispositivo utilizado comúnmente en microcontroladores para la comunicación de datos inalámbricos de manera sencilla gracias a que este dispositivo genera un servicio de puerto serial utilizando protocolo RS-232 en el computador con el cual intercambia datos, y se enlaza como un dispositivo Bluetooth común mediante el código de emparejamiento “1234” y realizando el intercambio de datos con una velocidad a 3.0 Mbits/segundo que es suficiente para cualquier tarea de control automatizado que maneje varios procesos que involucren variables inclusive con decimales de precisión.

Tabla 7.

Características del Módulo Bluetooth HC-06.

Característica	Descripción
Fuente de Alimentación	5 Volt o 3.3 Volt - 8mA
Tasa de transferencia	9600 Baudios
Código por Defecto	1234
Tecnología	Bluetooth 2.0 + EDR con 10m de alcance
Nombre Bluetooth	HC-06 o Linvor
Modo de Funcionamiento	AT sin ser emparejado o Serial RS-232 emparejado
Nivel de Aplicación	Civil
Dimensiones	28mm alto, 15mm largo y 2.35mm de ancho

3.4.6. Dispositivos Adicionales

Como dispositivos adicionales del proyecto se tiene varios como son los potenciómetros que son utilizados para realizar la variación de luminosidad del sistema en modo de operación manual, esto gracias a que la resistencia interna del dispositivo varía dependiendo de una perilla y contando con un tercer terminal de referencia para varias aplicaciones. Para fin de obtener la variación se coloca la polarización y la señal de voltaje de su terminal de referencia sin importar el valor resistivo del mismo ya que la variación siempre será en el rango de la fuente que es de 0 a 5 volts.

También se tiene elementos que funcionan como complemento del microcontrolador como son los capacitores y oscilador necesarios para generar el reloj de trabajo del dispositivo, un interruptor que realiza el cambio de modo de operación del sistema, capacitores utilizados para el filtrado de señales analógicas y de la fuente que es regulada a 5 volts por un circuito integrado LM7805.

Finalmente se utiliza transistores IRFZ44N para realizar el control del paso de la fuente a los actuadores mediante la señal PWM, estos transistores fueron seleccionados por su excelente tiempo de respuesta a conmutaciones y su resistencia de $17.5 \text{ m}\Omega$ entre los terminales de carga, convirtiéndolos en un interruptor electrónico casi ideal.

3.5. Detalle de Costos del Sistema

Se debe considerar tener el menor coste posible en la realización de todo el proyecto y esto podemos verificar mediante el costo implicado por todos los elementos, sin embargo no se ha considerado el trabajo que involucra la realización del software e ingeniería de control, tampoco la implementación física en la estantería metálica, por lo que la tabla de descripción de costos es solamente de los materiales necesarios para empezar la implementación, siendo un valor que representa aproximadamente el 50% del costo total real.

Tabla 8**Costos de Materiales para la Implementación del Sistema.**

Elementos	Precio Final [\$]
240 LEDs de potencia 1 Watt (Rojo, Azul, Blanco)	126
16 Placas de Acero 25x15x1 cm	60
16 Transistores IRFZ44N	17
Microcontroladores PIC18F4550 y PIC16F882	10
2 Placas de cobre para PCB de 25cm x 20 cm	7
Caja Acrílica para Controlador 25x35x5 cm	25
Elementos electrónicos adicionales (capacitores, resistencias, circuitos integrados, etc)	25
16 Convertidores Buck RioRand	36
Alambre AWG 18 y 22 para Conexiones (aproximadamente 40 metros)	35
Bornes, estaño y elementos para realización de PCB.	20
Sensores DHT-22, LDR y Potenciómetros	60
Total	421

La tabla describe de manera general el enfoque al cual están relacionados los elementos por lo que el valor obtenido es aproximado con una posibilidad de variar un 5% menos o incluso más de lo obtenido.

3.6. Descripción del Proceso y Filosofía de Control

El proceso realizado en este sistema consiste en realizar un control de luminosidad independiente de cada sección, por lo cual se puede considerar que se realizan 4 procesos similares. Sin embargo como proceso general que se realiza entre software y hardware no solamente es el control de la luminosidad sino un constante monitoreo de las variables del sistema que son temperatura, humedad, luminosidad y

modo de operación, y almacenando estos datos y adicionales cada media hora para generar un historial de estudios.

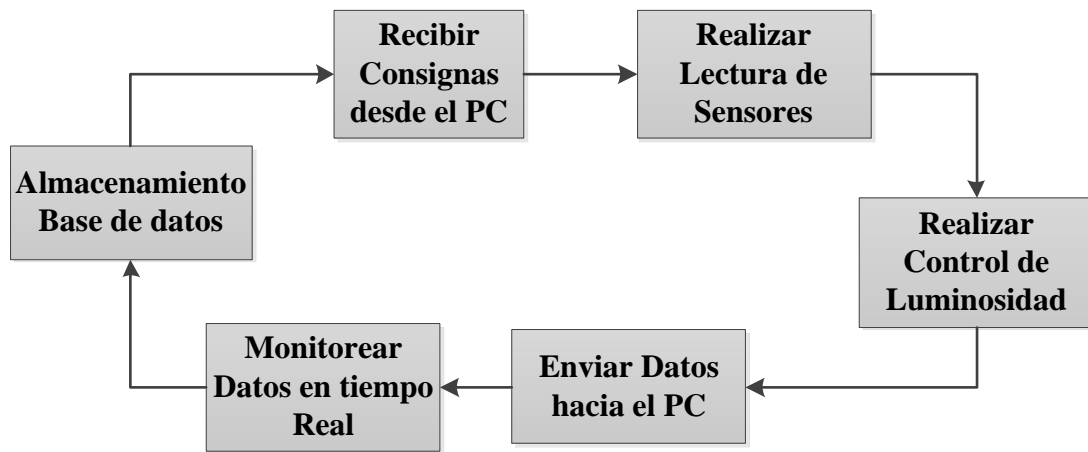


Figura 15. Procesos Entre Hardware y Software del sistema.

Los procesos como parte de un conjunto de hardware y software del sistema son importantes para complementar el funcionamiento general del proyecto, sin embargo no todos estos procesos afectan a la filosofía de control del sistema, ya que este no depende de todos los procesos en conjunto. Sin embargo desde un enfoque general el sistema tiene varias subprocesos para representar el proceso en general, estos son:

- *Recibir Consignas desde el PC*, ya que la interfaz gráfica de usuario implementada en el computador es el terminal de trabajo final, desde él se tiene que establecer las consignas con las que debe trabajar el sistema de control, sin embargo este proceso no es repetitivo y solo se realiza una vez cuando el usuario hace uso del software para este fin.
- *Realizar Lectura de los Sensores*, este proceso tiene que ser realizado por el microcontrolador de forma continua en cada bucle, ya que el proceso de control y monitoreo depende de ello.
- *Realizar Control de Luminosidad*, inclusive si no se recibe consigna de luminosidad desde el PC, este proceso se realiza en cada bucle del microcontrolador ya que el valor establecido se mantiene en memoria y no debe producirse variaciones en la salida establecida.

- *Enviar Datos hacia el PC*, para fin de tener un monitoreo en tiempo real en la interfaz gráfica del software de computador el microcontrolador debe realizar el envío de los datos de sus sensores y estado a todo momento al computador.
- *Monitorear en Tiempo real*, Esta tarea es realizada por parte del usuario mediante el software del computador, este tiene la finalidad de crear al usuario una representación del estado de las variables del sistema y las consignas que puede establecer.
- *Almacenamiento de Base de Datos*, esta tarea es realizada enteramente por el software del computador, la cual establece la comunicación con la base de datos MySQL y cada media hora almacena la información del sistema.

La mayoría de tareas del sistema en conjunto son realizadas por el microcontrolador, siendo este parte muy importante del proceso general y el cual desarrolla las tareas de control automatizado, por lo que tiene que seguir una filosofía de control que cumpla los requerimientos establecidos. La principal característica que debe tener el sistema es la exactitud por lo que la filosofía debe enfocarse hacia este punto descartando la posibilidad de realizarse un proceso de control que estime las magnitudes necesarias para obtener las consignas establecidas basándose en patrones o referencias de salidas ya que la exactitud alcanzada no es la óptima.

Para lograr alcanzar los requerimientos de control establecidos se debe considerar una filosofía de control que considere los valores anteriores del sistema y la medición de los sensores actual, por lo que se debe tener una realimentación generando un control de lazo cerrado. En la teoría de control existe una variedad de controladores que reúnen características en las cuales se establece el enfoque que logran, los más utilizados para procesos industriales son el Proporcional, Proporcional-Integral y Proporcional-Integral-Derivativo de los cuales el más indicado para trabajar con este sistema es el Proporcional-Integral.

El controlador proporcional basa su filosofía de control en el error que se produce entre consigna y valor medido y aplicar un valor que compense la salida pero no

obtiene un valor final igual al de la consigna. El controlador Proporcional-Integral se apoya de la integración para aplicar la acción proporcional en tiempo pero contemplando los valores anteriores del error y la salida para llegar a alcanzar el valor de la consigna. Finalmente el controlador Proporcional-Integral-Derivativo no es aplicable debido a que la rapidez del sistema podría ser considerada como una señal ruidosa por sus cambios abruptos, al aplicar la derivada de una curva con una pendiente muy acentuada este resultado tiende al infinito, generando en la practica la aplicación de una acción de control muy brusca inestable oscilante que no se estabiliza.

Utilizando el controlador Proporcional-Integral la filosofía de control está orientada a obtener el menor error en el valor final alcanzado por el controlador, de ser posible que no exista cumpliendo la expectativa principal para el funcionamiento del sistema. El controlador aprovecha la acción integral para realizar el cálculo de la salida que reduzca lo mínimo del error sin embargo no existen controladores integrales que trabajan solos, siempre se requiere de la acción proporcional que es la que primeramente actúa y después se añade la acción integral en un periodo corto de tiempo. La respuesta que nos brinda este controlador es la sumatoria de respuestas anteriores debidas a la acción proporcional que trabaja de manera instantánea a la detección de un error y con el tiempo de retardo mencionado de la acción integral que es el que se encarga de reducir totalmente el error del estado estacionario del sistema.

CAPITULO IV

INGENIERÍA DE DETALLE

4.1. Diseño e Implementación de Hardware

4.1.1. Sistema de Iluminación LED

Debido a que los LED utilizados trabajan con tensiones bajas, se optó por trabajar con una variación de la configuración paralela de lámparas LED, contando con ramificaciones paralelas en las cuales hay elementos interconectados en serie, obteniendo de esta manera una diferencia de tensión baja entre el sistema y los actuadores, facilitando el posterior diseño de la etapa de acoplamiento de potencia en tensión, y siendo principal tema de interés la corriente que se necesita para cada lámpara, ya que cada LED tiene un consumo máximo de 350 mA.

Tabla 9.

Datos a considerar en el diseño de Lámparas LED

Color	Voltaje (Volt)	Corriente (mA)	Flujo Luminoso a 350mA
Blanco	3.3	305	90 Lumen
Rojo	2.6	350	50 Lumen
Azul	3.5	300	20 Lumen

Al contar con una fuente de alimentación eléctrica principal de 12 Volts de tensión regulada, se utilizará una configuración de tres diodos LED en serie por rama del circuito paralelo total de cada lámpara, obteniendo de esta manera una tensión menor cercana a la de la fuente y que tampoco supere lo que puede suministrar, evitando

pérdida de potencia. Todas las lámparas sean de color blanco o de combinación de color para cultivo tendrán esta configuración de manera que la implementación práctica de las lámparas sea uniforme en su totalidad. El circuito de la lámpara facilita su implementación, revisión y reparación porque permite la localización rápida de posibles daños o deterioro a futuro que se pueda presentar en los diodos LED, ya que gracias a su configuración en paralelo, los inconvenientes se presentan en grupos de tres LED conectados en serie y no en toda la lámpara.

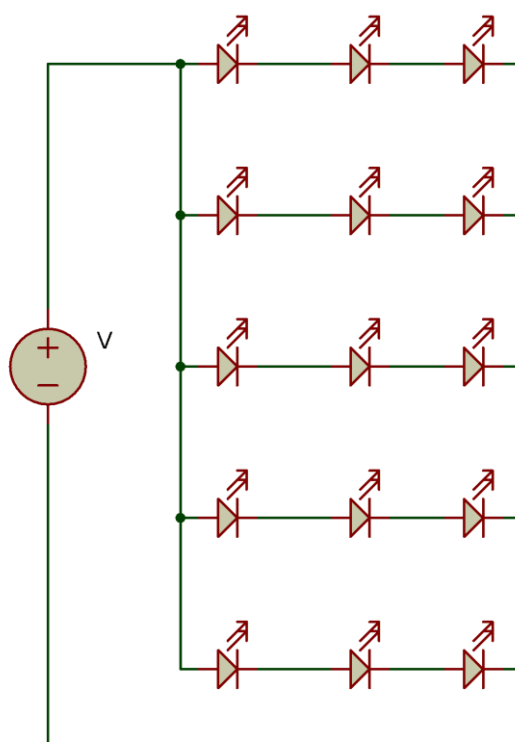


Figura 16. Circuito en Configuración Mixta de Lámparas LED

En total se cuenta con 16 lámparas LED, cada una tiene 15 diodos LED que están interconectados en 5 ramas paralelas en las cuales hay 3 LEDs en serie, obteniendo como tensión de cada lámpara la sumatoria de tensiones que cae sobre cada LED y corriente total de consumo la suma de corrientes que consume cada rama. Cada sección de la estantería tendrá cuatro lámparas ubicadas de manera que se pueda distribuir de mejor manera el flujo luminoso.

Para la implementación práctica de las lámparas, se utilizó 16 placas de acero rectangulares de 25 cm de largo, 15 cm de alto y 0.1 cm de espesor, siendo la base en la cual se realizará el interconectado, dentro de las cuales se realizará la distribución de los LED no simétrica, es decir que se aprovecha más el espacio central, dejando la menor cantidad de espacio posible en los bordes de la placa de acero.

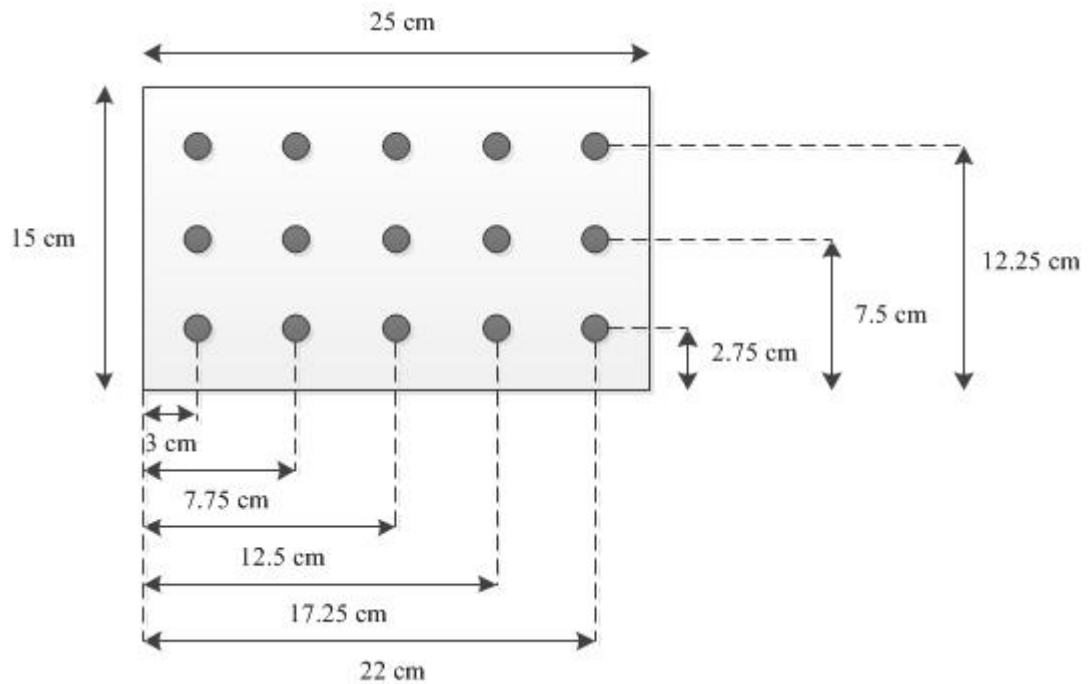


Figura 17. Planificación de Distribución de LEDs en placa de Acero.

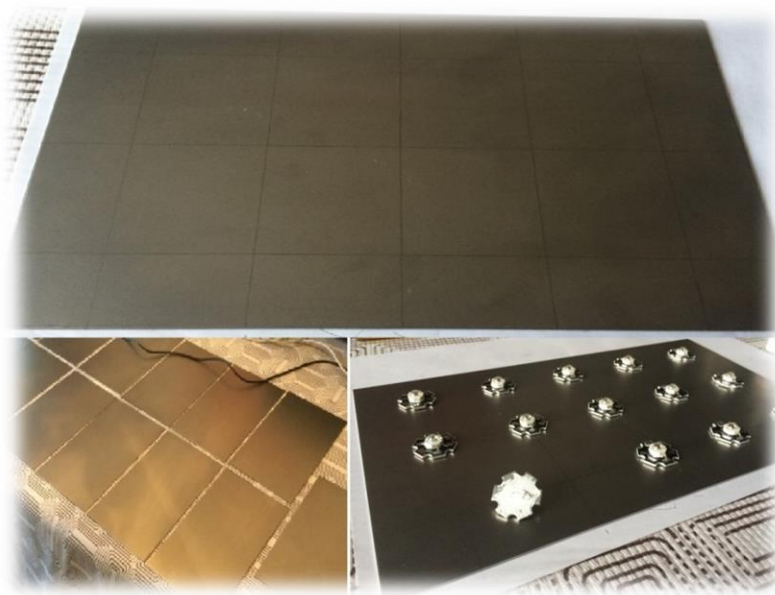


Figura 18. Distribución de LEDs en Placa de Acero.

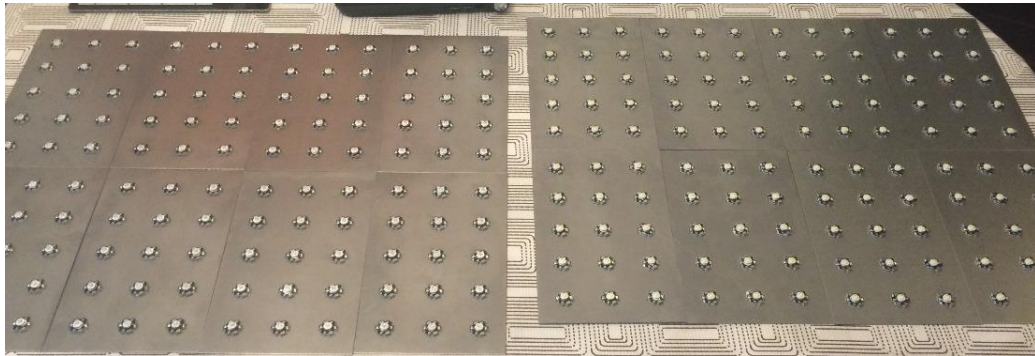


Figura 19. Placas de Acero con LEDs distribuidos.

Con la distribución completada, se procedió a realizar el cableado de cada lámpara, para que el aspecto estético sea el mejor posible se realizó perforaciones cercanas a las bases de los LED para poder atravesar los cables por la parte posterior de la placa de acero, y haciendo un empalme de todos los alambres que van conectados hacia la fuente, y de igual manera para cables que van a tierra de la fuente.

Para escoger el alambre adecuado que se debe colocar, se realizó una estimación de corriente y tensión que atravesará cada ramificación y lámpara completa, en la cual de acuerdo a la hoja de datos de los LED el consumo máximo de corriente es 350 mA, como tres de ellos están conectados en serie se asume que la corriente de cada ramificación es la misma que la de cada LED, y la corriente total de la lámpara corresponde a su sumatoria, obteniendo así un total de 1.75 amperios máximos a través de la lámpara, y una tensión diferente dependiendo de los colores utilizados. Con estos valores de corriente se procedió a escoger los calibres de alambre adecuados para el paso de corriente; para cada ramificación al requerirse de 350 mA se utilizó alambre flexible AWG 22 que soporta hasta un máximo de 1 Amperio y con un diámetro de 0.64 mm que encaja adecuadamente en el agujero y permite su soldado fácil a la base disipadora del LED; y para la sección en la cual se empalman todas las ramificaciones hacia la fuente y hacia tierra se ha colocado alambre flexible AWG calibre 18 con un soporte de corriente máxima de 2.5 Amperios y diámetro 1.024 mm que ira colocado hacia una bornera de 3.5 Amperios para el conexionado de la lámpara.

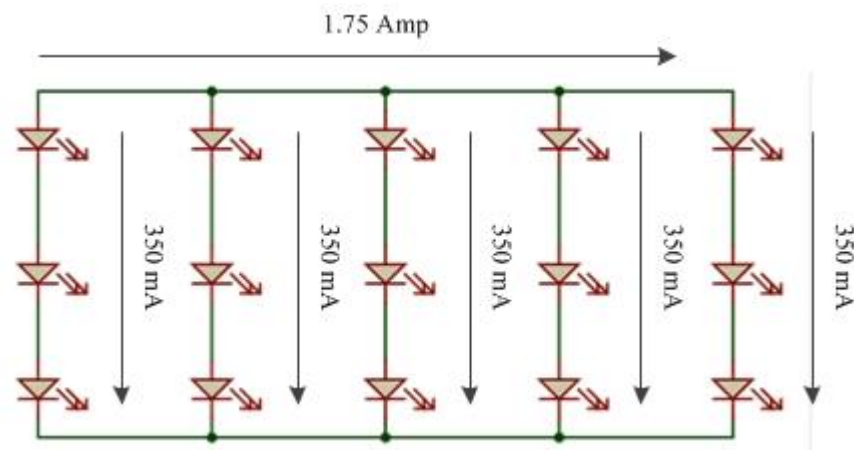


Figura 20. Distribución de corriente a través de lámpara LED.

Adicionalmente a la corriente que consume cada lámpara LED se debe considerar la tensión total requerida para su funcionamiento eficiente, esto logramos realizando la sumatoria de tensiones que debe tener cada diodo de una ramificación, siendo el mismo consumo para las demás ramificaciones en paralelo. Para el caso de lámparas blancas son tres LED en serie del mismo tipo que consume 3.3 voltios, y para el caso de combinación de colores para cultivo se escogió una proporción de 70% para luces Rojas y 30% para luces Azules, con lo cual obtenemos una distribución diferente a la de las lámparas blancas.

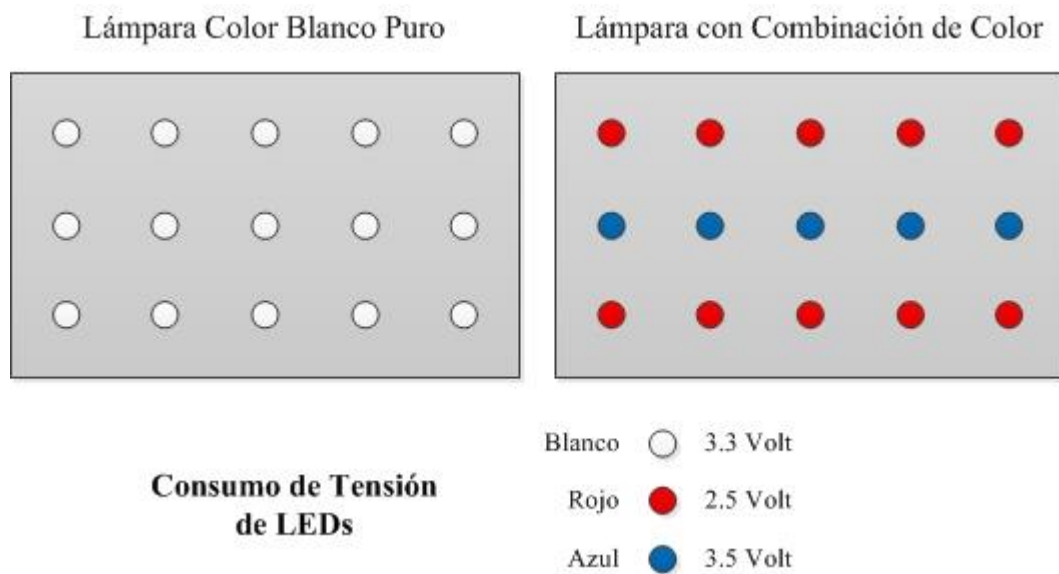


Figura 21. Consumo de Tensión de LEDs en ambos tipos de lámpara.

El cálculo de la tensión final de utilización por cada una de las lámparas nos facilita el diseño de la interfaz de potencia, ya que esta va a diferir respecto a los dos tipos de lámparas utilizados.

Tabla 10.

Cálculo de Consumo de Tensión de cada Lámpara

Tipo de Lámpara	LEDs Rojos	LEDs Azules	LEDs Blancos	Tensión Total (Voltios)
Blanca Pura	0	0	3	9.9
Combinación de Cultivo	2	1	0	8.5

Una vez realizados los cálculos correspondientes para la instalación en la estantería se colocó rieles de aluminio que sirvan de soporte para las lámparas, en las cuales se colocaron de forma secuencial que es suficiente para la distribución eficiente del flujo luminoso sobre la superficie rectangular de 60cm por 130cm. Al considerar que cada LED tiene un ángulo de apertura de la luz de 140 grados y con la posterior medición de la luz incidente sobre varios puntos al borde de la sección con la intensidad máxima de iluminación de las 4 lámparas por sección en conjunto, se obtiene pérdida mínima que puede ser omitida y además que con esta colocación se mejora la estética del sistema y se facilita el cableado de las lámparas hacia el sistema de control.

Para la interconexión de cada lámpara hacia el sistema de control se utilizó alambre gemelo AWG calibre 18, el cual cumple con los requisitos necesarios para transportar la energía eléctrica de dichas lámparas. Cabe mencionar que la colocación de las lámparas a través de la riel genera unos pequeños espacios entre lámpara de aproximadamente 1 cm, que no generan ineficiencia al momento de exposición de la luz sobre la superficie por lo que no representan un inconveniente para su funcionamiento.



Figura 22. Colocación de Rieles Para Lámparas LED.



Figura 23. Ubicación de Lámparas LED sobre la Riel.

Para que las lámparas se mantengan firmes con las rieles y el sistema de crecimiento pueda ser cambiado de ubicación fácilmente se aplicó silicona y se realizaron pruebas de movilidad, resistiendo la movilidad de acuerdo a lo esperado, cada riel tiene una longitud de 105 cm, y la separación que se estableció entre ellas es de 16 cm, teniendo un espacio de 0.5 cm en los bordes de cada lámpara, para que la riel no llegue a rozar e interferir con la lámpara LED.

4.1.2. Instrumentación de Sensores LDR

Las Resistencias Dependientes de la Luz son sensores que nos permiten medir la luminosidad con una precisión significativa, lo que las hace aptas para este proyecto; a pesar de ello la relación que tienen de resistencia con respecto a la luminosidad es no lineal e inversamente proporcional, implicando la obtención de una ecuación adecuada mediante métodos numéricos de interpolación. Debido a que el microcontrolador utilizado puede procesar señales de entrada de tensión sean digitales o analógicas, la magnitud proporcionada por la LDR no puede ser captada.

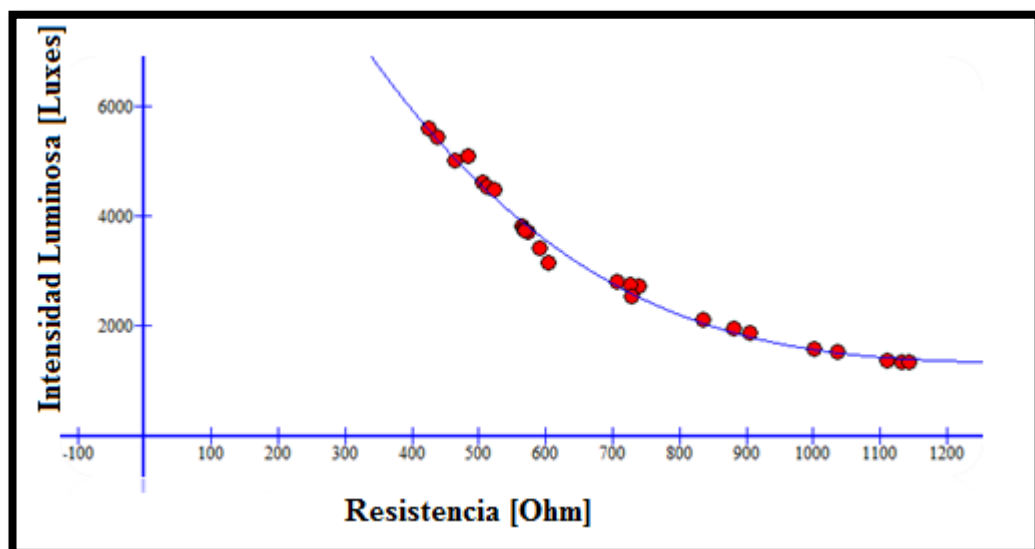


Figura 24. Datos de Sensor LDR1 – Luminosidad vs Resistencia.

Para que la magnitud de resistencia obtenida por el sensor pueda ser interpretado por el microcontrolador se realiza una instrumentación sencilla utilizando un divisor de tensión mediante la cual se obtiene un valor de tensión basado en la resistencia eléctrica de la LDR. Se utilizó esta técnica de transformación de magnitudes debido a que la fuente de alimentación es de 12 volts y esta no permite la utilización de amplificadores operacionales por la ausencia de una polarización negativa, y la inclusión de una fuente para polarización negativa supone un costo adicional; también la LDR es bastante sensible a cambios de luz por lo que se generan cambios mínimos continuos en la medición con lo que debe ser añadido un filtro a señales ruidosas analógicas en caso de utilizarse un amplificador.

Al utilizar el divisor de tensión obtenemos dos características significativas que nos facilitan la medición de la luminosidad, estas son:

- Es posible añadir un filtro contra señales ruidosas digital, es decir mediante un algoritmo implementado en el microcontrolador.
- La fórmula del divisor de tensión involucra dos resistencias mediante la cual podemos revertir la relación proporcional de la LDR, obteniendo así una relación directamente proporcional de voltaje y luminosidad.

El sistema de control trabaja con un microcontrolador por lo que es necesaria la regulación de una tensión de 5 volts, para esto se utiliza un circuito integrado regulador de tensión LM7805 que es capaz de proveer hasta una corriente máxima de salida de 1 amperio, siendo suficiente para todos los sensores a utilizar y la tensión propia de la fuente de 12 volts será utilizada solamente para las lámparas LED, entonces el divisor de tensión para los sensores LDR será alimentado con 5 volts de tensión con una resistencia de 1000 Ohm en la salida de tensión y la LDR conectada directamente hacia la fuente, es decir el orden de la serie es primeramente la LDR y seguido la resistencia fija de 1000 Ohm.

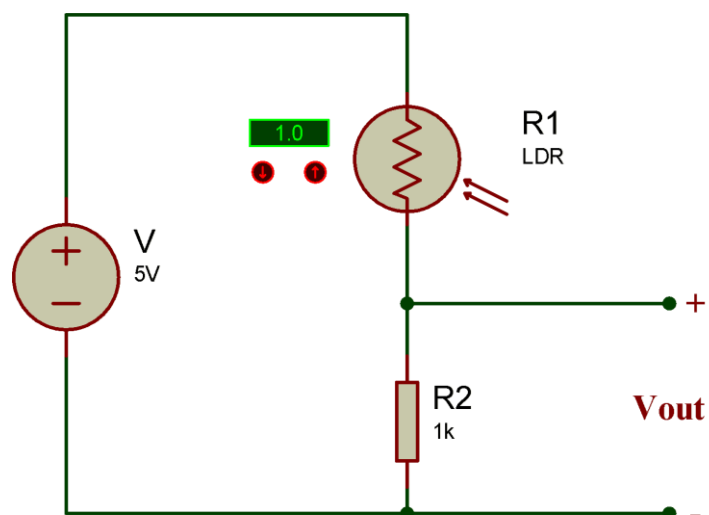


Figura 25. Circuito de Instrumentación Utilizado Para Sensores LDR.

Del circuito anterior se toma la señal existente entre el sensor y la resistencia fija, obteniendo una señal de tensión que varía en base al valor de resistencia eléctrica de la LDR de la siguiente manera:

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} * V_{in}$$

Ecuación 1. Tensión de Salida de Un Divisor de Tensión.

Siendo en la fórmula del divisor de tensión la resistencia R2 la resistencia fija de 1000 Ohm y R1 el valor de la resistencia de la LDR, y generarse variación en ella tendremos las siguientes consideraciones:

$$\lim_{R_1 \rightarrow 0} \frac{R_2}{R_1 + R_2} * V_{in} = V_{in} = 5 \text{ volt} \quad \text{y} \quad \lim_{R_1 \rightarrow \infty} \frac{R_2}{R_1 + R_2} * V_{in} = 0 \text{ volt}$$

Ecuación 2. Divisor de Tensión con Variación de LDR.

Cuando el valor de la resistencia de la LDR tiende a disminuir hasta cero debido a que la intensidad luminosa es muy grande el valor obtenido será el de la fuente es de decir 5 volts, mientras que si la resistencia de la LDR tiende a aumentar masivamente debido a la ausencia de luz el valor de la señal de voltaje disminuirá hasta 0 volts, obteniendo de esta manera una inversión en la relación de resistencia vs luminosidad de la LDR en voltaje vs luminosidad directamente proporcionales, lo cual facilita el trabajo de cálculos y lógica del sistema de control.

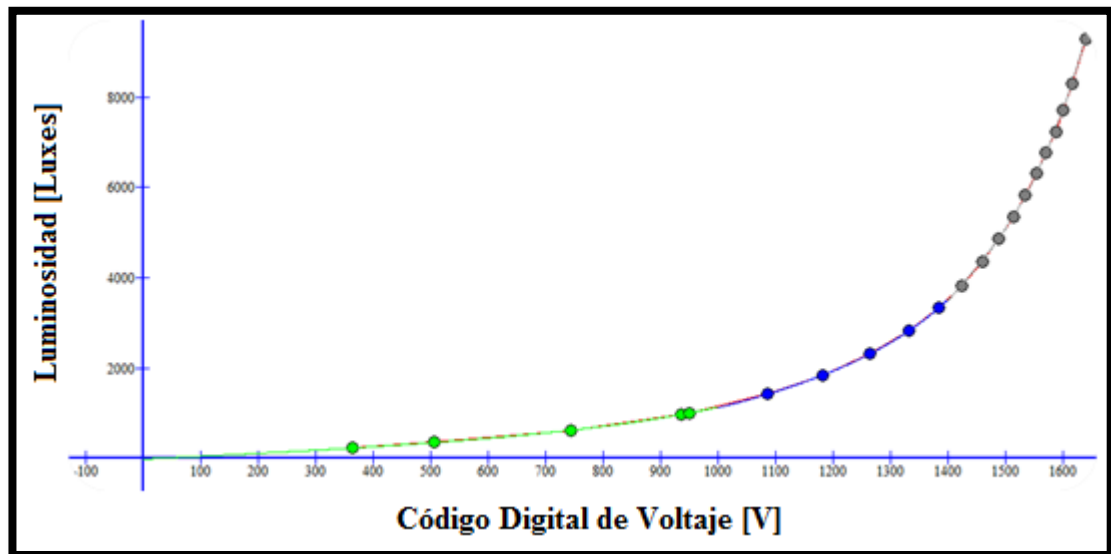


Figura 26. Voltaje vs Luminosidad de Sección 1 del Sistema.

A pesar de que el divisor de tensión ayuda a que se trabaje con una relación directamente proporcional, la no linealidad de este sensor no se descarta, la curva característica que relaciona voltaje con luminosidad en lux tiene una forma logarítmica que tiene que ser aproximada mediante una ecuación que permita la obtención de la luminosidad. Un punto negativo de estos sensores es que su sensibilidad y escala varía entre diversos dispositivos por lo que es necesario realizar la toma de datos para las ocho LDR instrumentadas que se van a utilizar en el proyecto, cada una tendrá diferentes ecuaciones y características, a pesar de no diferir por valores altos para obtener la mejor precisión en esta aplicación es necesaria una ecuación diferente por sección.

4.1.3. Decodificación de Temperatura y Humedad del Sensor DHT-22

El sensor DHT-22 tiene capacidad de medir la temperatura y humedad relativa del ambiente con prestaciones convenientes para el proyecto constanding además de que nos proporciona en una señal digital toda la información, considerando que se utilizan 8 sensores LDR para la medición de luminosidad en el sistema y cuatro potenciómetros para el modo local manual, se ocupan en total 12 entradas analógicas en el microcontrolador, lo cual es su capacidad máxima de entradas analógicas,

requiriendo de esta manera que la información de temperatura y humedad ingrese vía digital evitando reducir los sensores de luz.

La dificultad en utilizar este sensor DHT-22 se da porque al utilizar un solo terminal para enviar la información, primeramente este requiere de una resistencia Pull Up que evite problemas de tensión por la comunicación bidireccional de datos por el mismo canal y la decodificación de un protocolo propio de datos del sensor que consiste en una trama generada entre ambos dispositivos con tiempos establecidos por el fabricante, requiriendo que se implemente un algoritmo para dicha decodificación.

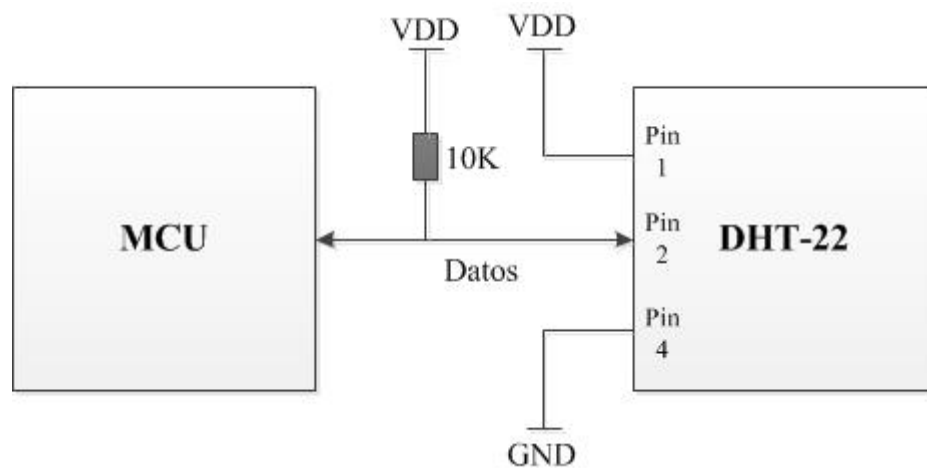


Figura 27. Diagrama de Conexión entre Sensor DHT-22 y Microcontrolador.

La trama de datos es proporcionada por el fabricante en su hoja de datos, y en ella se considera varias características importantes al momento de desarrollar el algoritmo para decodificación de información, entre estas están los tiempos que tardan los datos en realizar cambios y los valores que deben ser enviados por el sensor y microcontrolador.

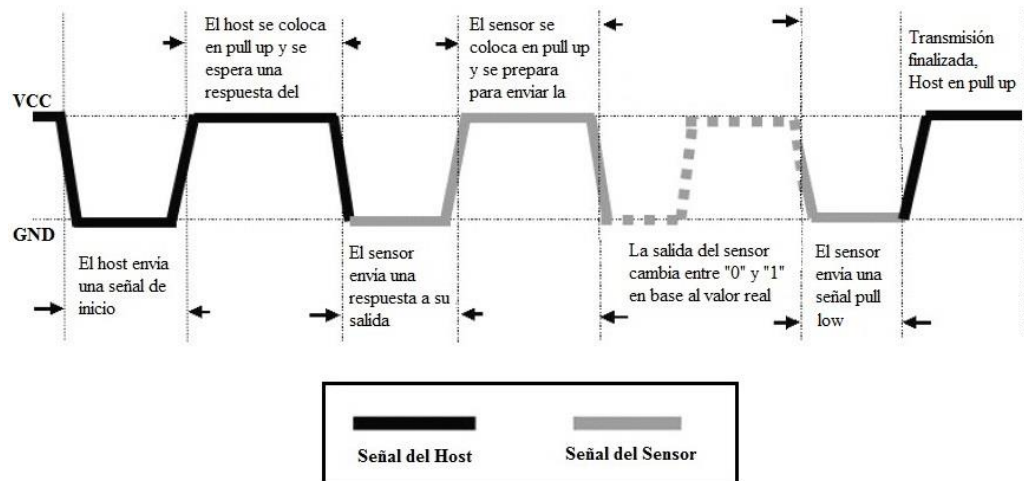


Figura 28. Trama de datos General del Sensor DHT-22.

La característica principal de la trama es que consta de 44 bits totales generados en la comunicación bidireccional, de los cuales los 4 primeros bits son procedimientos muy importantes a seguir para iniciar la transmisión de datos, los 32 siguientes corresponden a los datos de sensores internos de temperatura y humedad y los 8 últimos corresponden a una verificación de suma de los anteriores para validar la respuesta obtenida, los procedimientos a seguir para la lectura de datos del sensor son los siguientes:

- 1) Inicialmente el terminal de datos se encuentra en alto (pull up) indicando que el terminal esta libre, el microcontrolador tiene que llevar esta señal a bajo (pull low) y mantener esta señal durante al menos 1 milisegundo.
- 2) El microcontrolador realiza un envió en alto (pull up) en el terminal de datos indicando el inicio de la comunicación y espera de una respuesta del sensor que debe tardar aproximadamente entre 22 y 40 microsegundos.
- 3) El sensor al detectar la señal de inicio enviará una señal en bajo (pull low) sobre el terminal de datos durante 80 microsegundos indicando que la comunicación ha sido iniciada.
- 4) El sensor enviará una señal en alto (pull up) sobre el terminal de datos durante 80 microsegundos preparando el envió de los datos medidos internamente.

- 5) El sensor enviará una cadena de 40 bits que contienen la información de los sensores internos, antes del envío de cada bit se tiene una señal en bajo (pull low) de 50 microsegundos y después se envía una señal en alto (pull up) correspondiente al bit de datos la cual se interpreta como un "0" si la señal en dura entre 26 y 28 microsegundos y como un "1" si dura 70 microsegundos.

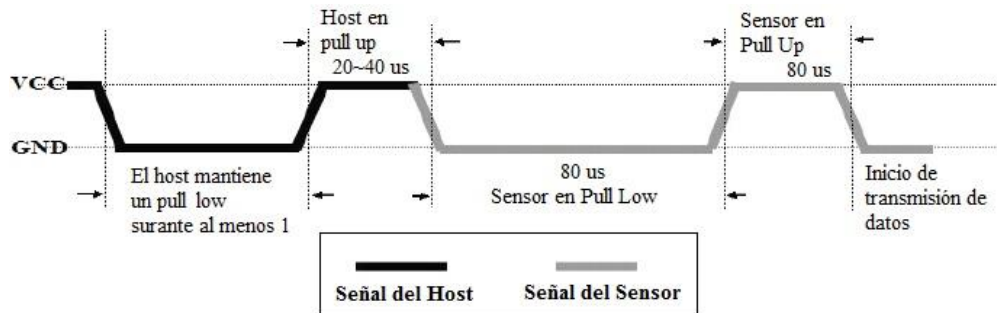


Figura 29. Tiempos de inicialización del sensor DHT-22.

El proceso puede ser repetido dentro de 2 segundos correspondientes al muestreo de 0.5 Hertz proporcionados por el fabricante del sensor, durante ese intervalo en caso de aplicarse el procedimiento nuevamente no se obtendrá una respuesta por parte del sensor, por lo que se tiene que tener en consideración este tiempo en el microcontrolador, ya que de hacerlo repetidamente este entraría en espera de la señal del sensor perdiendo 2 segundos de procesamiento.

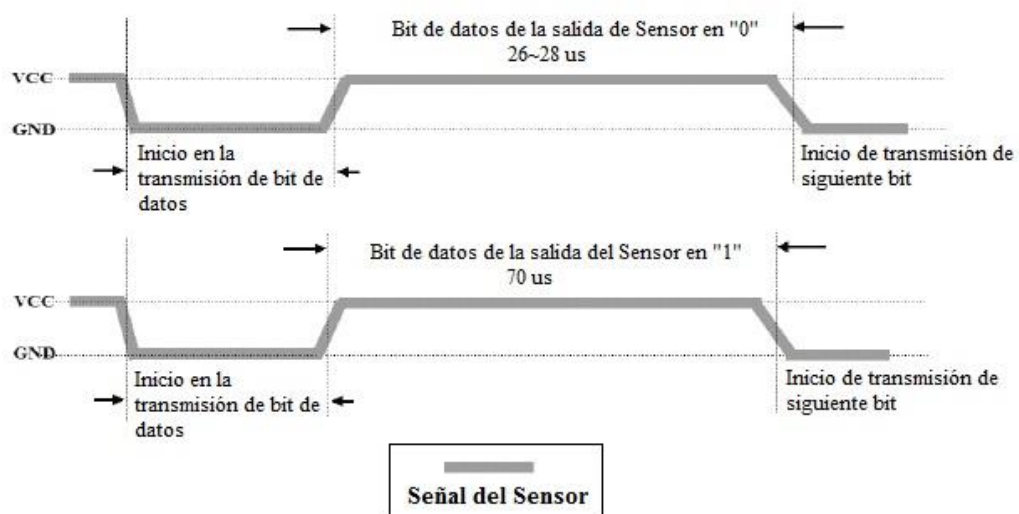


Figura 30. Interpretación de bits enviados por sensor DHT-22.

Los últimos 40 bits que son recibidos contienen la información de temperatura y humedad, y también de verificación de error implementada en el sensor mediante la cual se puede validar que las mediciones del sensor sean las correctas, de esta parte de la trama se debe separar los 16 primeros bits que corresponden al valor medido de humedad relativa, los 16 siguientes bits corresponden al valor medido de la temperatura y los últimos 8 bits son la suma de los 32 bits anteriores que sirve como verificación de error. El primer par de 16 bits correspondientes a temperatura y humedad deben ser transformados de manera que los 8 bits más significativos corresponden al valor entero de la magnitud y los 8 bits menos significativos representan la parte decimal de la medición.

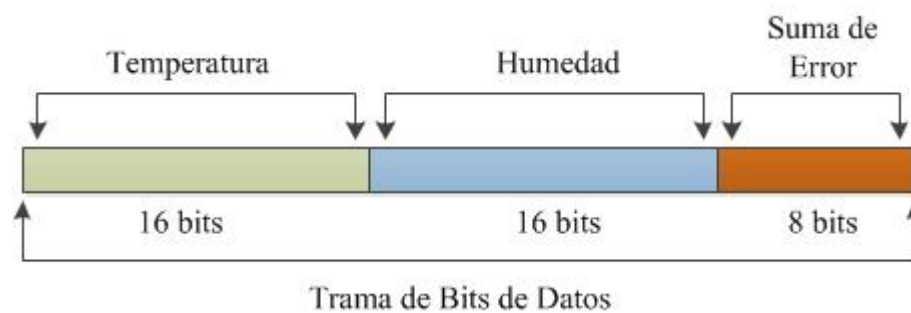


Figura 31. Distribución de Información en Trama de Datos DHT-22.

La manera más sencilla de realizar esta distinción es dividiendo los datos obtenidos del grupo de 16 bits para 10, con lo cual se obtiene el valor sea de temperatura y humedad, y para obtener el la verificación de la suma se realiza la suma de los 32 bits en grupos de 8, los 16 bits que corresponden a temperatura y humedad los dividimos en dos grupos cada uno, obteniendo en total 4 grupos de 8 bits a ser sumados, debido a esta verificación y considerando su importancia para la validación de que los datos sean correctos es recomendable realizar la captura de datos del sensor en grupos de 8 bits desde que se inicia la transmisión.

Como un posible dato que pueda enviar el sensor se considera el siguiente a manera de ejemplo:

- Si el dato de 40 bits que envía el sensor es:

$$\frac{0000\ 0010\ 1000\ 1100}{16\ \text{Bits Humedad Relativa}} \quad \frac{0000\ 0001\ 0101\ 1111}{16\ \text{Bits Temperatura}} \quad \frac{1110\ 1110}{\text{Suma de Verificación}}$$

- Para realizar la conversión de los de 16 bits de la humedad relativa y temperatura de sistema binario a decimal realizamos lo siguiente:

$$\frac{0000\ 0010\ 1000\ 1100}{\text{Sistema Binario}} \rightarrow \frac{652}{\text{Sistema Decimal}}$$

$$\mathbf{RH} = \frac{652}{10} = 65.2\ \% \text{ RH}$$

$$\frac{0000\ 0001\ 0101\ 1111}{\text{Sistema Binario}} \rightarrow \frac{351}{\text{Sistema Decimal}}$$

$$\mathbf{T} = \frac{351}{10} = 35.1\ ^\circ\text{C}$$

- De darse el caso que el primer bit del dato de temperatura medida es “1”, significa que la temperatura esta debajo de 0 grados centígrados, como por ejemplo:

$$\frac{1000\ 0000\ 0110\ 0101}{16\ \text{bits Datos Temp}} = -10.1^\circ\text{C}$$

- Y finalmente para verificar la validez de los datos obtenidos realizamos la suma de verificación en grupos de 8 bits con lo que comprobamos la correcta toma de datos del sensor.

$$0000\ 0010 + 1000\ 1100 + 0000\ 0001 + 0101\ 1111 = \frac{1110\ 1110}{\text{Verificación de Suma}}$$

El microcontrolador utilizado es capaz de realizar la decodificación ya que cuenta con la capacidad de realizar retardos en milisegundos y microsegundos y cambiar el sentido de datos de sus terminales digitales para realizar lectura o envío de datos en una misma aplicación, el tiempo que tarda en realizar este cambio no significa inconvenientes para la lectura del sensor ya que se realiza en el orden de los nanosegundos, por lo que la implementación del algoritmo no está afectada por las condiciones de hardware del microcontrolador.

4.1.4. Sistema Electrónico de Control

El sistema de control esta comandado por un microcontrolador PIC18F4550 con las prestaciones necesarias para realizar un ciclo de control en lazo cerrado del sistema, al tener como variable principal a controlar la intensidad luminosa de las lámparas LED se tiene que analizar las magnitudes y escalas mediante las cuales se obtiene la medición de la intensidad luminosa y con la que se genera y controla en los actuadores.

Los sensores LDR al estar instrumentados mediante un circuito divisor de tensión, nos proporcionan voltajes de salida variable de 0 a 5 volts, mismos que serán tratados mediante un conversor de señales analógicas a digitales de 10 bits interno del microcontrolador, por lo que esta magnitud estará en una escala de 0 a 1023. Debido a la no linealidad de los sensores y las complejas ecuaciones resultantes tras realizar el proceso de interpolación, las transformaciones de intensidad a luxes se realizan en el software del computador, significando que el microcontrolador trabajará con las unidades básicas en conversor para el sistema de control. Cada sección de la estantería consta con dos sensores LDR para garantizar la lectura de la luz sobre toda la superficie.

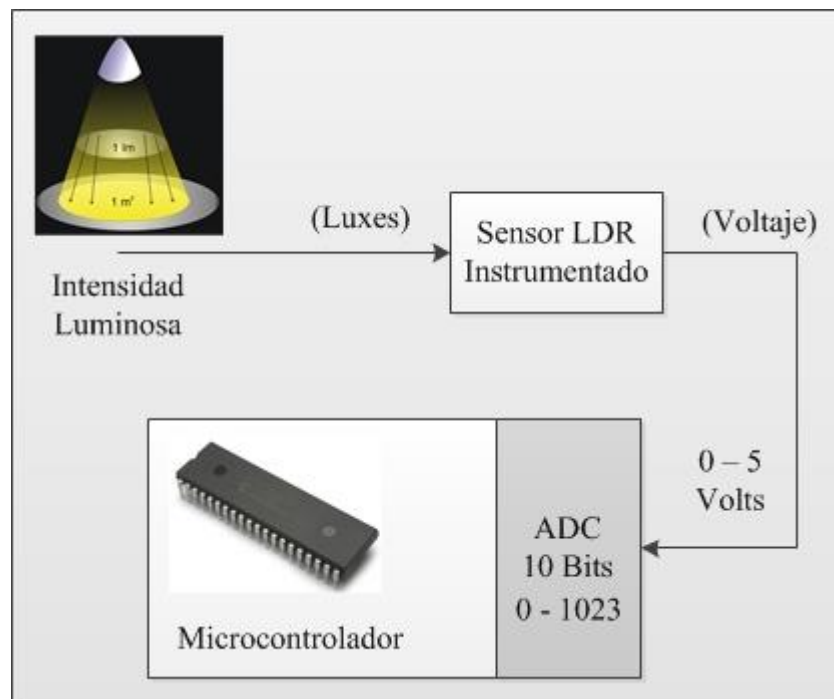


Figura 32. Magnitudes y Escalas a trabajar para sensores LDR.

Para poder controlar los actuadores, se utilizan las salidas del microcontrolador que puedan generar señales digitales con modulación de ancho de pulso (PWM), al tener como actuadores diodos LED es necesaria la utilización de este tipo de señal para que los LED puedan variar su intensidad de luz linealmente aumentando o disminuyendo el ciclo de trabajo de la señal generada.

Los diodos LED son dispositivos semiconductores que poseen una curva característica de corriente vs tensión en la que tiene que superarse un voltaje umbral para poder funcionar, a partir de este punto la variación de intensidad de la luz del LED no es lineal con respecto al incremento y decremento de la tensión, siendo esta la razón para utilizar un método con PWM mediante la cual el nivel de tensión es fijo y se varia su ciclo de trabajo en una frecuencia determinada lo cual genera una variación lineal de la luz.

El microcontrolador PIC18F4550 posee dos módulos CCP (Captura, Comparación y PWM) mediante los cuales se pueden generar hasta dos salidas PWM con un rango de frecuencias muy amplio dependiente de la frecuencia del oscilador utilizado, debido a que se tienen 4 secciones en total, se añadió un segundo

microcontrolador que tenga la función única de generar dos señales adicionales PWM para las secciones restantes, este es el PIC16F882, estos dos microcontroladores se comunican vía I2C siendo el principal el PIC18F4550 y el Esclavo PIC16F882 de manera que el principal pueda enviar los valores de ciclo de trabajo a establecerse.

Se estableció 25 KHz como frecuencia de trabajo de las cuatro salidas digitales PWM, con este valor la señal esta fuera del rango de frecuencias audible (20 Hz a 20Khz) y también es imperceptible para el ojo humano la variación de luz a esta frecuencia. La salida digital PWM es controlada mediante un valor de 10 bits que tiene un rango que depende del segundo temporizador interno diseñado para realizar el conteo de ciclos necesarios para generar la frecuencia requerida. Para el caso del Microcontrolador principal tenemos una frecuencia de oscilador de 48 MHz y Secundario de 20 MHz, que sirven como datos para realizar el cálculo de parámetros que requiere el temporizador para generar los 25 KHz y el rango que tendrá el ciclo de trabajo, para obtener el valor que corresponderá al valor máximo del rango del PWM utilizamos la fórmula que provee el fabricante para el cálculo del periodo PWM.

$$\text{ciclo de trabajo} = \frac{\text{Valor de 10 Bits}}{\text{PreEscalador TMR2} \cdot [\text{PR2} + 1]}$$

Ecuación 3. Cálculo de Ciclo de Trabajo PWM.

Para ambos microcontroladores se eligió un Pre-Escalador de 4, siendo diferencia el valor del registro PR2 que para el microcontrolador principal es 120 y secundario es 200, de la ecuación anterior mencionada realizamos el despeje y calculamos los valores máximos de ciclo de trabajo.

$$\text{Principal} \rightarrow \text{Valor 10 Bits} = 1 * 4 * (120 + 1) = 484$$

$$\text{Secundario} \rightarrow \text{Valor 10 Bits} = 1 * 4 * (200 + 1) = 804$$

Por lo tanto el microcontrolador Principal utiliza valores en el rango de 0 a 484 para generar el ciclo de trabajo PWM; el microcontrolador secundario al recibir el dato mediante I2C que maneja 8 bits, no tiene posibilidad de utilizar el valor de 10, por lo que se considera como valor máximo de PWM 200, ya que al utilizar 8 bits en el tratamiento de la señal esta tomará como valor máximo el del registro PR2.

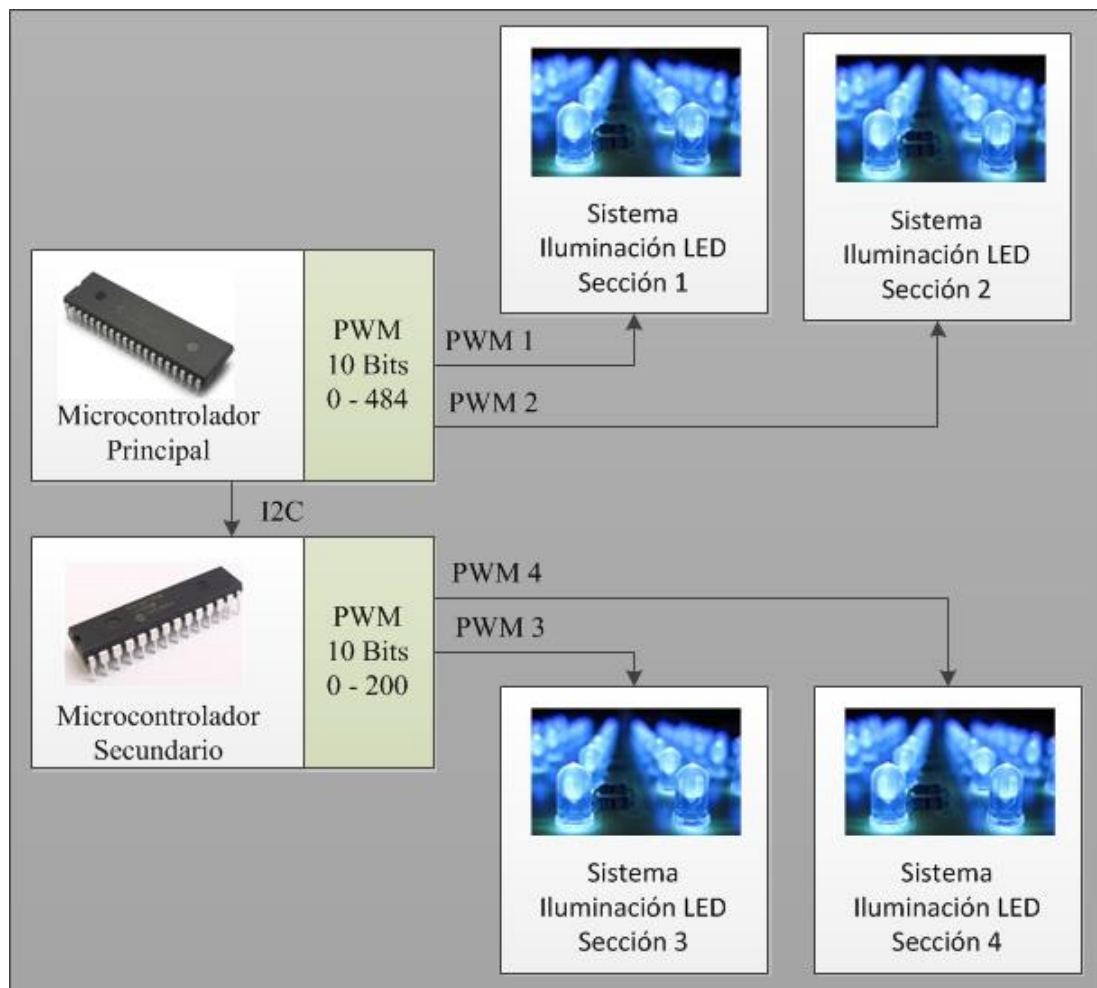


Figura 33. Magnitudes y Escalas a trabajar en Actuadores.

Los LED y sensores LDR son los principales dispositivos que están involucrados en el sistema de control en lazo cerrado, adicionalmente a estos hay varios dispositivos involucrados, entre ellos están los cuatro sensores DHT-22 para medición de temperatura y humedad relativa del ambiente, el switch que controla si el sistema trabaja en modo local o remoto, e indicadores LED de estado de programa colocados en la placa de elementos, los sensores DHT-22 están colocados a entradas

digitales en el puerto D del microcontrolador junto con el switch de cambio de modo de funcionamiento, este switch utiliza un circuito sencillo en el que se establece un valor lógico de “0” o “1” (0 y 5 volts) que el sistema lo interpreta como modo local o remoto respectivamente.

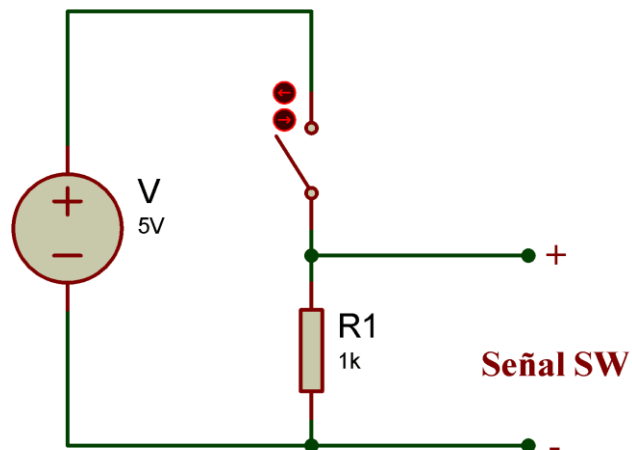


Figura 34. Circuito para Obtención de Señal de Modo de Operación.

4.1.5. Interfaz de Potencia

El microcontrolador PIC18F4550 es un dispositivo con capacidad de generar tensiones de salida hasta de 5V con una corriente de 25mA, que son incapaces de accionar las lámparas LED realizadas ya que cada una de ellas trabaja con 9.9V o 8.5V dependiendo del color, con un consumo de aproximadamente 1.75A, requiriéndose una interface de potencia que realice el acoplamiento entre los valores utilizados por el microcontrolador y suministrados hacia estas lámparas. Existen varias técnicas aplicadas en la utilización de LEDs de potencia, entre ellos están el diseño de amplificadores conmutados con transistores, también la utilización de circuitos integrados reguladores de corriente con resistencias de potencia y finalmente la utilización de convertidores DC-DC de potencia.

Al utilizar circuitos amplificadores de corriente con transistores se coloca varias resistencias que ayudan en la polarización del transistor y regulación de corriente, sin embargo utilizar este tipo de etapa de potencia implica tener resistencias muy

precisas en sus valores para obtener una corriente y tensión eficiente en su salida, además de que generan mucho calor y requieren de resistencias de potencia al demandar tanta corriente para la lámpara LED. Los métodos con circuitos reguladores de igual manera trabajan con corrientes bajas de hasta 1 Amperio siendo eficientes pero sin lograr acoplar el valor requerido para este proyecto.

La interfaz de potencia utilizada en el proyecto es la basada en convertidores DC-DC de potencia, siendo la más eficiente y económica ya que al tener una fuente de 12 Volts con la potencia suficiente para suministro de todo el sistema se requiere de un sistema que regule la tensión y corriente de la lámpara lo cual se obtiene mediante esta alternativa. Para el proyecto se utilizó convertidores de potencia Buck (Reductores de tensión) comerciales marca RioRand basados en el circuito integrado LM2596. Este convertidor es capaz de recibir una tensión de entrada de 3 a 40 Volts y regularla en valores de 1.5 a 35 Volts respectivamente y suministrar una corriente de salida de hasta 2 Amperios, cumpliendo los requisitos de funcionamiento para las lámparas LED.



Figura 35. Convertidor Buck RioRand basado en LM2596.

Fuente: (Amazon.com, 2015)

Los convertidores de potencia son muy utilizados en aplicaciones de corriente continua que requieren regular tensiones y corrientes como motores, carga de baterías, sistemas de regulación de lámparas LED, entre otros. Mediante este convertidor comercial podemos regular la tensión de salida del convertidor utilizando un potenciómetro de precisión incorporado, la corriente se regula gracias a la

retroalimentación necesaria en el circuito integrado LM2596, obteniendo así nuestro interfaz de potencia lista para trabajar con las lámparas a su máxima potencia.

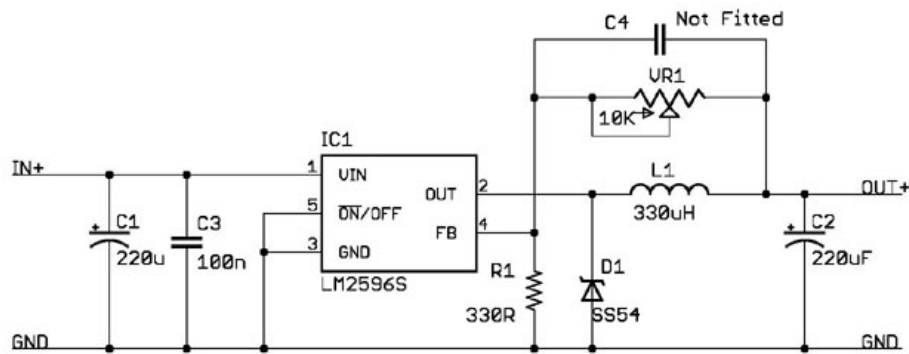


Figura 36. Diagrama Interno de Convertidor Buck RioRand.

Fuente: (RioRand.com, 2015)

Para incluir la variación de la intensidad luminosa se utilizó transistores MOSFET de potencia IRFZ44N diseñados para conmutación, con una resistencia entre drenaje y fuente del transistor de $17.5 \text{ m}\Omega$ que reduce la caída de tensión que se genera internamente en el transistor. Estos transistores son colocados a la salida del convertidor Buck para que trabajen en una configuración de conmutación permitiendo el paso o no de la nueva fuente que son los convertidores, la señal de control de la compuerta de cada transistor es el PWM que envía el microcontrolador.

En total se utilizaron 16 convertidores cada uno con su transistor, con lo que se cubre las 16 lámparas LED en todo el sistema, cada convertidor suministrará la tensión y corriente necesario para cada lámpara y mediante la señal PWM se controla la salida del convertidor hacia la lámpara con el ciclo de trabajo adecuado.

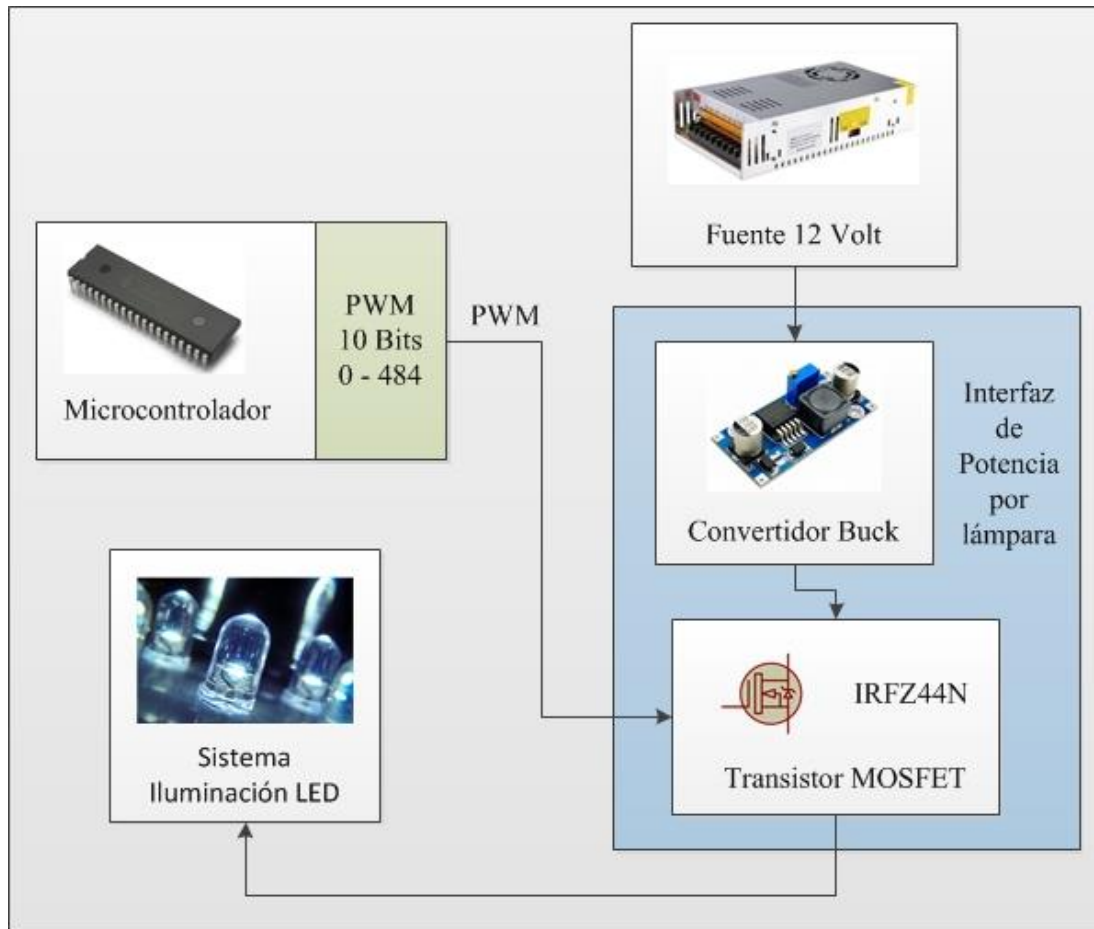


Figura 37. Diagrama de Interfaz de Potencia en el Sistema.

Los transistores utilizados a pesar de tener una resistencia interna muy pequeña generan consumo de tensión, requiriendo que los convertidores suministren un poco más de la tensión nominal de la lámpara, al realizar la pruebas prácticas se determinó aumentar 0.5 volts adicionales a la regulación del convertidor.

4.1.6. Sistema de Comunicación de Datos Inalámbrico

Los sistemas de comunicación inalámbrica facilitan mucho el entorno de trabajo de cualquier proceso, ya que evitan el cableado desde terminales hacia los sistemas, siempre y cuando esto sea posible, ya que para ciertas aplicaciones no es posible optar por este tipo de enlace de datos debido a interferencias que genera el propio sistema. Para el caso de la cámara de crecimiento las interferencias son mínimas

siendo una opción viable la implementación de un sistema de comunicación inalámbrica y el software que controla el sistema está instalado en el computador de la oficina de Germoplanta Cía. Ltda. A una distancia máxima de 15 metros del punto más lejano del laboratorio, siendo estas consideraciones para el sistema de comunicación.

Para el proyecto la tecnología de enlace de datos inalámbrico utilizada es Bluetooth, esta funciona perfectamente bajo las condiciones de distancia y espacio establecidas; para generar este enlace entre el computador y el sistema se utiliza el módulo inalámbrico HC-06 que es compatible con cualquier microcontrolador que tenga implementado una interfaz USART (Transmisión/Recepción Universal Asíncronica) la cual si consta en el PIC18F4550 y un terminal Bluetooth en el computador, con lo cual se obtiene la ventaja de que no se necesita dispositivos emisor y receptor con microcontroladores.

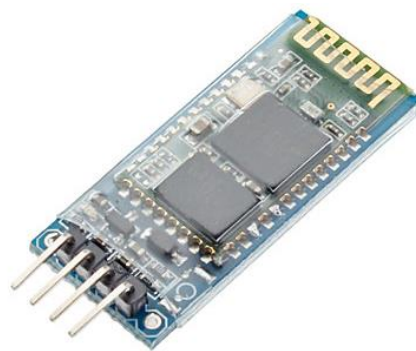


Figura 38. Módulo Bluetooth HC-06.

Al contar con un concentrador Bluetooth instalado en el computador podemos añadir el módulo HC-06 del sistema desde el sistema operativo del computador, como si se tratara de cualquier dispositivo común por ejemplo un mouse, teclado, audífonos, etc. Con la adición que este módulo al ser emparejado genera un servicio de puerto serial COM virtual, mediante el cual se llevará a cabo el intercambio de información de datos. El módulo HC-06 trabaja con una interfaz serial bajo el protocolo RS-232 a 9600 Baudios, 8 bits de datos y paridad nula, que debe ser configurada en el microcontrolador; su estándar que utiliza es bluetooth 2.0 con una

tasa de 3 Mbits/segundo con una distancia de cobertura óptima de 10 metros, deteriorándose la calidad de la señal conforme se aleja, para el proyecto el sistema está dentro del alcance de 10 metros incluso con posibles cambios de posición que se le pueda hacer al sistema dentro del laboratorio.

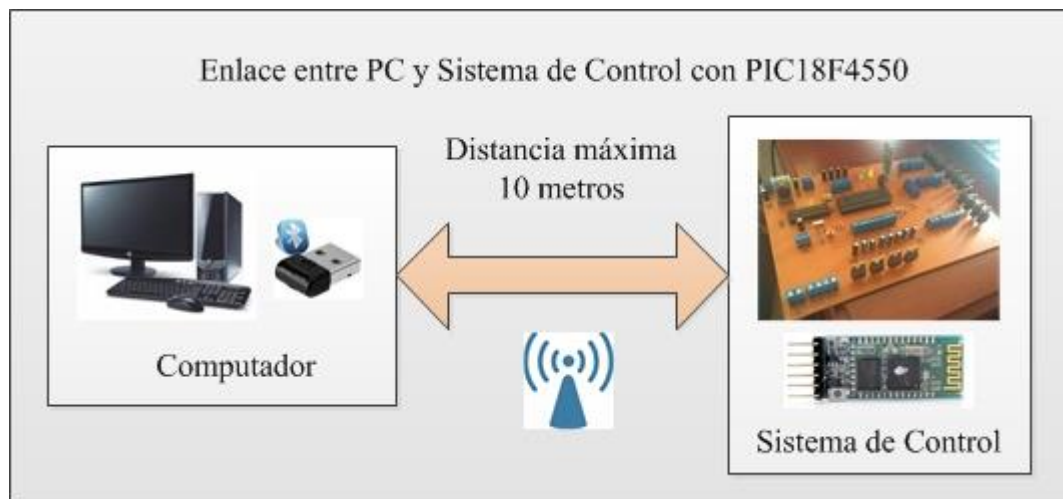


Figura 39. Enlace de Datos inalámbrica vía Bluetooth.

Para añadir el módulo HC-06 en el sistema operativo se debe considerar el código de emparejamiento de fábrica 1234 y el nombre de dispositivo que dependiendo de la configuración de fábrica puede variar entre “HC-06”, “BlueBolt” o “Linvor”, y se instalara todos los controladores automáticamente en Windows, Mac OS o Linux. La configuración del protocolo RS-232 es automática en el computador siendo requerida solamente en el microcontrolador.

El sistema envía de forma permanente los valores de los sensores y el modo de funcionamiento, hacia el computador para que en este se pueda visualizar el monitoreo en tiempo real de las variables de interés, mientras que el computador envía las consignas de intensidad luminosa solamente cuando el usuario lo indique, por lo contrario no existirá comunicación en este sentido hacia el sistema; la tasa de transferencia inalámbrica utilizando esta tecnología también permite tener una actualización de los datos muy eficiente al ser estos en total 12 enviados desde el sistema y 4 enviados desde el computador.

Tabla 11.**Variables Involucradas en la Comunicación Inalámbrica.**

Datos	Tipo	Sentido de Comunicación
Temperatura Sección 1	Flotante con 2 cifras enteras y 1 decimal	Sistema de Control hacia el Computador
Temperatura Sección 2		
Temperatura Sección 3		
Temperatura Sección 4		
Humedad Sección 1		
Humedad Sección 2		
Humedad Sección 3		
Humedad Sección 4		
Luminosidad Sección 1	Entero de 4 cifras	Sistema de Control hacia el Computador
Luminosidad Sección 2		
Luminosidad Sección 3		
Luminosidad Sección 4		
Consigna Luminosidad Sección 1		Computador Hacia Sistema de Control
Consigna Luminosidad Sección 2		
Consigna Luminosidad Sección 3		
Consigna Luminosidad Sección 4		

4.2. Diseño y Especificaciones del Sistema de Control

Con los sistemas de iluminación y sensores instalados en la estantería metálica se procedió a realizar la toma de datos para la obtención de la luminosidad vs el voltaje de la instrumentación de sensores LDR, el programa del microcontrolador recibe la magnitud en 10 bits de la luminosidad de los 8 sensores y al estar 2 por sección se realizó la suma de ambos valores para obtener un rango de medición mayor que

permita mejor precisión en el control, por lo que hay que tener en consideración que el sistema de control no trabajará con valores explícitos de intensidad luminosa en luxes sino con un valor variable en el rango de 0 a 2046 en el cual está de manera implícita el valor de luminosidad.

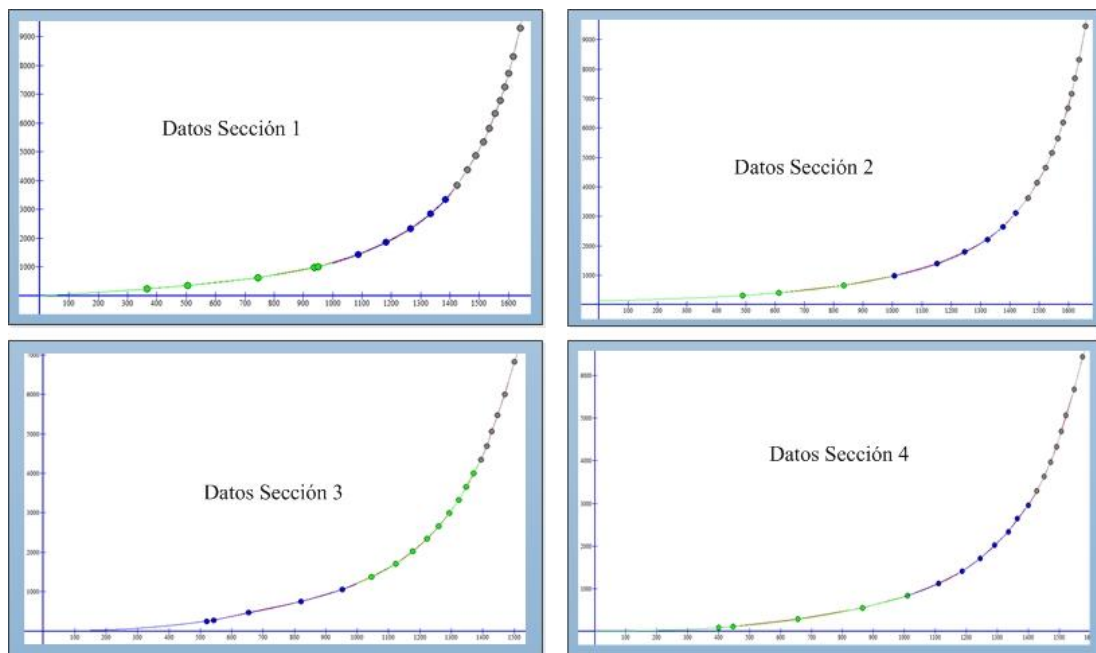


Figura 40. Forma de Curvas obtenidas de Luminosidad vs Conversor A-D.

Con los datos tomados por sección del sistema se realizaron aproximaciones mediante ecuaciones que se ajusten a la forma de la curva, sin un resultado que transforme el valor obtenido a luminosidad con una precisión aceptable, por lo que se dividió la ecuación por rangos, que después de hacer el análisis de segmentos apropiados se estableció que para todas las secciones son de 0 a 1000, de 1000 a 1400 y de 1400 en adelante, obteniendo así una precisión eficaz con respecto al luxómetro de referencia. La obtención de dichas ecuaciones es importante para el análisis y diseño del sistema de control para obtener la diferencia que se puede dar entre las secciones ya que cada sensor LDR tiene variaciones con respecto a otros, que en cuestión de precisión y buena repetibilidad al momento de controlar un sistema es crítico, al obtener las ecuaciones es posible establecer si cada sección requiere de un controlador individual o descartar esta posibilidad y utilizar el mismo controlador para todas las secciones.

$$S1 = \begin{cases} \frac{-12.36 + 0.601 * x}{1 - 0.0002 * x - 0.00000027 * x^2} & 0 \leq x \leq 1000 \\ \frac{-1622.93 + 2.99 * x}{1 + 0.0013 * x - 0.00000103 * x^2} & 1000 < x \leq 1400 \\ 0.0002 * x^3 - 0.823 * x^2 + 1176.48 * x + 563270 & 1400 < x \leq \infty \end{cases}$$

$$S2 = \begin{cases} \frac{128.16 + 0.0802 * x}{1 - 0.0001 * x + 0.00000034 * x^2} & 0 \leq x \leq 1000 \\ \frac{153.046 + 0.13 * x}{1 - 0.0009 * x + 0.000000179 * x^2} & 1000 < x \leq 1400 \\ \frac{318.42 - 0.074 * x}{1 - 0.001 * x + 0.00000027 * x^2} & 1400 < x \leq \infty \end{cases}$$

$$S3 = \begin{cases} 0.00000052 * x^3 + 0.0007 * x^2 - 0.012 * x & 0 \leq x \leq 1000 \\ \frac{215.602 + 0.0062 * x}{1 - 0.0012 * x + 0.000000347 * x^2} & 1000 < x \leq 1400 \\ -0.000084 * x^3 + 0.395 * x^2 - 593.55 * x + 290440 & 1400 < x \leq \infty \end{cases}$$

$$S4 = \begin{cases} 0.00000049 * x^3 + 0.0003 * x^2 - 0.027 * x & 0 \leq x \leq 1000 \\ 0.000014 * x^3 - 0.043 * x^2 + 44.15 * x - 15030 & 1000 < x \leq 1400 \\ \frac{325.77 - 0.152 * x}{1 - 0.0012 * x + 0.000000347 * x^2} & 1400 < x \leq \infty \end{cases}$$

Ecuación 4. Ecuaciones por intervalos para Luminosidad de Secciones del sistema.

Las ecuaciones obtenidas para cada sección difieren entre ellas con valores considerables que ameritan el diseño de un controlador individual para cada sección, estas ecuaciones como se mencionó no interfieren en el sistema de control y son implementadas dentro del software en el computador para visualización del usuario.

También para envío de la consigna de igual manera se establece ecuaciones que transformen el valor en luxes a su correspondiente en el conversor basándose en los datos ya obtenidos pero invertidos, de esta forma el sistema de control lo puede interpretar y podemos establecer los valores finales de trabajo del sistema de control con su rango.

Debido a que el sistema final debe tener una rápida respuesta y el error mínimo posible, se estableció que el lazo de control tiene que ser cerrado, de manera los sensores LDR proporcionan una realimentación sobre el sistema de control y se realiza el cálculo de error con el cual se debe tomar la acción de control en los actuadores.

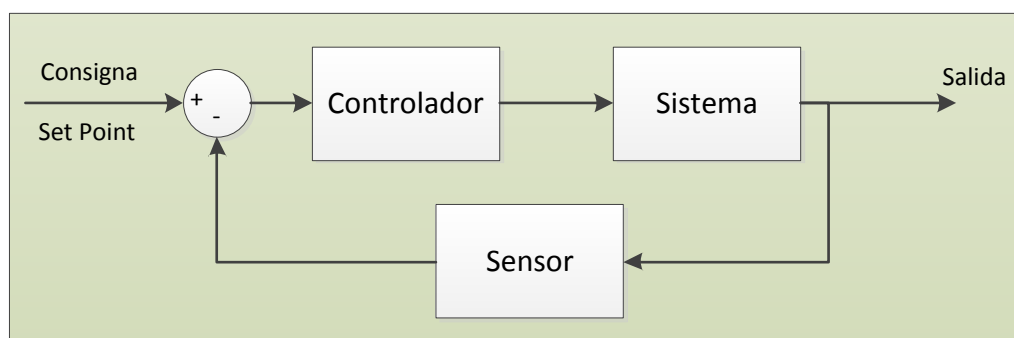


Figura 41. Estructura de Control en Lazo Cerrado.

Las Resistencias Dependientes de la Luz tienen un tiempo de 100 milisegundos aproximado en el cual responden al cambio de luz incidente en ellas, con características de estabilidad en el cambio de la resistencia sin sobre impulsos u oscilaciones ni retardos, al instrumentarlas mediante un divisor de tensión se espera que no se tenga ningún cambio en dicho comportamiento ya que este sistema eléctrico no debería generar inestabilidad en el comportamiento del sensor. Basándose en estas características el sistema esperado que represente a este sistema es primer orden sin retardo pero sin descartar la posibilidad de que exista alguno al momento de ingresar una entrada al sistema.

Para verificar la validez de dichas características técnicas del sistema se realizó el muestreo de la primera sección al someterla a una entrada de tipo escalón que sería el valor de la señal PWM con 100% de ciclo de trabajo con la que se obtiene la mayor iluminación sobre la sección; este muestreo se realizó considerando un tiempo entre muestra de 10 milisegundos que es al menos 10 veces menor que el descrito por las especificaciones técnicas de las LDR y posteriormente se ingresó los datos en MATLAB® para visualizar gráficamente los datos obtenidos y verificar que la naturaleza del sistema sea de primer orden. También se debe considerar que el valor máximo de intensidad luminosa que alcanzan las secciones 1 y 2 es superior a las de las secciones 3 y 4 debido a que el color blanco puro de cada LED tiene 90 Lux mientras que la combinación de colores para cultivo es menor, en base a lo que se midió con el luxómetro de referencia las secciones 1 y 2 alcanzan hasta 8000 Luxes mientras que las secciones 3 y 4 alcanzan los 6000 Luxes, esto significa un cambio en el modelo matemático entre secciones con los cambios de color.

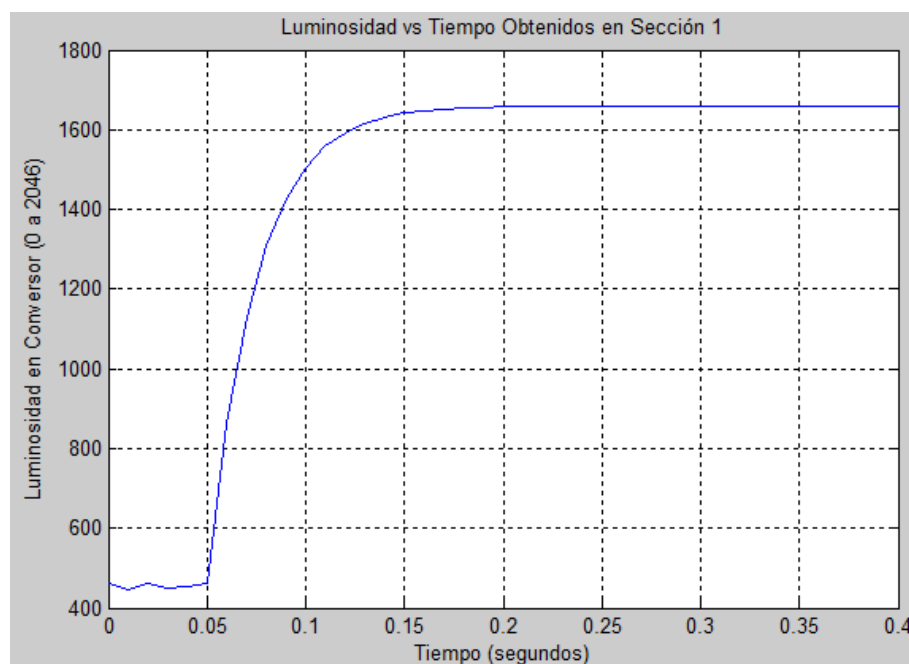


Figura 42. Respuesta de la Sección 1 ante una Entrada Escalón de 100% PWM.

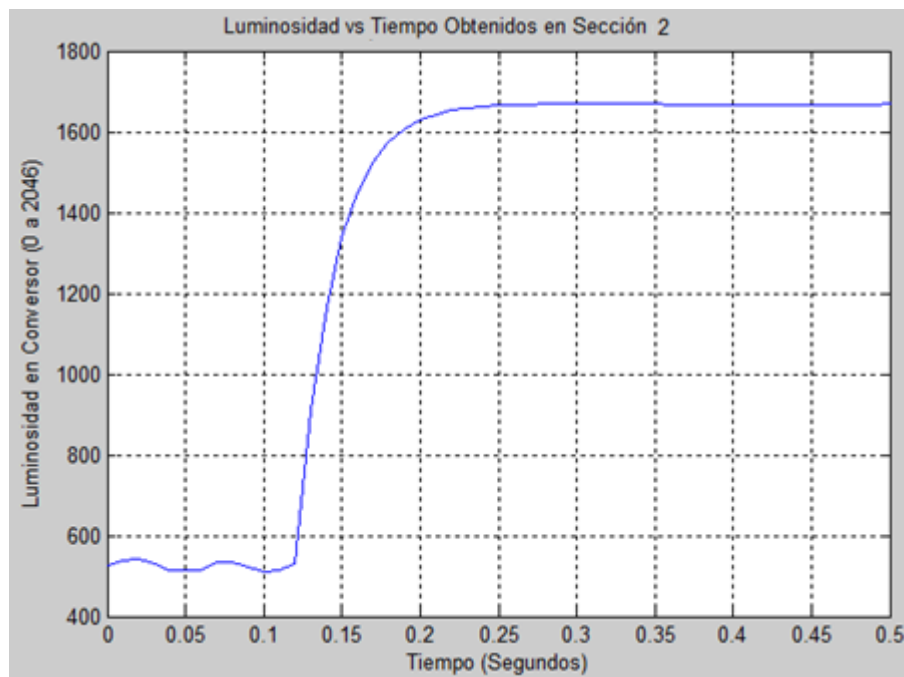


Figura 43. Respuesta de la Sección 2 ante una Entrada Escalón de 100% PWM.

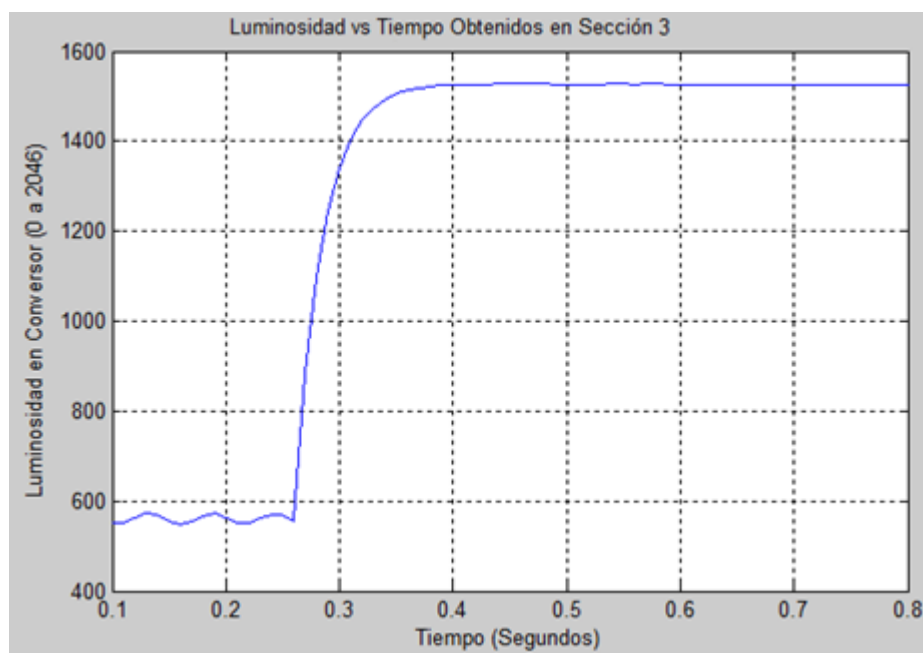


Figura 44. Respuesta de la Sección 3 ante una Entrada Escalón de 100% PWM.

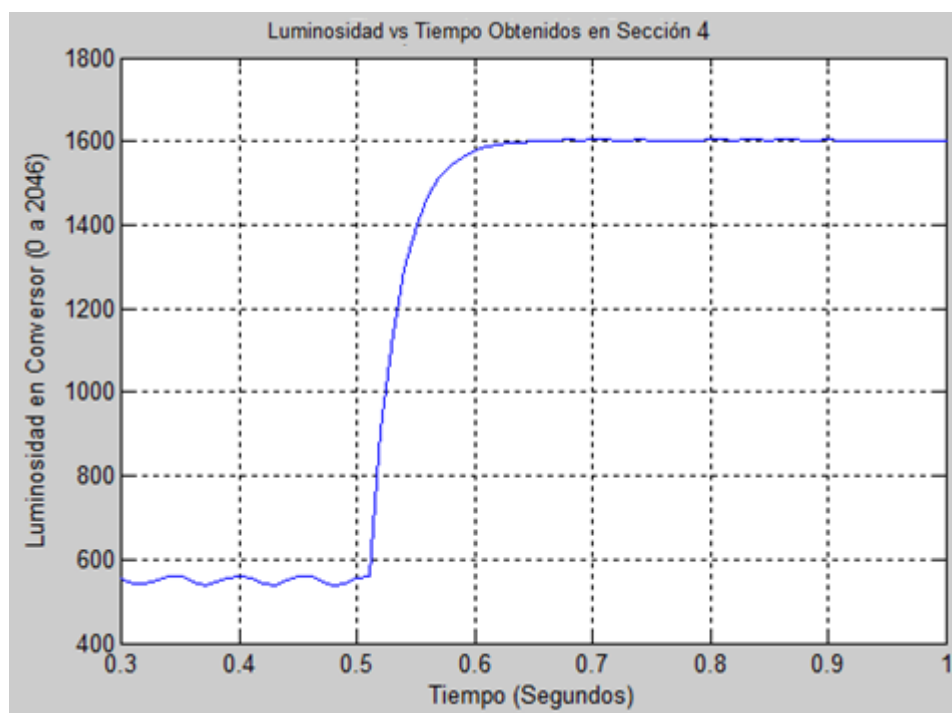


Figura 45. Respuesta de la Sección 4 ante una Entrada Escalón de 100% PWM.

Con el muestreo de los datos en cada sección se pudo verificar que el sistema corresponde efectivamente a primer orden, estableciéndose en su valor final en aproximadamente 100 milisegundos coincidiendo con sus especificaciones técnicas y aparentemente sin retardo ya que al momento de interacción de la entrada sobre el sistema este responde de manera inmediata; posterior a esto utilizando la herramienta *ident* de MATLAB® procedemos a obtener el modelo matemático que representa este sistema tanto con una función de transferencia sin retardo y con retardo para el análisis de cuál es la que mejor aproximación tiene con el sistema. Las formas matemáticas a las cuales se va a aproximar este sistema son las siguientes:

$$G(s) = \frac{K \cdot e^{-Ls}}{Ts + 1} \quad \text{o} \quad G(s) = \frac{K}{Ts + 1}$$

Ecuación 5. Funciones de Transferencia para Sistemas de Primer Orden Con retardo y Sin Retardo

Mediante la herramienta *Ident* podemos ingresar el dato de la entrada aplicada al sistema y la respuesta que esta genera especificando un tiempo de muestreo, estos datos ingresados son vectores en los cuales cada posición significa cada muestra en el intervalo de tiempo, para este caso la entrada es un escalón del ciclo de trabajo del 100% del PWM del microcontrolador, este valor corresponde a 484 para las secciones 1 y 2 y corresponde a 200 para las secciones 3 y 4, con esto obtenemos el modelo matemático con o sin retardo.

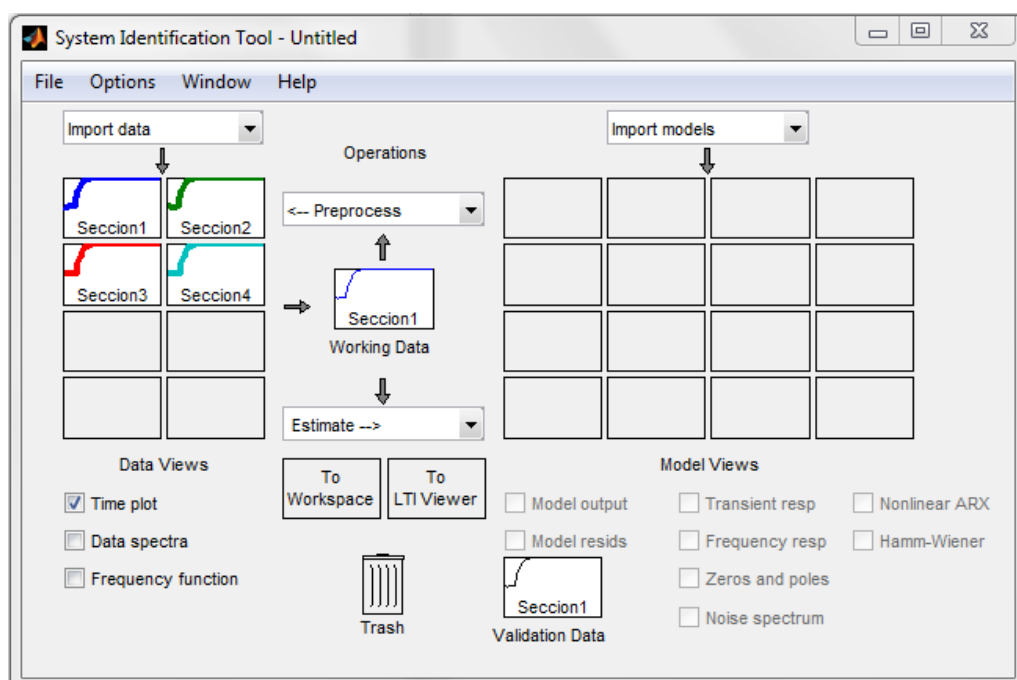


Figura 46. Herramienta *Ident* de MATLAB® con datos Ingresados.

Con respecto a los colores de las secciones 1 y 2, los datos obtenidos son muy similares y de igual manera sucede con los de las secciones 3 y 4 con lo que se puede tener la posibilidad de realizar solamente dos modelos matemáticos que sean válidos para secciones de color blanco como para secciones con combinación de color, esto simplificaría algoritmos implementados en el microcontrolador ya que se reducirían de cuatro por sección a dos controladores por tipo de color utilizado.

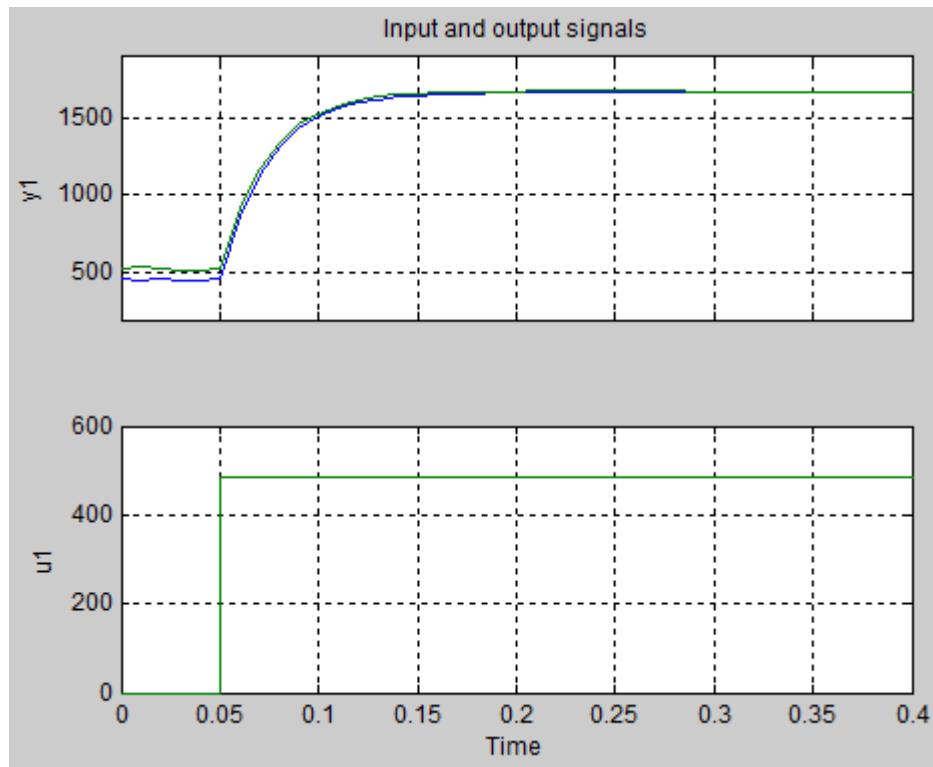


Figura 47. Salida de Secciones 1 y 2 con Respecto a entrada Escalón.

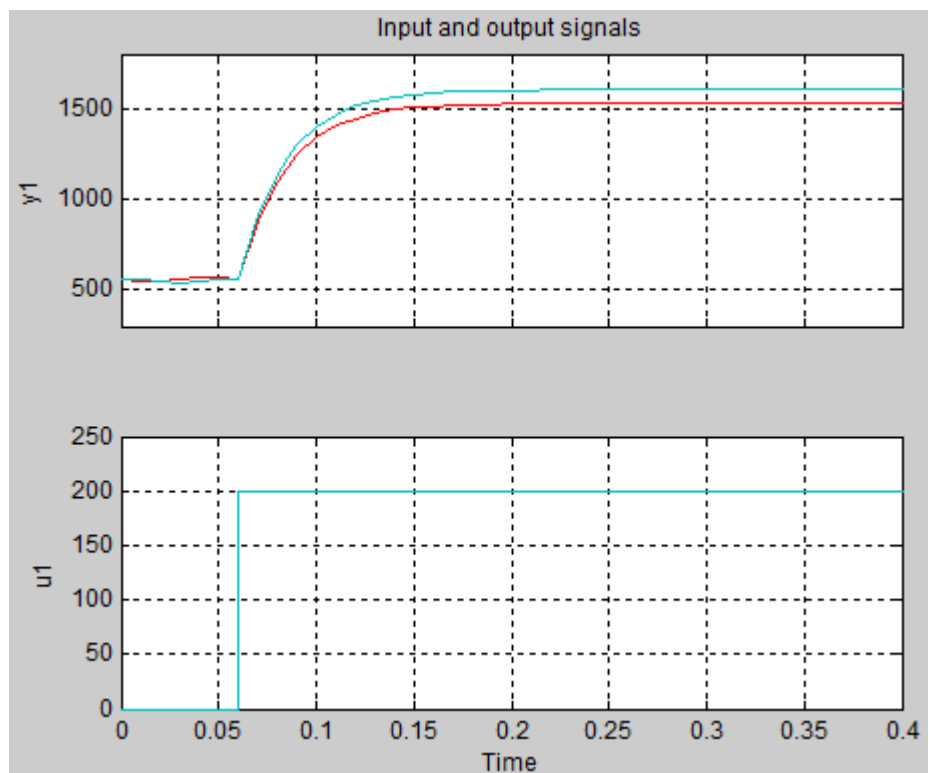


Figura 48. Salida de Secciones 3 y 4 con Respecto a entrada Escalón.

Para acatar la posibilidad de que los modelos matemáticos puedan ser simplificados o se pueda representar varias secciones mediante un solo modelo, se observa los parámetros en la función de transferencia obtenida, que si al obtener valores aproximados y que no afecten el comportamiento del sistema al realizar pequeñas variaciones en dichos parámetros.

$$G(s) = \frac{3.4268e^{-(4E-18)s}}{0.0242s + 1} \qquad G(s) = \frac{3.429}{0.0243s + 1}$$

Ecuación 6. Funciones de Transferencia con y sin retardo para Sección 1.

Al obtener las funciones de transferencia se observa que la diferencia que se da entre el parámetro proporcional es de aproximadamente 0.1, considerado como no relevante y que la constante de tiempo del sistema difiere con apenas decimas de milisegundo, por lo que la constante de tiempo tampoco tiene un cambio relevante para ambos tipos de función de transferencia. Ya que se observó que la respuesta del sistema en el muestreo se obtiene a los 100 a 150 milisegundos aproximadamente se concluye que la constante de tiempo obtenida es acorde a los datos técnicos de las LDR. El retardo añadido de la primera función de transferencia no significa un cambio con respecto a la respuesta del sistema, ya que este no tiene un valor muy pequeño que puede ser despreciado, y de esta manera comprobando que el sistema no tiene retardo en su respuesta ya que al realizar cambios en los actuadores, los sensores lo captan rápidamente. Otro punto importante a recalcar es que este sistema no tiene su punto de inicio en 0 en la salida sino que es aproximadamente 500 que corresponde al valor de conversor en el rango de 0 a 2046, esto se debe a que el sensor LDR al tener la menor cantidad de luz posible el valor de su resistencia es muy elevado pero no lo suficiente como para generar 0 volts en el divisor de tensión, por lo que se debe considerar este desplazamiento en la señal para el modelo matemático o si se genera inconvenientes por no considerarlo en el diseño del controlador. Todas estas características mencionadas suceden de igual manera en las funciones de transferencia para las demás secciones, estableciéndose que la función de transferencia con la que se trabaja es sin para las pruebas con el controlador implementado.

En la figura a continuación se realiza la comprobación de que el retardo añadido en la función de transferencia no genera ninguna diferencia radical que deba ser considerada por lo que este modelo se desprecia, la respuesta en color azul corresponde a la función de transferencia con retardo y la verde al modelo sin retardo mismas que son difícilmente distinguibles porque la aproximación de ambas es muy buena con una ligera superioridad de la aproximación sin retardo con respecto al muestreo realizado.

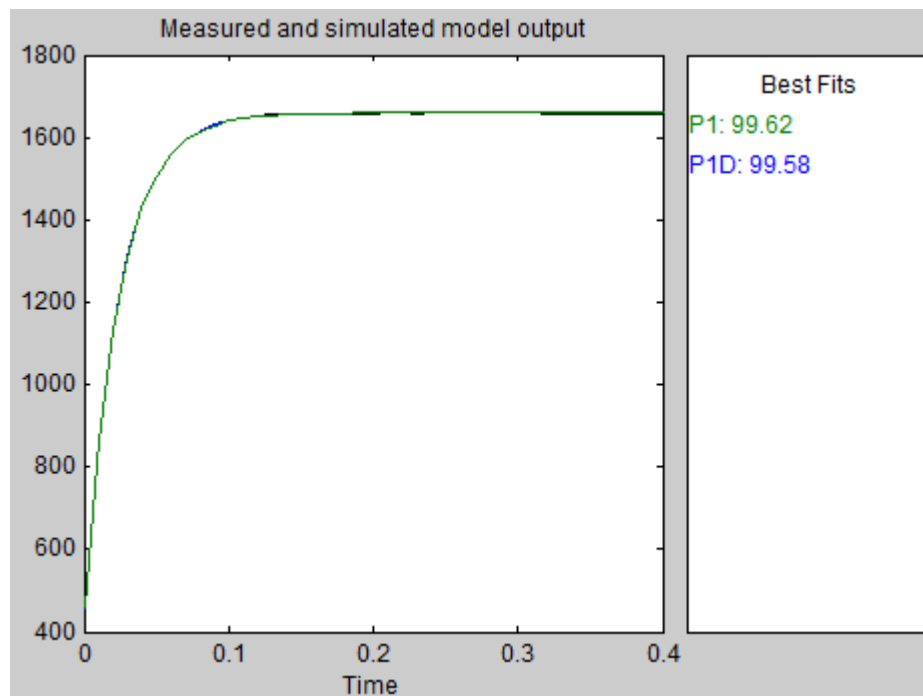


Figura 49. Ajuste de Funciones de Transferencia Obtenidas para la Sección 1 con respecto a la Toma de Datos.

$$G(s) = \frac{3.4508}{0.0243s + 1}$$

Ecuación 7. Función de Transferencia para Sección 2.

Al obtener la función de transferencia para la sección 2, se observa una semejanza considerable con respecto a la considerada finalmente para la sección 1, siendo principal diferencia la de pequeños valores decimales en la constante proporcional

que pueden ser despreciados, por lo que se optó por trabajar con un solo modelo matemático en función de transferencia que represente el comportamiento de las secciones 1 y 2 debido a la similitud. Esta función de transferencia nueva es obtenida realizando el promedio de los valores obtenidos en las funciones de transferencia de las secciones 1 y 2.

Tabla 12.

Parámetros para Función de transferencia de Secciones 1 y 2

Parámetro	Sección 1	Sección 2	Valor Final
K	3.429	3.4508	3.439
T	0.0243	0.0243	0.0243

Con los datos promediados obtenemos la función de transferencia que representa a las secciones 1 y 2 que será considerada para el diseño del controlador, por lo que el controlador para ambas secciones tendrá las mismas constantes y parámetros.

$$G(s) = \frac{3.439}{0.0243s + 1}$$

Ecuación 8. Función de Transferencia para Secciones 1 y 2.

Para el caso de las secciones 3 y 4 obtenemos resultados de igual manera similares, que nos permiten realizar la representación de ambas secciones mediante una sola función de transferencia, en estas secciones se consideró de igual manera utilizar el promedio de los parámetros obtenidos en cada una para el resultado final.

Tabla 13.

Parámetros para la función de Transferencia de Secciones 3 y 4.

Parámetro	Sección 3	Sección 4	Valor Final
K	7.793	8.016	7.904
T	0.0242	0.0245	0.0243

Los valores en la constante proporcional con respecto a la función de transferencia de las secciones 1 y 2 se da debido al valor que representa el 100% de PWM en estas secciones el cual es 200, matemáticamente significando que con una entrada menor se alcanza un valor mayor al de las secciones anteriores, pero en la práctica se da solo por la diferencia de rangos de valores que se utiliza para controlar la salida PWM de cada microcontrolador.

$$G(s) = \frac{7.904}{0.0243s + 1}$$

Ecuación 9. Función de Transferencia para Secciones 3 y 4.

Una vez obtenidas las funciones de transferencia a utilizar, se procede a escoger un controlador que trabaje de manera eficaz con este tipo de dinámica, al tratarse de un sistema de primer orden sin retardo, con una constante de tiempo muy rápida se descarta la posibilidad de una acción derivativa ya que los cambios rápidos generados en la realimentación del sistema afectarían con una tendencia infinita en la acción de control al aplicarse derivadas por que la pendiente es muy pronunciada en intervalos muy cortos de tiempo; con la aplicación de una acción proporcional logramos una aproximación lo más rápida posible en estado estacionario evitando generar oscilaciones en el sistema con el crecimiento de esta constante y mediante la acción integral controlamos la velocidad para que el control tome la acción de control y disminuimos el error en estado estacionario. Por tanto el controlador a aplicarse será el de tipo Proporcional Integral (PI).

$$m(t) = K_p * e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau$$

Ecuación 10. Ecuación en el Tiempo del Controlador PI.

$$M(s) = K_p \left(\frac{1}{T_i * s} + 1 \right) \quad \text{o} \quad M(s) = K_p + \frac{K_i}{s}$$

Ecuación 11. Función de Transferencia del Controlador PI.

Este tipo de controladores son los más utilizados en la industria ya que reúnen las características a aplicarse para la mayoría de dinámicas existentes en sistemas electrónicos, mecánicos y electromecánicos. Para el diseño de los parámetros del controlador se partirá de los parámetros de desempeño establecidos para lograr un rendimiento óptimo del sistema y posteriormente se calcula las raíces del controlador utilizando estos datos, los parámetros de desempeño que plantea es un máximo sobre impulso de 1% y tiempo de establecimiento de 0.25 segundos ($MP = 1\%$ y $ts = 0.25 \text{ seg}$).

Para establecer el número de polos se tiene que analizar el grado de la ecuación características que se forma entre la planta y el controlador; para poder establecer esto primeramente se tiene que tener ambas funciones de transferencia digitalizadas, es decir en su transformación Z correspondiente, primeramente analizamos la función de transferencia de la planta y seguidamente el controlador.

$$Gp(s) = \frac{K}{s + a}$$

Ecuación 12. Forma en el Dominio “s” de la Planta.

La cual tiene una forma discreta como la siguiente:

$$Gp(z) = \frac{b_1}{z + a_1}$$

Ecuación 13. Forma Discreta de la Planta.

Por otra parte al controlador PI utilizado se le obtiene su forma discreta utilizando la aproximación rectangular comúnmente utiliza en aplicaciones de digitalización, con lo cual obtenemos su forma discreta.

$$Gz(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad \text{Utilizando } s = \frac{z - 1}{Tz}$$

Ecuación 14. Aproximación rectangular para Controlador.

Realizando las sustituciones y procedimiento matemático obtenemos la siguiente forma para el controlador discreto PI.

$$G_c(z) = \frac{(K_p + K_i * T)z - K_p}{z - 1}$$

Ecuación 15. Forma Discreta del Controlador PI.

Para poder realizar las operaciones simplificadas para la ecuación característica entre la planta y controlador simplificamos estos valores obteniendo la siguiente función de transferencia digital.

$$G_c(z) = \frac{K_1 z + K_2}{z - 1} \quad \text{Donde} \begin{cases} K_1 = K_p + K_i * T \\ K_2 = -K_p \end{cases}$$

Ecuación 16. Forma Final Discreta del Controlador PI

La ecuación entre planta y controlador es formando mediante la multiplicación de numeradores y denominadores respectivamente de las formas digitales de las funciones de transferencia.

$$\begin{aligned} \Delta_1(z) &= (z + a_1)(z - 1) + (b_1)(K_1 z + K_2) \\ \Delta_1(z) &= z^2 + (b_1 K_1 + a_1 - 1)z + (b_1 K_2 - a_1) \end{aligned}$$

Ecuación 17. Ecuación Característica entre Planta y Controlador.

Para poder complementar estos valores debemos obtener las raíces del controlador utilizando primeramente la ecuación que los describe en el dominio s y posteriormente discretizarlos. Estos valores son obtenidos utilizando los parámetros de desempeño establecidos para el controlador.

$$s_{1,2} = -\varepsilon * \omega_n \pm j \left(\omega_n * \sqrt{1 - \varepsilon^2} \right)$$

Ecuación 18. Obtención de Raíces del Sistema.

$$\%MP = 100 * e^{-\frac{\pi\varepsilon}{2\sqrt{1-\varepsilon^2}}} \quad t_s = \frac{4}{\varepsilon * \omega_n}$$

Ecuación 19. Cálculo de Raíces Utilizando Parámetros de Desempeño.

Para la obtención de la ecuación característica complementaria para cálculo de raíces del sistema se plantea una ecuación del mismo orden para realizar el juego de ecuaciones correspondiente.

$$\begin{aligned} \Delta_c(z) &= (z + z_1)(z - z_2) \\ \Delta_c(z) &= z^2 + (-z_1 - z_2)z + z_1z_2 \end{aligned}$$

Ecuación 20. Ecuación Característica del Sistema.

Luego de haber obtenido la ecuación característica discreta del sistema y la ecuación de la planta y controlador discreta procedemos a igualar ambas ecuaciones para poder obtener los coeficientes del controlador.

$$\begin{array}{l} z^2 \\ z^1 \\ z^0 \end{array} \quad \begin{array}{l} \longrightarrow \\ \longrightarrow \\ \longrightarrow \end{array} \quad \begin{array}{l} 1 = 1 \\ b_1k_1 + a_1 - 1 = -z_1 - z_2 \\ b_1k_2 - a_1 = z_1z_2 \end{array}$$

De las ecuaciones obtenidas los parámetros de interés son los relacionados al controlador, por lo que procedemos a despejarlos y obtener sus valores en función de parámetros conocidos que son de los *zeros* y coeficientes de la planta.

$$K_1 = \frac{1 - z_1 - z_2 - a_1}{b_1} \quad \leftrightarrow \quad K_2 = \frac{z_1z_2 + a_1}{b_1}$$

Ecuación 21. Parámetros Digitales del Controlador PI.

Para poder simplificar el trabajo del cálculo de los parámetros del controlador se utilizó MATLAB® implementando un pequeño programa *script* que realiza el cálculo de los mismos y aplica un escalón para verificar la salida del sistema en lazo cerrado, con el cual podemos observar el desempeño del sistema.

Cuadro 1

Código MATLAB® Utilizado para Cálculo del Primer Controlador.

```

% Cálculo de Parámetros del Controlador
% Para Secciones 1 y 2 del Sistema
% Tiempo de muestreo y Planta
T = 0.01;
Gs = tf(3.439, [0.0243 1]);
Gz = c2d(Gs, T);
% Parametros de desempeño
MP = 1;
ts = 0.25;
xi = sqrt(1/((pi^2/(log(MP/100))^2)+1));
Wn = 4/(ts*xi);
% Calculo de raices
s1 = -xi*Wn + 1i*Wn*sqrt(1-xi^2);
s2 = -xi*Wn - 1i*Wn*sqrt(1-xi^2);
% Polos digitales
z1 = exp(s1*T); z2 = exp(s2*T);
[n d] = tfdata(Gz, 'v');
b1 = n(2); a1 = d(2);
% Calculo de parametros del controlador
k1 = (1-z1-z2-a1)/b1;
k2 = (z1*z2+a1)/b1;
% Controlador discreto
Gcz = tf([k1 k2], [1 -1], T);
glc = feedback(Gz*Gcz, 1);
step(glc)

```

Transfer function:

$$\frac{-0.02716 z + 0.05474}{z - 1}$$

Figura 50. Función de Transferencia de Secciones 1 y 2 en Lazo Cerrado.

Mediante el programa en MATLAB® se obtuvieron resultados positivos, mediante los cuales se verifica la acción de control sobre el sistema, aunque se tiene una oscilación negativa muy pequeña al inicio del sistema, para verificar el total desempeño del sistema se realizará la simulación respectiva en Simulink de MATLAB® con fines de validar o mejorar el controlador diseñado, en la gráfica obtenida mediante el programa se obtuvo un sobre impulso de 1.03% y un tiempo de establecimiento de 0.21 segundos, comprobando el cumplimiento de los parámetros de desempeño establecidos.

Con los Valores resultantes de realizar el cálculo del controlador obtenemos los coeficientes del mismo, teniendo una forma final de la siguiente manera:

$$G_c(z) = \frac{-0.0272z + 0.0547}{z - 1}$$

Ecuación 22. Función de Transferencia Digital del Controlador PID para Secciones 1 y 2.

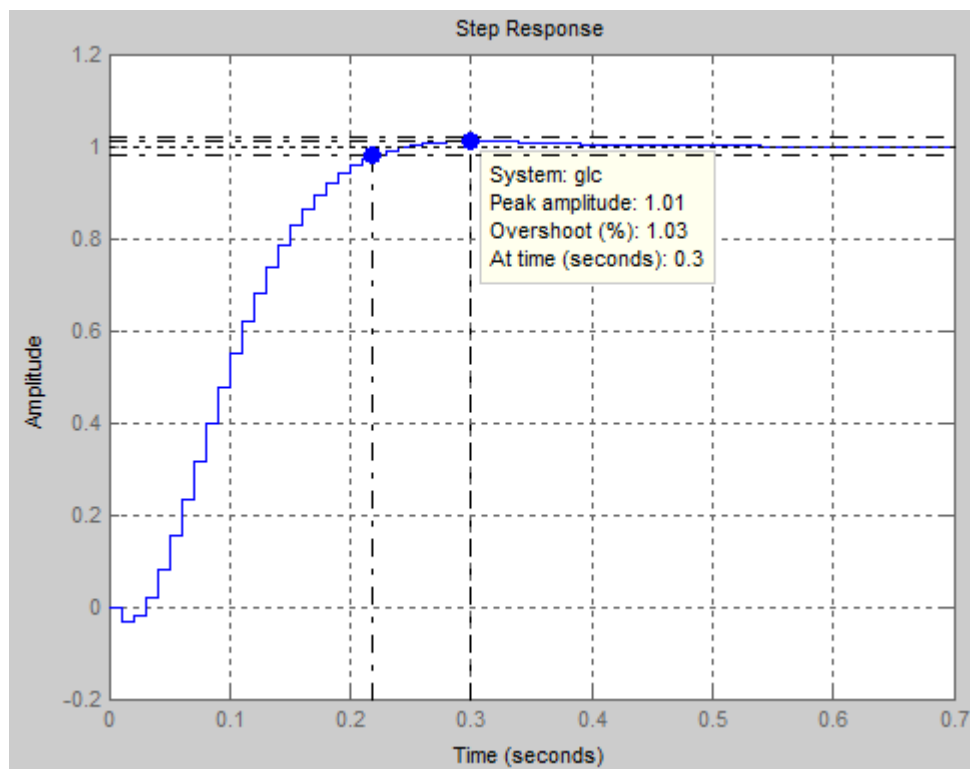


Figura 51. Respuesta con Controlador en Lazo Cerrado para Secciones 1 y 2.

Para obtener el controlador correspondiente a las secciones 3 y 4 realizamos el mismo procedimiento, aprovechando que la forma de las funciones de transferencia continuas y discretas son las mismas, utilizamos el programa de MATLAB® cambiando los valores de la planta obtenidos, para estas secciones de igual manera se requieren los mismos parámetros de desempeño y el controlador aplicado es PI por el la dinámica similar, por lo que se procede a realizar su cálculo.

Cuadro 2

Código MATLAB® Utilizado para Cálculo del Segundo Controlador.

```

% Cálculo de Parámetros del Controlador
% Para Secciones 1 y 2 del Sistema
% Tiempo de muestreo y Planta
T = 0.01;
Gs = tf(7.904, [0.0243 1]);
Gz = c2d(Gs, T);
% Parametros de desempeño
MP = 1;
ts = 0.25;
xi = sqrt(1/((pi^2/(log(MP/100))^2)+1));
Wn = 4/(ts*xi);
% Calculo de raices
s1 = -xi*Wn + 1i*Wn*sqrt(1-xi^2);
s2 = -xi*Wn - 1i*Wn*sqrt(1-xi^2);
% Polos digitales
z1 = exp(s1*T); z2 = exp(s2*T);
[n d] = tfdata(Gz, 'v');
b1 = n(2); a1 = d(2);
% Calculo de parametros del controlador
k1 = (1-z1-z2-a1)/b1;
k2 = (z1*z2+a1)/b1;
% Controlador discreto
Gcz = tf([k1 k2], [1 -1], T);
glc = feedback(Gz*Gcz, 1);
step(glc)

```

```

Transfer function:
-0.01182 z + 0.02382
-----
z - 1

```

Figura 52. Función de Transferencia de Secciones 3 y 4 en Lazo Cerrado.

De igual manera para las secciones 3 y 4 se obtuvieron resultados esperados con el cumplimiento de los parámetros de desempeño, y con un controlador que regula la salida con un máximo impulso de 1.03% y se estabiliza a los 0.217 segundos mejorando las características de desempeño impuestas.

$$G_c(z) = \frac{-0.0118z + 0.0238}{z - 1}$$

Ecuación 23. Función de Transferencia Digital del Controlador PID para Secciones 3 y 4.

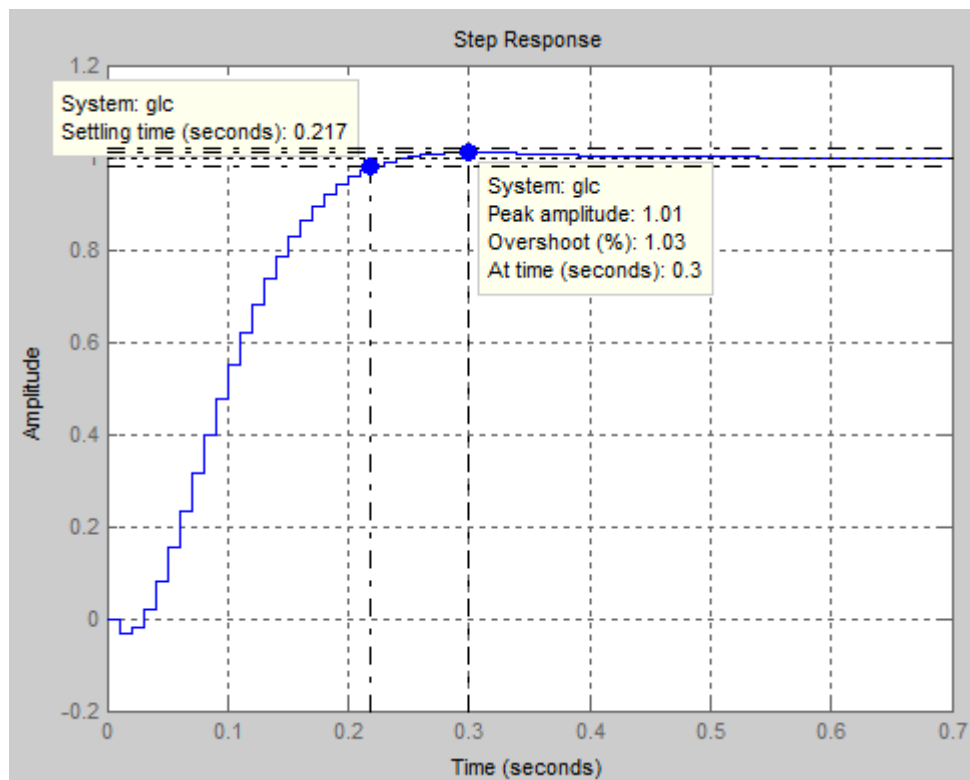


Figura 53. Respuesta con Controlador en Lazo Cerrado Para Secciones 3 y 4.

Para la comprobación del funcionamiento óptimo de estos controladores se implementó los bloques en Simulink de MATLAB® para el envío de consignas relacionadas a las que se enviarán desde el programa práctico, con esto obtenemos los resultados de funcionamiento aproximados a los reales y de ser necesario se puede mejorar el desempeño del controlador variando los coeficientes, se debe considerar que la consigna que ingresa al sistema no está en unidades de Luxes sino en el mismo rango de 0 a 2046 obtenido mediante las ecuaciones inversas a las obtenidas para luminosidad, con esto el sistema de control realiza su trabajo en las magnitudes requeridas, el algoritmo de control es realizado por el microcontrolador por lo que el computador se utiliza solamente para envío de consigna y visualización de datos en tiempo real del sistema. Para realizar el proceso de transformación de luxes a conversor de 0 a 2046 se realiza una aproximación de ecuaciones basada en los datos muestreados para obtención de luminosidad.

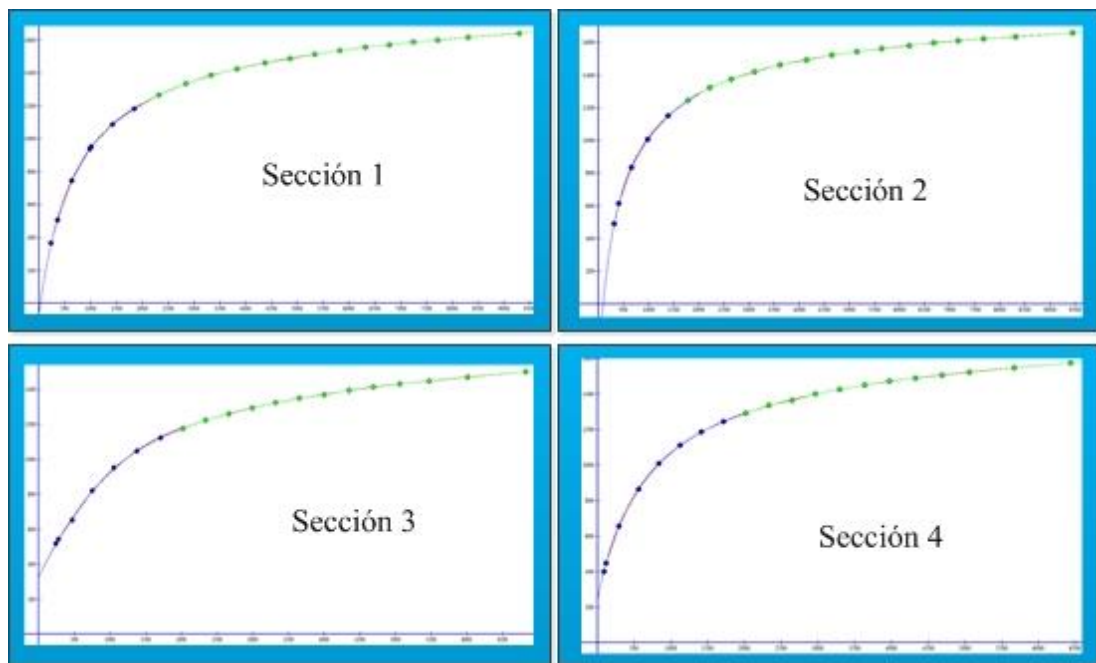


Figura 54. Formas de Curvas de Luminosidad (Lux) vs Luminosidad (0 a 2046).

De los datos obtenidos realizamos el proceso de interpolación de los valores que corresponden a la luminosidad en luxes y su equivalente en el conversor de 0 a 2046, con esto podemos realizar la transformación para poder realizar el envío de la consigna correspondiente del computador hacia el sistema de control. Dichas ecuaciones están implementadas en el software en Java™ el cual se encarga del envío a través de Bluetooth de dichos datos y de igual manera realiza la transformación de datos recibidos a luxes.

Con esto se puede establecer los valores finales con los que trabaja el sistema de control tanto en el terminal del sistema como en el computador, para completar el lazo de control se requiere de la consigna, está en el software de usuario será ingresada en luxes e internamente se transforma, teniendo como resultado el envío del dato de consigna requerido por el sistema de control listo en el microcontrolador sin necesidad de que este realice transformaciones, el Controlador trabaja una señal de error que es la resta entre la consigna y el valor sumado de los dos sensores por sección, resultando un valor de 0 a 2046 igualmente, y mediante la ecuación de control se obtiene un valor que varía en 10 bits, con diferencia que para el

controlador de secciones 1 y 2 es de 0 a 484 y para el controlador de secciones 3 y 4 es de 0 a 200.

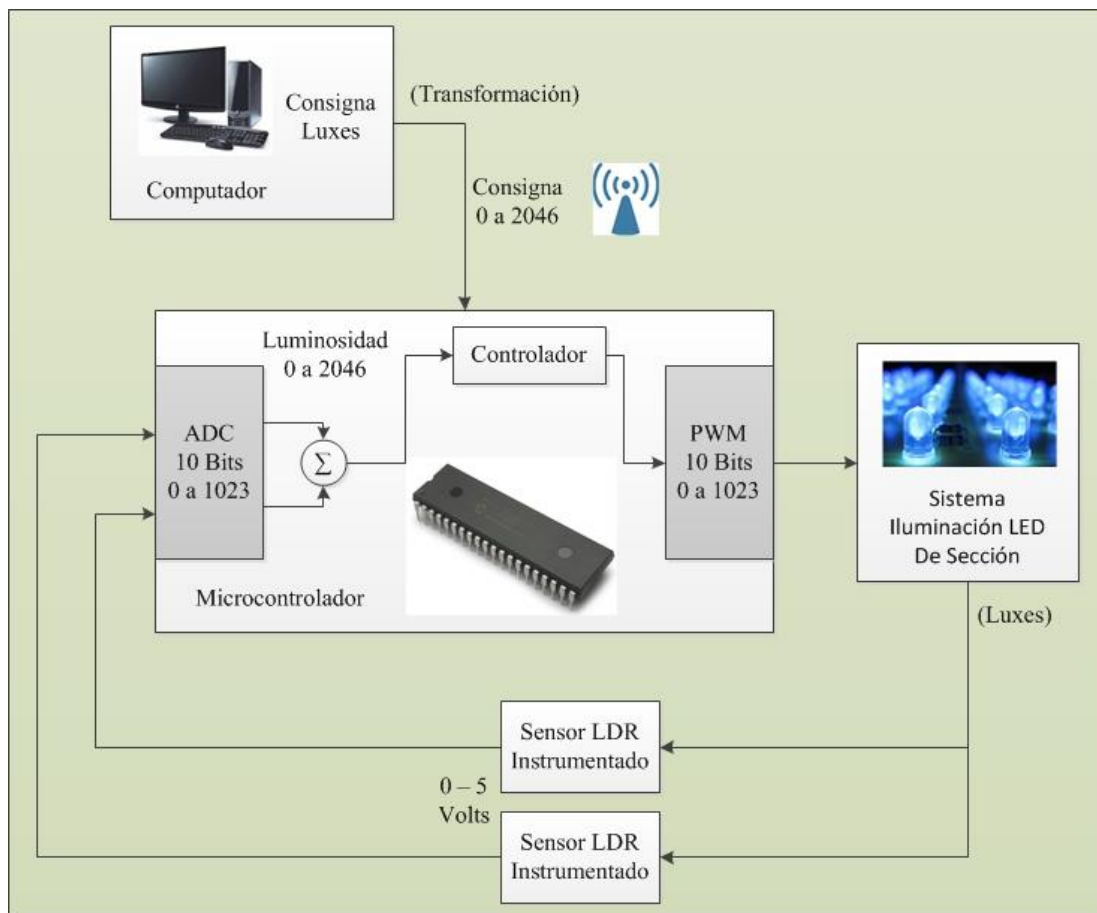


Figura 55. Diagrama de Sistema de Control.

Mediante Simulink de MATLAB® se ingresó una consigna de aproximadamente 1000 luxes equivalentes a 1006 para los valores de sección 1, y un valor de 924 para las sección 3, con esto verificamos que el sistema responda efectivamente con los controladores diseñados, el modelo de Simulink consta de la función de transferencia de las secciones correspondientes en el tiempo, y el controlador en el dominio discreto, requiriendo de retenedores de orden cero que cumplen la función de simular un conversor digital a analógico y viceversa a la entrada y salida de la función de transferencia del controlador.

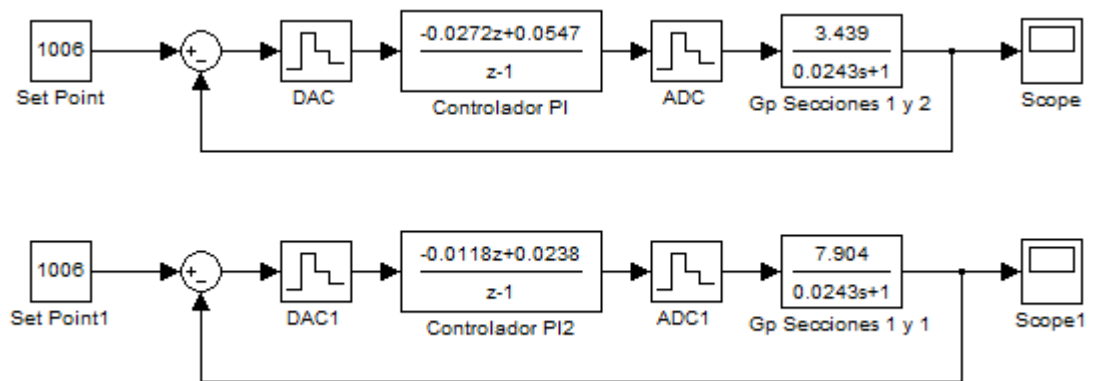


Figura 56. Diagrama de Bloques en Simulink para Simulación de Lazo Cerrado.

Mediante la simulación se obtuvo resultados satisfactorios, estableciéndose la señal de salida en los 250 milisegundos establecidos como parámetro de desempeño y un sobre impulso de 1%, la oscilación generada al iniciar la acción de control es mínima y no repercute en el desarrollo de la dinámica del sistema, para ambas secciones se obtiene resultados similares con un poco menos de oscilación negativa mayor para las secciones 1 y 2.

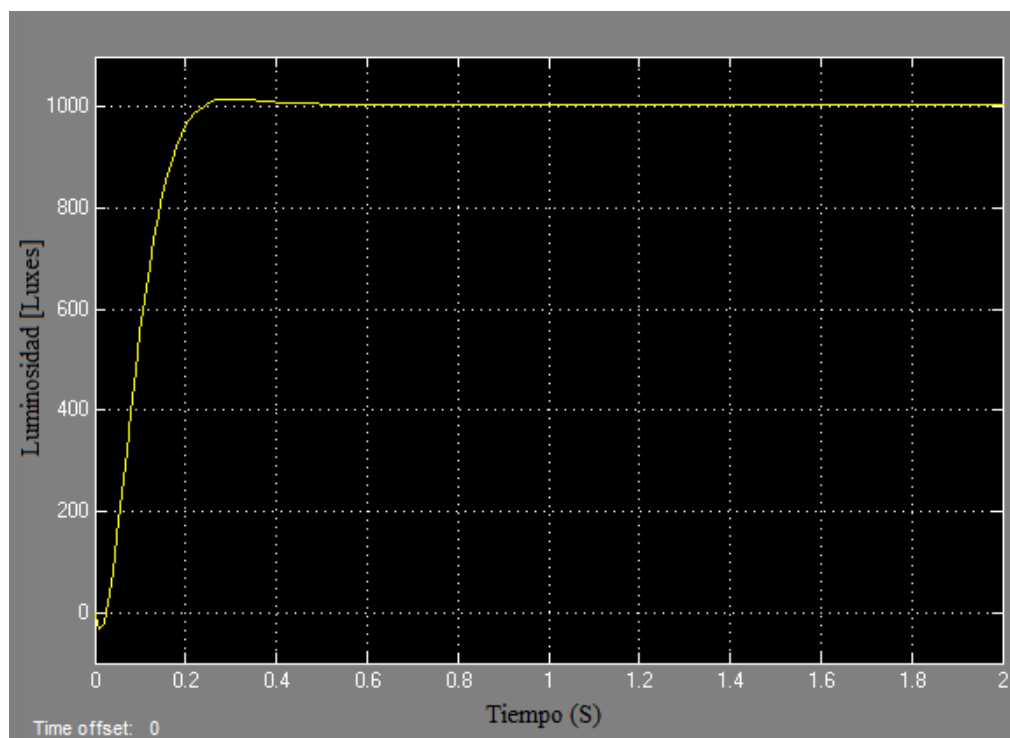


Figura 57. Respuesta Obtenida Para la Sección 1.

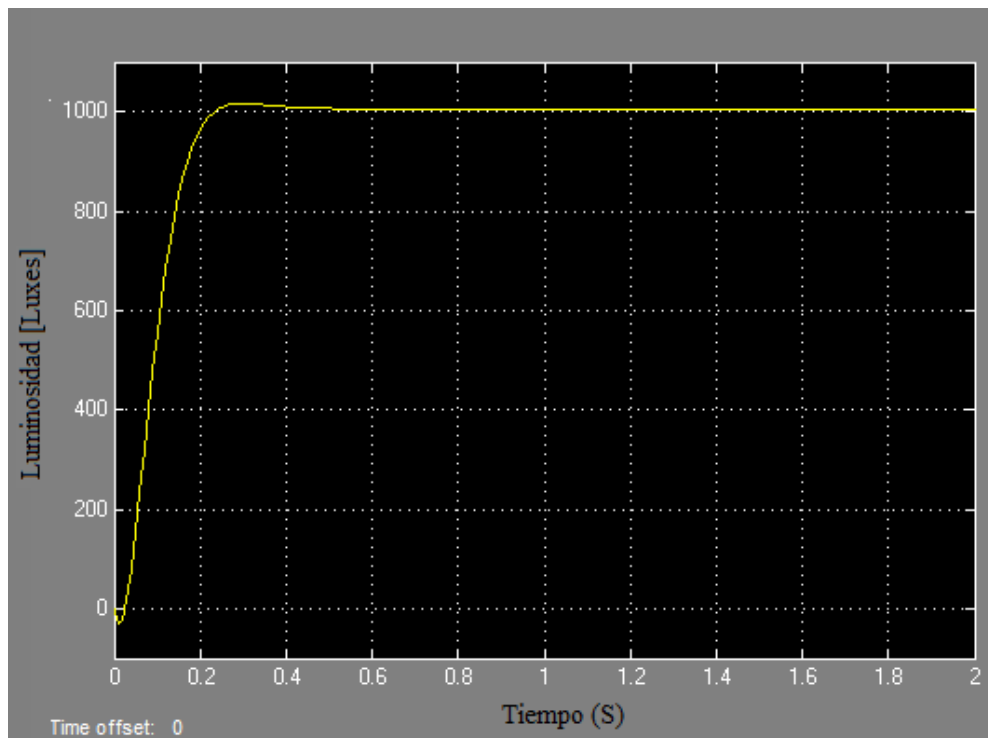


Figura 58. Respuesta Obtenida para la Sección 3.

Los resultados obtenidos por los controladores PI diseñados son óptimos y no requieren de la sintonización adicional en sus coeficientes, por lo que se procedió con el desarrollo de los algoritmos correspondientes utilizando estos coeficientes para los dos controladores correspondientes por secciones que difieren en el color de las lámparas LED.

4.3. Descripción de Diagramas Eléctricos

El circuito eléctrico con todos los dispositivos de entrada y salida consta de varias secciones, la primera es la de los sensores, conformada por los circuitos de instrumentación para las LDR y sensores DHT-22 para medición de temperatura y humedad.

La segunda es la de los actuadores, donde se encuentra los transistores IRFZ44N que conmutan el paso del voltaje suministrado por el convertidor Buck hacia cada

lámpara LED y finalmente el sistema central conformado por los microcontroladores PIC18F4550 y PIC16F882 comunicados por I2C, en esta sección también se encuentra el módulo Bluetooth HC-06 para envío y recepción de datos inalámbrico y el interruptor que controla el modo de operación.

Para suministro de voltaje de sensores y sistema central se cuenta con un regulador de tensión LM7805 y para la sección de actuadores se trabaja con los voltajes suministrados por los convertidores los cuales toman como fuente de alimentación 12 volts de la fuente principal de todo el sistema.

Revisar Anexo 1: Diagramas Eléctricos

4.4. Descripción de Interconexiones del Sistema

Para dar facilidad en la interconexión de los elementos de todo el sistema a continuación se presentan diagramas separados en diferentes secciones dependiendo de la funcionalidad que tengan con respecto al sistema de control, estas secciones son la de elementos de entrada, en los cuales existe la interconexión de sensores LDR, DHT-22, Potenciómetros para control manual de luminosidad, módulo Bluetooth HC-06 e interruptor de control de modo de operación. La siguiente sección es la de elementos de salida en los cuales se encuentran los transistores con la etapa de potencia para las lámparas LED.

Cada sección de entrada cuenta con el regulador de 5 volts el cual es el mismo para todos y de igual manera el microcontrolador principal PIC18F4550, adicionalmente existe la interconexión entre los microcontroladores para la comunicación I2C y sus osciladores externos.

Revisar Anexo 2: Diagramas de Interconexiones.

4.5. Desarrollo y Especificaciones de Software

4.5.1. Software desarrollado en la Plataforma Java™

El sistema electrónico de control trabaja continuamente de forma independiente en todo momento, sin embargo para complementar las tareas que deben ser realizadas por el usuario se requiere del software implementado en la computadora. Este software ha sido desarrollado bajo la plataforma Java™, la cual facilita la realización del trabajo por su flexibilidad con respecto a poder utilizar librerías de terceros con total libertad, un lenguaje de programación orientado a objetos que permite la optimización del consumo de memoria del computador en ejecución y el punto más importante es la posibilidad de realizar el desarrollo de aplicaciones sin necesidad de pago de licencias ya que Java™ trabaja bajo la Licencia Pública General de GNU que permite a los desarrolladores y usuarios finales compartir, modificar, estudiar y utilizar software de terceros.

La aplicación desarrollada para el proyecto hace uso de dos librerías de terceros, ambas suministradas por sus creadores, la primera con la finalidad de establecer el enlace entre Java y MySQL y la segunda para realizar el envío y recepción de datos serial con el protocolo RS-232. Estas librerías son utilizadas debido a que Java tiene muy pocas prestaciones para trabajar con lenguaje nativo y de bajo nivel en el computador por lo que estas librerías implementan las funcionalidades nativas requeridas utilizando una Interface Nativa de Java (JNI) basada en lenguaje C++.

Para este proyecto se utilizó el Entorno de Desarrollo Integrado (IDE) NETBEANS que nos facilita la realización del proyecto y la compilación del mismo con una interfaz gráfica amigable y siendo libre y gratuito. El proyecto se desarrolla dentro de este IDE que nos permite su compresión generando un programa portable que puede ser fácilmente ejecutado en otros computadores que tengan instalado Java™.

El proyecto requiere de un software que conste de tres funcionalidades principales que son el Control, Monitoreo y Base de Datos. En la funcionalidad de control se debe poder establecer por sección el valor de luminosidad en luxes y el tipo de especie colocada; El monitoreo debe servir como retroalimentación para el usuario final, teniendo indicadores tanto numéricos como visuales sobre las tres variables principales involucradas que son temperatura, humedad y luminosidad por sección del sistema, y también un indicador del modo de operación del sistema; tanto el monitoreo como control están relacionados por sus variables. La funcionalidad de base de datos involucra dos aspectos, el primer aspecto es el almacenamiento de información la cual es el estado de las variables del sistema para generar un historial y el segundo aspecto es la búsqueda de dicha información y su filtración con el fin de poder realizar estudios.

Java es un lenguaje de programación orientado a objetos, por lo que trabaja de una manera más eficiente si los requerimientos del programa están divididos en clases que contengan procesos y algoritmos relacionados con cada tarea que tiene que realizarse. Adicionalmente en Java se implementa el trabajo por paquetes, esto con el fin de crear una distinción entre las funcionalidades del programa, cada paquete contiene clases, y la idea de su utilización es que las clases contenidas en un paquete tengan relación con respecto a las actividades que realizan, para este proyecto se ha creado 5 paquetes diferentes cuyos fines están distribuidos de la siguiente manera:

- *Comunicaciones*, este paquete relaciona toda actividad que involucre el intercambio de información con elementos externos al programa, para este caso esos elementos son el sistema de control electrónico y la base de datos.
- *Controlador*, este paquete relaciona a las actividades que realicen cálculos para obtención de valores, procesos iterativos que deben ejecutarse simultáneamente y organizadores de la información que requiera el programa.
- *Imágenes*, este paquete contiene todas las imágenes utilizadas en el desarrollo de la interfaz gráfica en extensión JPG o PNG.

- *Interfaz*, este paquete contiene las clases en las cuales se desarrolla las ventanas de las interfaces gráficas de usuario con cada uno de sus componentes.
- *Modelo*, este paquete relaciona todas las características que reúne el sistema con sus respectivas variables, que pueden ser agrupadas en clases con el fin de formar un modelo que puede ser utilizado para varios fines de establecimiento y obtención de información.

En el ámbito de las comunicaciones externas del programa primeramente se tiene la base de datos MySQL de Oracle la cual es instalada en el sistema operativo con una configuración de desarrollo, la cual consume una cantidad media de memoria del computador dependiendo del tráfico generado con ella, existen varias configuraciones desde cuando se necesite un servidor dedicado de base de datos hasta un simple cliente que accede a una base de datos de un servidor para utilizar su información.

Con la configuración de desarrollo establecida se puede hacer utilización de varios programas más en el computador, siendo la base de datos un servicio en segundo plano que gestiona la memoria RAM del computador dependiendo de los accesos que se generen hacia ella, para este proyecto esta es la configuración adecuada ya que en primera instancia el software desarrollado es el único que tendrá acceso a la base de datos y con posteriores implementaciones que se podrían hacer en teléfonos celulares y otros computadores seguiría siendo adecuada por que existirían pocos accesos del personal que trabaja dentro de la empresa.

Las bases de datos son gestionadas con Lenguaje de Consulta Estructurado (SQL) mediante el cual se puede realizar la creación de bases de datos, tablas dentro de ellas y consultas de la información con una posibilidad muy amplia de filtrado, que para el caso de MySQL cuenta con InnoDB que es uno de los motores de búsqueda más potentes de software libre existentes.

Para este proyecto se tiene una sola base de datos llamada “*germoplanta*”, que contiene una tabla denominada “*camara*” en la cual se almacenará la información del sistema cada media hora como se estableció en los requerimientos del sistema para que se pueda realizar el estudio del crecimiento de las especies, la información de la tabla es el año, mes, día, fecha junta, hora, minuto, sección, especie y valores de luminosidad, temperatura y humedad que son almacenados en el instante que el programa en Java lo decida y están distribuidos en varios campos con diferentes tipos de datos acordes a cada uno, dichos campos y tipos de datos están descritos en la siguiente tabla.

Tabla 14.

Descripción de Campos de Tabla *camara* de la Base de Datos *germoplanta*.

Campo	Tipo de Dato
anio	YEAR
mes	VARCHAR (10)
dia	TINYINT UNSIGNED
fecha	DATE
hora	TINYINT UNSIGNED
minuto	TINYINT UNSIGNED
seccion	TINYINT UNSIGNED
especie	VARCHAR (20)
luminosidad	SMALLINT
temperatura	FLOAT(4,1)
humedad	FLOAT(4,1)

Oracle incluye en la instalación de MySQL o también pueden ser descargados desde su página web varios conectores para diferentes lenguajes de programación entre ellos el específico para Java™; dicho conector es una librería que puede ser incluida en los proyectos desarrollados con el fin de establecer un enlace que permita el intercambio de información entre Java y MySQL utilizando el propio lenguaje SQL facilitando mucho su gestión.

El segundo ámbito de las comunicaciones externas es el envío y recepción de datos a través de un puerto serial utilizando protocolo RS-232, para iniciar el enlace entre el sistema de control electrónico con módulo Bluetooth y el computador, tiene que realizarse el emparejamiento en el sistema operativo agregándolo a la lista de dispositivos del computador, al realizarse este procedimiento se creará un nuevo servicio del dispositivo HC-06 el cual es un puerto serial virtual.

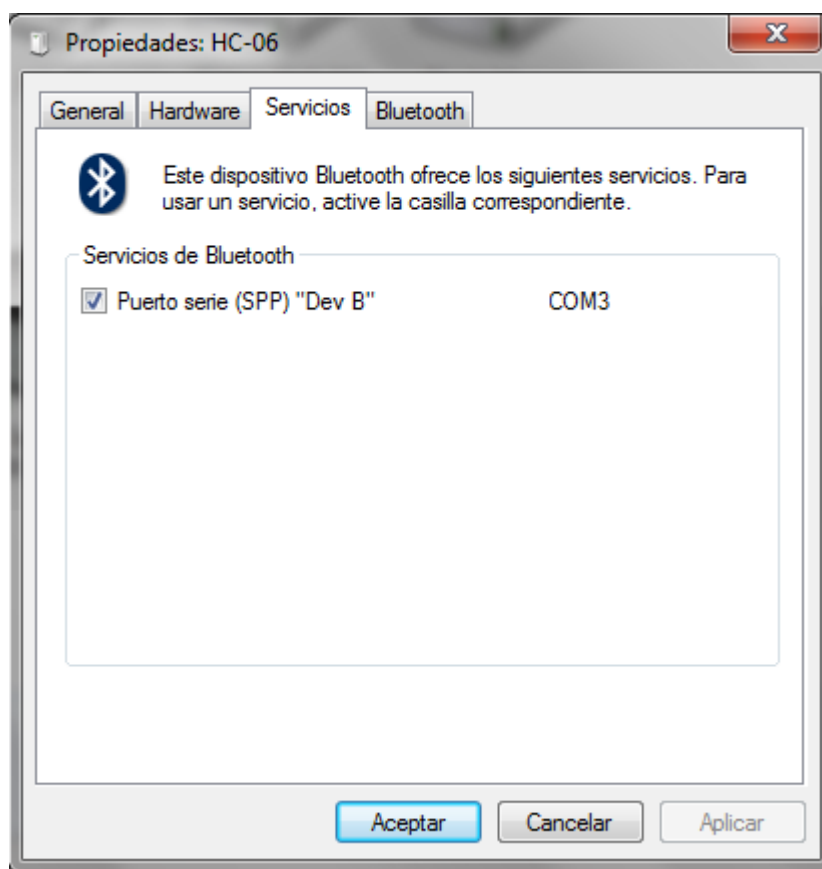


Figura 59. Servicio de Puerto Serial Virtual Generado por módulo HC-06.

La comunicación que se realiza a través del puerto creado trabaja con el protocolo RS-232 y basta con iniciar el enlace con dicho puerto para cerrar el enlace de datos; Para realizar dicho enlace se utilizó la librería externa GiovyNetDriver suministrada por el Grupo de Soluciones Electrónicas Giovynet, esta librería ha sido desarrollada para utilización libre y gratuita con fines de utilización de puertos seriales y paralelos con la plataforma Java™.

La librería `GiovyNetDriver` nos facilita la configuración de parámetros del puerto serial a utilizar para establecer un enlace, además que también nos permite iniciar e interrumpir la comunicación del puerto y evitar conflictos con el sistema operativo. A pesar de existir muchas librerías para el uso de comunicación serial desde Java la utilización de esta es por sus métodos para envío y recepción implementados con capacidad de enviar y recibir cadenas de caracteres, esto es importante ya que el microcontrolador tiene implantada únicamente una función para recibir un carácter mediante la interrupción de hardware de tráfico en su módulo USART necesitando de un algoritmo acumulador de caracteres y que el computador envíe su información utilizando este mismo tipo de dato, para el caso del envío es capaz de manejar cadenas de caracteres completas inclusive con tipos de dato diferente en ellas, siendo en este caso necesaria la implementación de un algoritmo acumulador en Java.

Estos dos ámbitos de comunicaciones son los únicos que requieren de librerías externas desarrolladas por terceros para poder ser llevadas a cabo, dichas librerías se agregan al proyecto para que puedan ser utilizadas por las clases implementadas en el paquete de comunicaciones.

Netbeans IDE nos proporciona como medio de ayuda el árbol del proyecto donde se detallan los paquetes con clases contenidas mediante el cual se puede entender más explícitamente la distribución del proyecto, el contenido del paquete *Imagenes* no es relevante ya que este solamente contiene las imágenes que utiliza el programa en su interfaz gráfica.

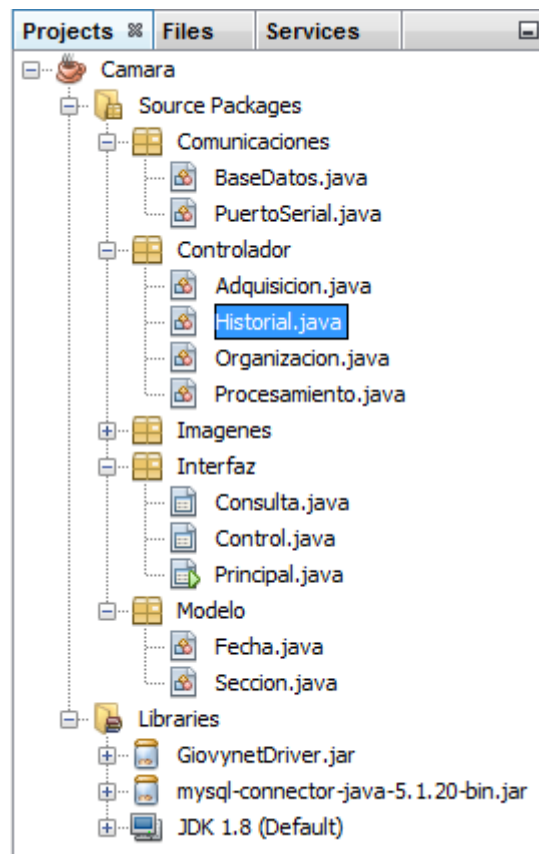


Figura 60. Árbol del Proyecto Desarrollado en Netbeans IDE.

La distribución por paquetes está orientada a una mejor organización del programa mas no a limitar la flexibilidad entre clases, es decir que las clases contenidas por un paquete pueden hacer uso de los métodos implementados en otra clase de otro paquete, para este proyecto la mayoría de clases con sus paquetes son utilizados por las clases implementadas en el paquete Interfaz, debido a que este es el que inicia el programa inicializando todos los objetos de las clases.

Paquete Comunicaciones

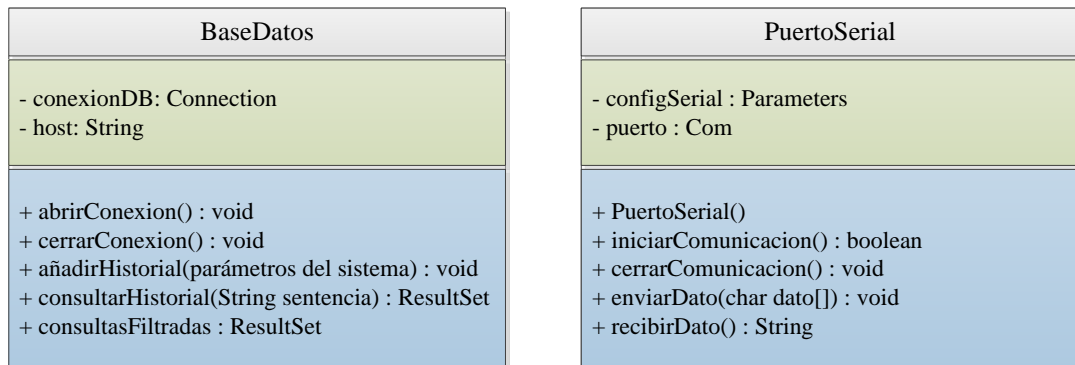


Figura 61. Diagrama Lenguaje Unificado Modelado Paquete Comunicaciones.

La clase *BaseDatos* realiza todas las operaciones con respecto a la base de datos, contiene dos variables privadas, *conexionDB* es el objeto en el cual se almacena el enlace entre Java y MySQL si es que este se logra establecer, la variable *host* contiene la dirección IP del computador en el cual se encuentra instalada la base de datos. Esta clase tiene cuatro métodos base para operaciones y los demás son la formación de las sentencias SQL con los parámetros requeridos de filtrado.

- *abrirConexion*, este método realiza la llamada de la librería externa para generar el enlace con la base de datos en MySQL en el host especificado, si la comunicación es correcta se la asocia al objeto *conexionDB*.
- *cerrarConexion*, implementa las funciones requeridas para cerrar la conexión con la base de datos en MySQL, el enlace con una base de datos es similar al de un cliente y servidor, por lo que requiere que se realice la apertura y cierre de la conexión.
- *añadirHistorial*, reúne todos los parámetros del sistema que serán almacenados en la base de datos para generar la sentencia SQL y ejecuta la actualización en la base de datos, añadiendo una nueva fila de datos.
- *consultarHistorial*, este método recibe como parámetro la sentencia SQL ya escrita para que pueda hacer llamado a la base de datos y ejecutar la consulta basada en dicha sentencia, retornando un objeto que contiene la información requerida.

- *consultasFiltradas*, son varios métodos implementados que reciben como parámetro la sentencia SQL con los parámetros de filtración en ella e internamente haciendo la llamada del método *consultarHistorial* mediante el cual se obtiene la información de la base de datos.

La clase *PuertoSerial* realiza las operaciones de entrada y salida con el puerto serial virtual generado por el módulo Bluetooth HC-06, por tanto hace uso de los métodos implementados en la librería *GiovynetDriver* para establecer dicha comunicación, tiene el objeto privado *configSerial* que es el que contendrá la configuración del puerto que para este caso son los parámetros relacionados con el protocolo RS-232 y el objeto privado *puerto* es el que asociara la comunicación con el puerto serial una vez inicializado.

- *PuertoSerial*, este es el método constructor de la clase, en él se realiza la inicialización del objeto *configSerial* con la configuración de los parámetros para el puerto serial y el número de puerto que debe estar acorde al descrito por el administrador de dispositivos del sistema operativo.
- *iniciarComunicacion*, realiza la llamada al método para establecer el enlace con el puerto serial de la librería externa y retorna una variable booleana que es verdadera o falsa si se establece correctamente o no la comunicación respectivamente.
- *cerrarComunicacion*, este método realiza el cierre de la conexión con el puerto serial del módulo HC-06 sin tomar consideraciones de si hay una transmisión actual en el puerto.
- *enviarDato*, este método recibe como parámetro un arreglo de caracteres que debe tener una dimensión de 6 posiciones que es lo establecido en el microcontrolador, dicho dato contiene el identificador de sección, la luminosidad a establecer, y el indicador de fin de dato.
- *recibirDato*, este método es el encargado de empezar a recibir datos desde que detecta el carácter que indica inicio de dato hasta que detecte el carácter de fin de dato, esta actividad la realiza en un bucle y va acumulando el dato

sin indicadores de inicio y fin en una cadena String que es retornada, dicha cadena es el dato enviado por el microcontrolador.

Paquete Modelo

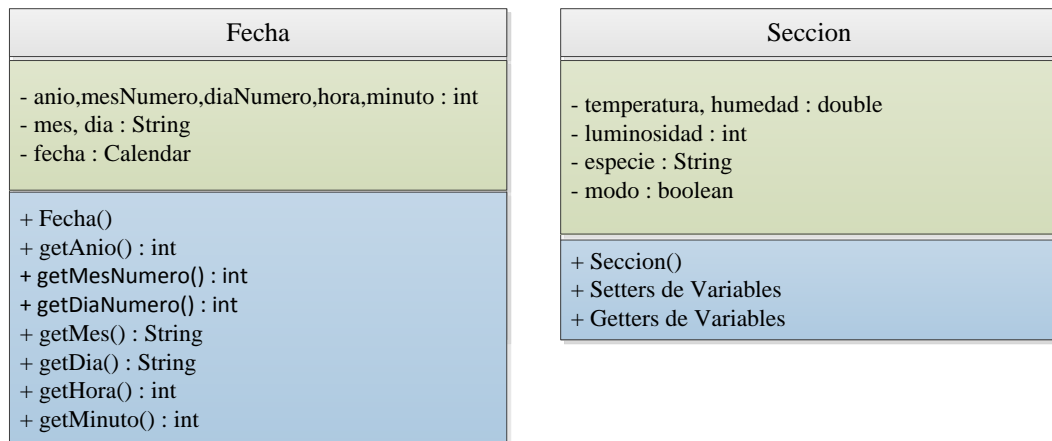


Figura 62. Diagrama Unificado de Modelado Paquete Modelo

La clase *Fecha* tiene como finalidad obtener todos los datos relacionados a la fecha actual del sistema operativo, esto se hace mediante el uso de la clase *Calendar* que incorpora los métodos nativos para la obtención, posee variables privadas que almacenan los datos obtenidos de la fecha.

- *Fecha*, es el método constructor que se encarga de la inicialización de todas las variables de la clase.
- *getAnio*, este método hace uso de la clase *Calendar* para obtener el año del sistema operativo y lo retorna en un entero.
- *getMesNumero*, este método obtiene el número del mes de 1 a 12 del sistema operativo y lo retorna en un entero.
- *getDiaNumero*, este método obtiene el número del día del mes y lo retorna en un entero.
- *getMes*, este método hace uso del método de obtener el número del mes y en base a eso retorna una cadena de caracteres con la palabra correspondiente al mes.

- *getDia*, este método obtiene el día de la semana y retorna una cadena de caracteres correspondiente al día.
- *getHora*, obtiene la hora del sistema operativo y la retorna en un entero.
- *getMinuto*, obtiene el minuto del sistema operativo y lo retorna en un entero.

La clase *Sección* es la que representa el modelo de todas las variables que se tiene en una sección, con lo que obtenemos una clase que puede ser utilizada en varios objetos y almacenar los valores que son recibidos a través del puerto serial utilizando la clase *PuertoSerial*. Además de almacenar los valores de la sección también pueden ser obtenidos para utilización de las clases que lo requieran.

- *Seccion*, es el método constructor que inicializa las variables de la clase que son *temperatura, humedad, luminosidad, especie y modo*.
- *Setters de Variables*, al tratarse de una clase que representa un modelo se tiene que establecer los valores a sus variables privadas haciendo uso de métodos setter.
- *Getters de Variables*, los métodos getter son implementados a todas las variables de la clase para obtener los valores desde otras clases.

Las clases del paquete modelo son utilizados por la clase principal para definir objetos que pueden ser utilizados para varias operaciones, para el caso de la sección en este se guardan las variables del sistema en cuatro diferentes objetos de este tipo con principio de encapsulamiento, requiriendo métodos getter y setter para acceder a la información contenida.

Paquete Controlador

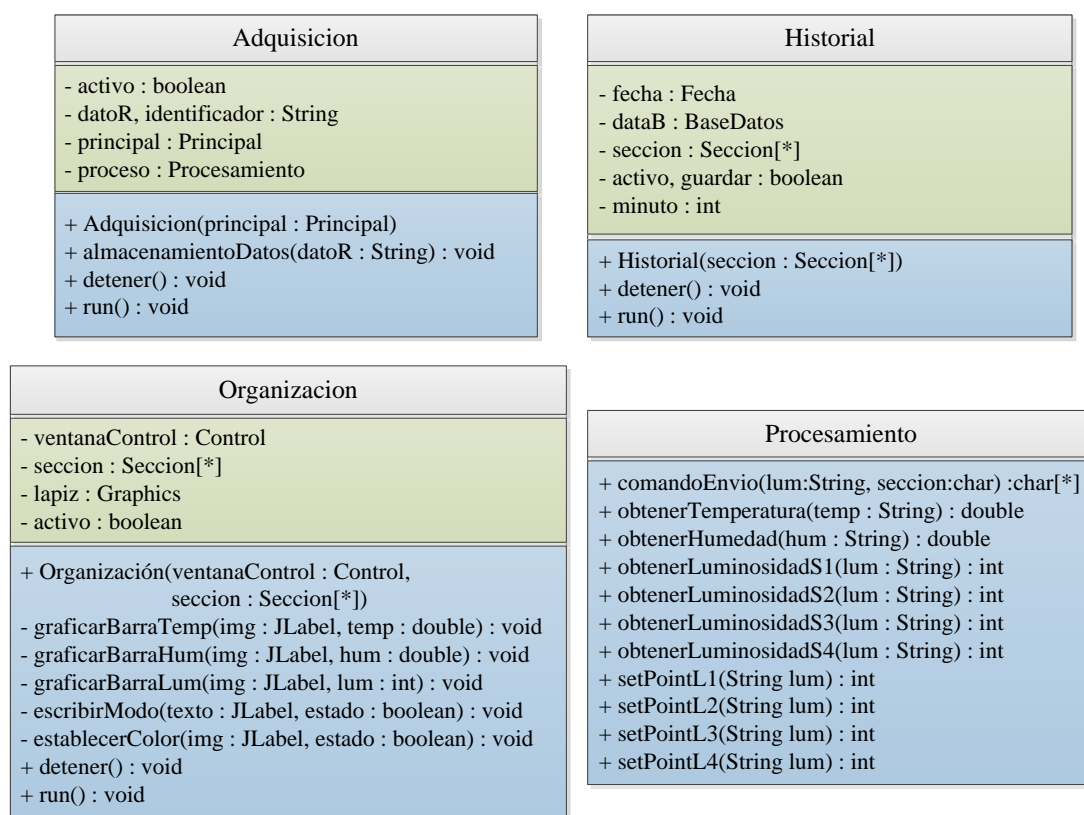


Figura 63. Diagrama de Lenguaje Unificado de Modelado Paquete Controlador.

Las clases *Adquisición*, *Historial* y *Organización* heredan la capacidad de la clase *Thread*, que permite su ejecución en segundo plano de manera concurrente, es decir que estas clases realizaran su trabajo continuamente y repetitivamente cuando se las inicie mientras que el programa principal se ejecuta.

La clase *Adquisición* es la encargada de realizar la lectura constante en tiempo real del puerto serial virtual, recibiendo y clasificando la información para almacenarla donde corresponda, para esto se apoya de la clase *Seccion* en la cual se establece el modelo para las variables de los sensores que tiene cada sección del sistema, por lo tanto esta clase hace llamado de la clase *PuertoSerial* y *Seccion* indirectamente por la clase *Principal* ya que es en esta donde se inicializan todas las clases de todos los paquetes, la clase principal es asociada al objeto privado *principal*. Como la información que se recibe se encuentra en una cadena de

caracteres se requiere de que sea procesada para realizar la clasificación esto se lo realiza con el apoyo de la clase *Procesamiento* en el objeto *proceso*, y finalmente el bucle infinito de la clase está controlado por la variable booleana *activo* que refleja el estado del hilo multitarea de la clase.

- *Adquisicion*, es el método constructor de la clase que es el encargado de inicializar las variables y asociar los objetos de las clases entrantes *Procesamiento* y *Principal*.
- *almacenamientoDatos*, este método recibe como parámetro la cadena de caracteres recibida desde el puerto serial, y se encarga de clasificar la información contenida en ella separando e identificando los datos, y haciendo uso de los métodos implementados en la clase *Procesamiento*.
- *detener*, este método realiza el cambio de la variable *activo* y llamando el método de detención del hilo, cortando toda actividad iterativa de la clase.
- *run*, este método es heredado de la clase *Thread*, y contiene el bucle repetitivo de la clase, en ella se programan los procesos que deben realizarse de manera continua, para este caso es la recepción de la cadena de caracteres a través del puerto serial y la clasificación de la información que contiene.

La clase *Historial* es la encargada de verificar continuamente el tiempo del sistema operativo, y realizar el almacenamiento de las variables del sistema de la cámara de crecimiento en la base de datos MySQL cada media hora utilizando la clase *BaseDatos* y para obtener datos hace uso de la clase *Fecha* para la hora y fecha y *Seccion* para los datos de magnitudes de la cámara de crecimiento. Esta clase cuenta con la bandera *activo* para control del bucle infinito y *guardar* para controlar cuando debe almacenarse el historial en la base de datos.

- *Historial*, este es el método constructor de la clase que inicializa las variables de la clase y asocia el objeto *seccion* que es enviado por la clase principal donde se inicializan todas las clases.
- *detener*, es el método que sirve para detención del bucle repetitivo de la clase cambiando el valor de la bandera.

- *run*, en este bucle repetitivo se obtiene cada 20 segundos el minuto del sistema operativo para cuando de esta manera sea 0 o 30 se proceda a guardar los datos de ese instante en las secciones en la base de datos haciendo uso de los métodos de la clase *BaseDatos*.

La clase *Organizacion* es la encargada de realizar los efectos visuales sobre la interfaz del usuario, de manera que organiza los cuadros de texto en ella colocando los valores que correspondan sean temperatura, luminosidad o humedad y adicionalmente controlando los gráficos indicadores es decir para que los instrumentos virtuales marquen el valor relacionado con el real en pantalla. Para obtener la información de la cámara de crecimiento se hace uso de la clase *Seccion* que es el modelo con las magnitudes que requiere y se hace uso de la interfaz gráfica de la ventana de Control y Monitoreo para poder hacer uso directamente de los indicadores gráficos de la ventana.

- *Organización*, es el método constructor que inicializa todos los objetos de la clase y asocia los heredados por la clase principal del programa.
- *graficarBarras*, están implementados tres métodos similares los cuales reciben como parámetro el objeto JLabel en el cual está cargada la imagen del indicador gráfico y el valor que tiene obtenido de la cámara de crecimiento y mediante el uso de la clase *Graphics* se realiza el trazo de los indicadores correspondientes, estos métodos se ejecutan en tiempo real actualizando la interfaz gráfica de usuario.
- *establecerColor* y *escribirModo*, estos métodos trabajan en conjunto para un mismo fin, uno de ellos primeramente escribe el texto en la interfaz gráfica sobre el estado del sistema y el otro establece un color rectangular asociado siendo amarillo si está en modo manual y verde si está en modo automático.
- *detener*, método que realiza la detención del bucle repetitivo de la clase haciendo cambio del estado de la bandera y llamando al método stop.
- *run*, este método implementa el bucle repetitivo de la clase controlado por la variable *estado*, este bucle no tiene condiciones y realiza en cada lapso la escritura de los valores en los cuadros de texto de la información

correspondiente al sistema y luego realiza todos los gráficos para los instrumentos virtuales de la interfaz gráfica.

La clase *Procesamiento* está centrada en la realización de cálculos matemáticos asociados a los valores recibidos desde el microcontrolador, en ella no se realiza ningún bucle repetitivo, solamente se implementan los métodos que permiten la obtención de los valores que debe ver el usuario final, como por ejemplo el valor en código digital de la luminosidad recibido se transforma en luxes y al ingresar el valor de consigna de luxes este se transforma en el código digital para ser enviado al microcontrolador, en esta clase se encuentran implementadas las ecuaciones por secciones obtenidas para los sensores de luminosidad.

- *comandoEnvio*, este método recibe como parámetro un entero correspondiente a un valor en luxes, su finalidad es recibir la consigna ya convertida en código digital y establecer una cadena de 6 caracteres con los valores que tienen que ser enviados hacia el microcontrolador, estableciendo así los 4 caracteres correspondientes al valor, el identificador de sección y el carácter de envío de dato.
- *obtenerTemperatura* y *Humedad*, estos dos métodos implementan la obtención del valor de temperatura y humedad mediante la división del valor recibido para 10, esto porque el microcontrolador envía estos dos datos de la manera que el sensor los envía con un valor binario.
- *obtenerLuminosidad*, estos son cuatro métodos que tienen como parámetro el valor digital de luxes recibido por el microcontrolador, y en cada uno se aplican las respectivas ecuaciones por intervalos calculadas para cada sección, obteniendo el valor de la luminosidad en luxes de cada una.
- *setPoint*, son cuatro métodos que realizan el proceso inverso a los métodos *obtenerLuminosidad* ya que toman el valor ingresado por el usuario en la interfaz gráfica en luxes y se realiza el cálculo para obtener su equivalente en código digital de 0 a 2046 de luminosidad con el cual trabaja el sistema de control electrónico.

4.5.2. Diseño de Interfaz Gráfica del Usuario

El desarrollo de las ventanas en las que se mostrará la información del sistema está basada en las funcionalidades generales del sistema de control, monitoreo y base de datos, cada una con sus características específicas pero teniendo en cuenta que la interfaz tiene que ser fácil de comprender a simple vista.

Para obtener una interfaz gráfica con características eficientes se utilizó como guía de elaboración las normas NTP226, NTP659 y NTP241. En ellas se establece principalmente la importancia acerca de la carga mental en el diseño de tareas de la ventana y los mandos y señales con ergonomía que se tiene debe procurar alcanzar para que la experiencia del usuario sea la esperada en la utilización del software de gestión del sistema de la cámara de crecimiento.

Se tiene que minimizar la carga mental que se puede generar en el usuario al utilizar el software en manera extendida, de manera que no tiene que contener elementos que causen cansancio y saturación en la vista del usuario, limitando colores intensos o imágenes muy pequeñas, todo el contenido tiene que tener un tamaño similar para que de esta manera no se tenga que forzar la vista en las secciones del programa. También se debe considerar la ergonomía tanto en las señales que muestra el programa con respecto al estado del sistema y los mandos para su control, estos elementos de la interfaz deben estar proporcionales en sus dimensiones con respecto a las ventanas y elementos que contenga.

El control del sistema cuenta con solamente las consignas de luminosidad y especie de cada sección que son pocas y al estar relacionadas con las variables del monitoreo se estableció una sola ventana para ambas funcionalidades, entre menos ventanas en el cual el contenido pueda ser entendible y amigable es mejor debido a la menor carga mental que se logra en el usuario. Esta ventana divide ambas actividades en dos planos divididos verticalmente, en la parte izquierda se encuentra el control en el cual se tiene los cuadros de texto que tienen que ser llenados con los valores que se quieren obtener en el sistema con una imagen que describe el sistema,

debe evitarse en este aspecto colocar imágenes complejas que dificulten el entendimiento de los mandos. Cada consigna a llenar por sección se establece con botones individuales y se separan por contenedores que facilitan la separación visual de las secciones, estos contenedores se utilizan de igual manera como técnica de división de operación en el diseño de todas las ventanas.

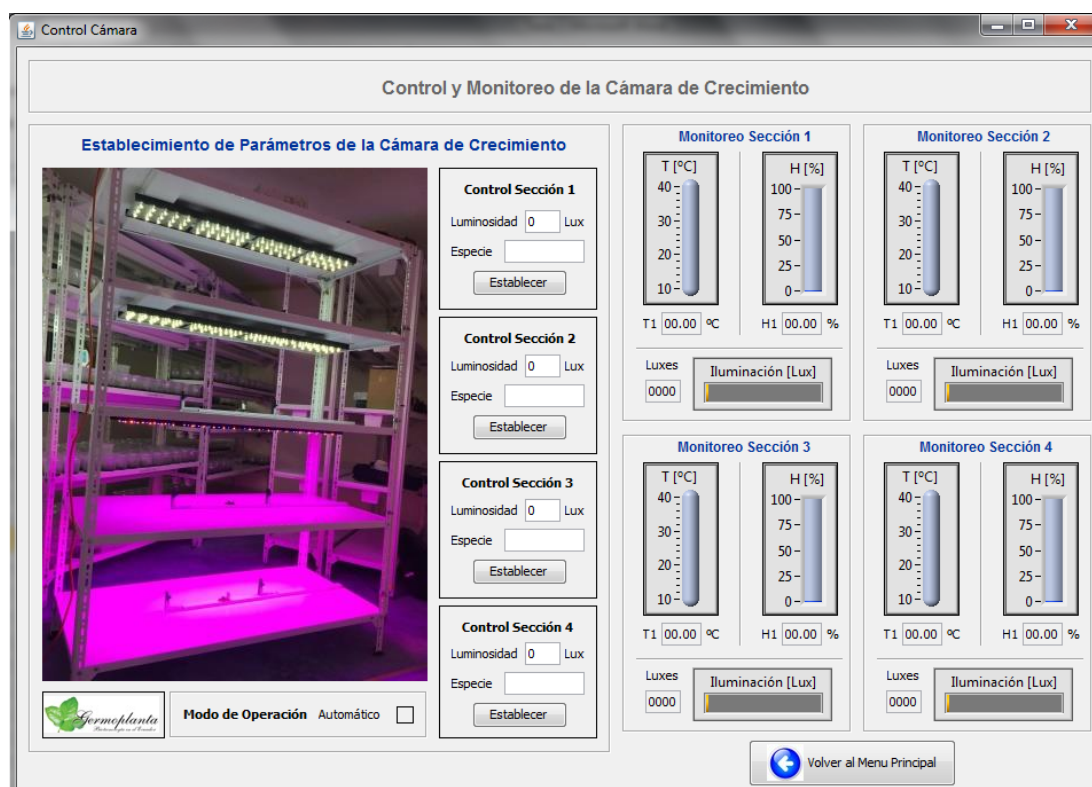


Figura 64. Ventana de Control y Monitoreo del Sistema.

El plano derecho que contiene el monitoreo contiene cuadros de texto no editables donde se muestran las variables en tiempo real del sistema y asociada a cada variable existe un instrumento virtual que representa dicha magnitud mediante gráficos y también un indicador rectangular que indica con texto el estado del sistema; los indicadores gráficos son tomados del software LabView como base y Java realiza los gráficos encima para representar la magnitud.

Para la navegación del programa entre ventanas existentes se estableció que el menú principal es el encargado de acceder a las diferentes ventanas y cada una de ellas vuelve a esta en caso de necesitar ingresar a otra funcionalidad como una

estructura básica de programas de Microsoft Windows, de esta manera se obtiene que el usuario trabaje en un ámbito familiar. El menú principal es la ventana que se ejecuta primeramente y contiene el acceso a cada una de las funcionalidades y un mando que debe ser ejecutado al iniciarse el programa, dicho mando inicia el enlace con el sistema inalámbrico y en caso de no realizarse exitosamente se cierra la comunicación avisando al usuario que verifique el estado del sistema o posibles desconexiones de dispositivos.



Figura 65. Ventana del Menú Principal del Sistema.

La ventana de la Base de Datos contiene las opciones de búsqueda de la información almacenada y la despliega en una tabla que puede ser copiada a otro programa para estudios o modificaciones. Las opciones de búsqueda de información pueden ser de tres diferentes maneras, si el usuario necesita buscar toda la información que se haya podido dar en una cierta fecha o varias, es decir que no solamente se puede buscar la información sucedida en un día, sino que también en un

mes completo, o de igual manera se puede buscar la información de todo el año o filtrar el número de día de todo el año por ejemplo el día 10 de todos los meses y así las combinaciones que puedan darse entre mes y día; también puede adicionar al filtro de fechas la búsqueda por sección en caso de requerir solamente la información de una de ellas y finalmente se puede adicionar a los filtros de fecha uno de especie en caso de buscar los datos almacenados de un cierto tipo de especie.

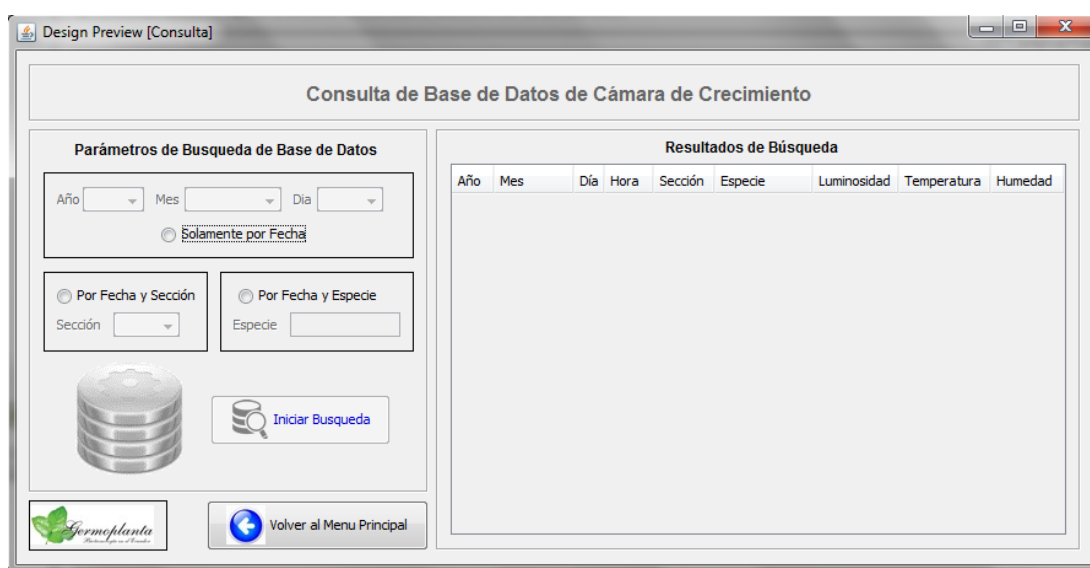


Figura 66. Ventana de Consulta de Base de Datos del Sistema.

Mediante las opciones de búsqueda implementadas el usuario puede encontrar la información de manera más oportuna y rápida, mejorando la calidad del estudio de crecimiento de las especies vegetales para posteriores mejoramientos en base a los mejores patrones que se adapten al crecimiento.

4.5.2. Desarrollo de algoritmo del Microcontrolador.

Los microcontroladores utilizados para el control del sistema de la cámara de crecimiento tienen un bucle repetitivo en el cual se desarrollan sus actividades, el lenguaje de programación que se utiliza para la programación de ambos es C utilizando el compilador CCS. Para el caso del microcontrolador secundario PIC16F882 la tarea principal es realizar la lectura de la información que llega por el

canal I2C y utilizarla para establecer el valor digital correspondiente al ciclo de trabajo de sus salidas PWM. Esta tarea se realiza mediante la interrupción de tráfico en el canal I2C es decir que el bucle solamente establece los valores de salida en caso de generarse un cambio de otro modo estas se mantienen con sus valores anteriores. La utilización de interrupciones en el microcontrolador nos permite obtener una respuesta al instante de generarse el evento para la cual está programada la interrupción teniendo para este caso una facilidad para tratar con la información oportunamente cuando es recibida.

La información que se envía por el canal I2C es de 8 bits y trabaja por posiciones de memoria, es decir para la decodificación se realiza un barrido del buffer del canal y se adquiere la información requerida de las posiciones establecidas que para este caso es la primera y segunda posición, la extracción de la información es realizada en la interrupción y se establece una bandera para que el bucle principal realice el cambio del valor de las salidas PWM, y después de realizarse este cambio se desactiva la bandera esperando que el próximo cambio generado en las salidas sea al producirse la interrupción. El algoritmo de este microcontrolador es sencillo y su finalidad es solo establecer el valor de sus dos salidas involucradas mediante los datos enviados por el microcontrolador principal que es el que realiza el algoritmo de control principal.

El microcontrolador principal PIC18F4550 realiza varias tareas con la finalidad de obtener las funcionalidades del sistema, dado que el lenguaje de programación C es secuencial dichas tareas tienen que realizarse en un orden el cual debe ser el más adecuado dependiendo de la finalidad. Dichas actividades se describen en el diagrama de flujo a continuación.

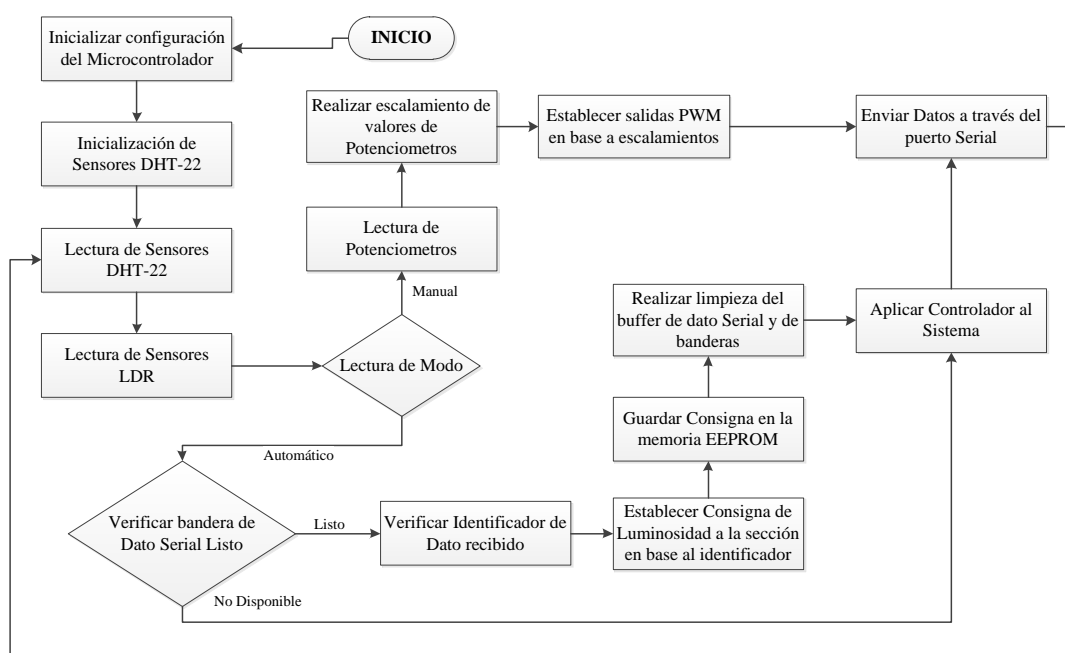


Figura 67. Diagrama de Flujo de Algoritmo de Microcontrolador Principal.

Adicionalmente a las tareas descritas en el diagrama de flujo, el microcontrolador utiliza su interrupción de detección de datos en el buffer serial RS-232, mediante esta interrupción a cualquier momento de la ejecución del programa se recibe el dato desde el computador, el algoritmo implementado para el almacenamiento del buffer consiste en guardar el dato recibido en el buffer en una posición de un vector e ir avanzando su recorrido hasta recibir el valor hexadecimal 0x0D en el cual se establece que el dato está listo y se activa la bandera que indica que el dato serial está disponible para ser utilizado.

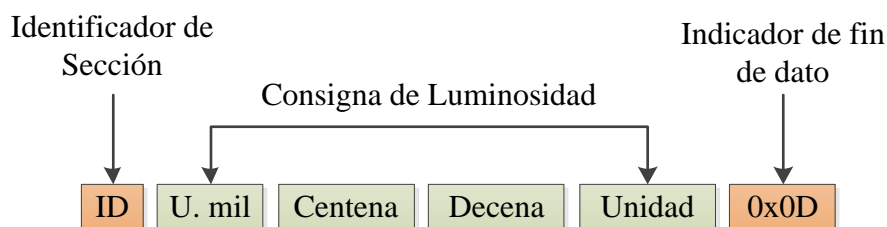


Figura 68. Estructura de dato Serial Recibido.

El identificador de sección puede tomar los valores de 'A', 'B', 'C' y 'D' siendo estas las secciones de la estantería respectivamente, los cuatro datos siguientes son la

consigna de luminosidad a aplicarse en la sección, como el sistema solamente trabaja con valores digitales de luminosidad comprendidos entre 0 y 2046 se utiliza cuatro cifras que posteriormente son decodificadas por el microcontrolador y finalmente el carácter hexadecimal 0x0D correspondiente a la tecla Enter del código ASCII indica que el dato ha sido enviado y que el dato tiene que ser procesado.

El proceso de lectura de los sensores DHT-22 se realiza utilizando la trama que estos envían por el terminal de datos, realizando un algoritmo que haga la espera de tiempos y vaya acumulando la información de bits recibida en vectores de 8 bits que son los valores asociados a las magnitudes de temperatura y humedad para posteriormente poder ser enviados hacia el computador.

El proceso de lectura de sensores LDR realiza el barrido de los canales analógicos del microcontrolador desde el 5to hasta el 12vo, en los cuales se encuentran conectadas las fotorresistencias instrumentadas, al recibir todos los valores se aplica un filtro de primer orden que consiste en promediar las 3 tomas anteriores del mismo sensor y actualizar la memoria, y después se suman los valores de las fotorresistencias por sección para obtener el valor digital de luminosidad en el rango de 0 a 2046 que debe ser utilizado para envío y control.

La lectura del modo de operación se realiza obteniendo el estado del terminal digital donde está conectado el switch externo que controla esto, si detecta un nivel alto significa que está en modo automático y trabajara con consignas del computador y de estar en bajo trabajará en modo manual utilizando como consigna de luminosidad la posición del potenciómetro correspondiente a la sección.

El modo manual realiza la lectura de los cuatro primeros canales del conversor AD del microcontrolador correspondientes a los potenciómetros en su valor de voltaje digital en el rango de 0 a 1023, y se realiza un escalamiento especial para poder obtener el código digital requerido para establecer la salida PWM, las dos primeras secciones poseen el mismo escalamiento ya que la salida PWM se encuentra en el mismo controlador y trabaja con el mismo rango y para las dos

últimas secciones cambia el escalamiento de igual manera debido a que las salidas PWM se encuentran en el microcontrolador secundario, dichos escalamientos están relacionados con respecto al porcentaje del ciclo de trabajo que debe ser aplicado en base a la lectura del potenciómetro en código digital.

Ciclo de Trabajo [%]	Valor ADC potenciómetro	Valor digital PWM
100	1023	484
0	0	0

$$\text{Valor digital PWM} = \text{valor ADC potenciómetro} * 0.473118$$

Ecuación 24. Escalamiento para Modo Manual de Secciones 1 y 2.

Con la relación lineal que manejan estas magnitudes podemos encontrar el valor de escalamiento realizando una regla de tres, de manera que cuando se presente el valor máximo leído del potenciómetro se establezca la salida del ciclo de trabajo de PWM máxima y de manera contraria de presentarse el valor mínimo.

Ciclo de Trabajo [%]	Valor ADC potenciómetro	Valor digital PWM
100	1023	200
0	0	0

$$\text{Valor digital PWM} = \text{valor ADC potenciómetro} * 0.195503$$

Ecuación 25. Escalamiento para Modo Manual de Secciones 3 y 4.

En caso de encontrarse funcionando en modo automático, el algoritmo verificará el estado de la bandera de estado de dato serial, la cual en caso de ser verdadera se procederá a establecer la consigna de la sección correspondiente a la sección en base al identificado del dato recibido desde el computador, y se almacena en la memoria EEPROM con el fin de mantener la consigna correspondiente por sección en caso de producirse un corte de energía en el sistema, de manera que al retornar este vuelva a establecerse con las últimas consignas que fueron ingresadas en el software del computador. Una vez procesadas las consignas se realiza la limpieza del buffer del puerto serial del microcontrolador para que este pueda ingresar un nuevo dato desde

el computador y por ultimo procedimiento se procede a la aplicación del controlador; en caso de no estar ningún dato disponible en el buffer serial se procede directamente a aplicar la acción del controlador ya que las consignas se encuentran establecidas y la señal de control tiene que mantenerse compensada en todo momento.

El controlador consta de cuatro procedimientos similares con la única diferencia que los valores de entrada son diferentes, ya que cada sección tiene su propio controlador. La forma de aplicar el controlador PI desde el microcontrolador es encontrando la ecuación a diferencias correspondiente partiendo de la función de transferencia del controlador, la ecuación a diferencias nos facilita la secuencia en la cual se debe realizar las operaciones y los espacios de memoria que debemos reservar para su correcto funcionamiento.

$$G_c(z) = \frac{K_1 z + K_2}{z - 1} \quad \rightarrow \quad \frac{K_1 + K_2 z^{-1}}{1 - z^{-1}}$$

Ecuación 26. Forma del Controlador PI aplicado.

Al representar la función de transferencia en potencias negativas se obtiene las interpretaciones en el tiempo, significando que un exponente negativo de la variable z un retardo en el tiempo aplicado a la variable que le corresponda y de darse el caso de un exponente negativo se entenderá como un retardo en segundo grado, es decir de las variables pasadas.

$$\frac{M(z)}{E(z)} = \frac{K_1 + K_2 z^{-1}}{1 - z^{-1}}$$

Ecuación 27. Forma relacional entre salida de control y entrada del error de la función de transferencia del controlador PI.

Utilizando la descomposición en relación de entrada y salida podemos separar los valores de la función de transferencia y encontrar la salida correspondiente, la

relación establecida es la de la salida del controlador representada con la letra m y el error calculado con la consigna y el valor del sensor denotado con la letra e .

$$M(z) - z^{-1}M(z) = K_1E(z) + K_2z^{-1}E(z)$$

$$m[k] = m[k - 1] + K_1 e[k] + K_2 e[k - 1]$$

Ecuación 28. Ecuación a diferencias del Controlador PI.

Mediante la ecuación a diferencias obtenida podemos establecer que se requerirá de un espacio de memoria y que solamente se ocupan variables del estado anterior tanto de la salida del sistema como el error, por lo que el algoritmo implementado resulta de la siguiente manera.

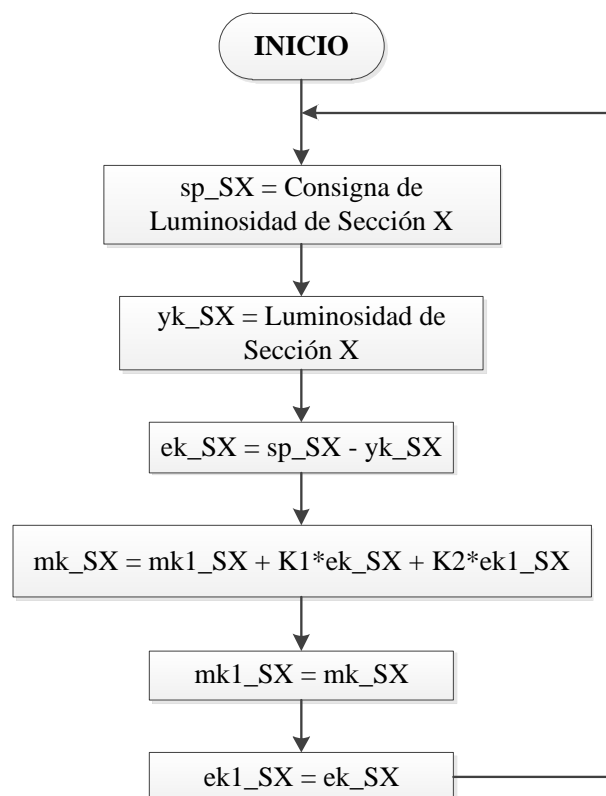


Figura 69. Diagrama de Flujo de Algoritmo de Controlador PI.

El algoritmo funciona de manera genérica para cada sección ya que el controlador es del mismo tipo cambiando sus coeficientes, y siendo repetido para cada sección en

cada ciclo del bucle repetitivo del microcontrolador siempre y cuando este se encuentre trabajando en modo automático.

El envío de datos serial desde el microcontrolador hacia el pc se realiza en cuatro envíos, cada uno correspondiente a la información de cada sección, y el modo de funcionamiento del sistema se realiza cada vez que el sistema entra en bucle. La información es enviada de una manera distinta a la cual se recibe, ya que se envían los datos de temperatura, humedad y luminosidad en un solo envío por sección, dichos datos están distribuidos de forma secuencial y el software del computador es el encargado de realizar la decodificación.

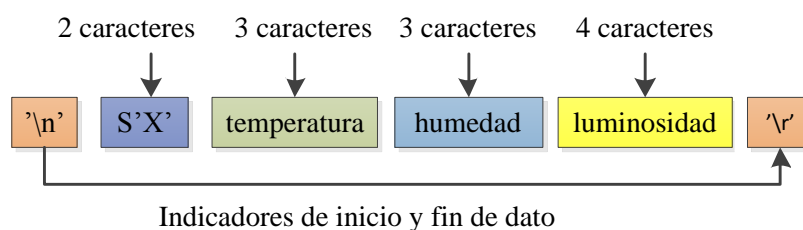


Figura 70. Cadena de caracteres para Envío de Datos hacia el PC.

El algoritmo del computador reconoce cada vez que llega el carácter que identifica el inicio del dato y detiene la recepción serial cuando llega el carácter establecido como fin de dato, entre ellos dos se envía una cadena de 12 caracteres en los cuales se encuentra la información de la sección, los dos primeros caracteres representan a la sección a la que corresponde la información siendo la 'X' un identificador de la misma, es decir si esta cadena es *S1* significa que la información es de la sección 1, a continuación se envían 3 caracteres correspondientes al dato de temperatura tal como lo entrega el sensor y justificando la razón por la cual debe ser dividido para 10 en el computador, lo mismo sucede con los 3 siguientes caracteres recibidos correspondientes al dato de humedad y finalmente los últimos 4 caracteres tienen el dato de luminosidad en código digital que de igual manera se transforma en luxes utilizando las ecuaciones por intervalos de la sección respectiva.

El funcionamiento del sistema automatizado de la cámara de crecimiento depende únicamente del hardware y software implementado dentro del microcontrolador ya

que este es el encargado de captar las señales electrónicas generadas mediante el hardware para interpretarlas y realizar las operaciones requeridas, mientras que el software implementado en el computador no es necesario para que el sistema realice sus actividades respecto al hardware; sin embargo el trabajo simultaneo de ambos es muy importante para que el sistema reúna información con el fin de realizar estudios para mejoramiento de las técnicas de crecimiento de especies vegetales.

El software implementado en el computador interactúa directamente con el software implementado en el microcontrolador realizando el intercambio de información serial mediante el protocolo RS-232, por lo que el software del microcontrolador sirve como enlace entre el computador y los elementos electrónicos del sistema automatizado. Toda la electrónica implementada en el sistema interactúa directamente con el microcontrolador que es un dispositivo que enlaza el nivel de hardware con software contando con su arquitectura electrónica y su memoria capaz de ejecutar la programación en él.

4.6. Diseño de Circuitos Impresos (PCB)

Para la realización de los Circuitos Impresos se utilizó el software ARES de Proteus Design Suite, el cual nos ayuda de una manera muy sencilla a la realización de circuitos que posteriormente serán grabados en la placa electrónica. Para simplificar el diseño se realizó los circuitos en ISIS de cada sección, dichas secciones están divididas en: Sensores DHT-22, Sensores LDR, Potenciómetros y Sistema de Control; en cada uno siendo realizado el circuito en ISIS y utilizando la herramienta de Proteus Design que permite exportar la interconexión de dicho circuito con sus elementos a ARES, proporcionándolos así una guía de conexiones a seguir o inclusive que el software realice las rutas de interconexión.

Para este proyecto las rutas fueron realizadas sin la herramienta de auto conexasión con el fin de obtener una mejor distribución de elementos en la placa, ya que el software no siempre considera las mejores rutas y toma como posible la realización de ellas en ambas superficies de la placa que para este caso no amerita su

utilización ya que los circuitos no tienen una complejidad tan elevada y al utilizar una placa de un solo lado simplificamos los costos de implementación.

Sensores DHT-22

El circuito necesario para cada sensor DHT-22 es muy sencillo ya que solamente se requiere de la polarización de la fuente y una resistencia que sirva como pull up para el terminal de datos, en manera general para todo el proyecto con respecto a puntos de conexiones externas se utilizó borneras para placa electrónica para secciones de cable de 0,14 a 95mm² que soportan corrientes de hasta 100 Amperios y tensión de 1000 volts, siendo las más comúnmente utilizadas y de mínimas capacidades en la realización de PCB.

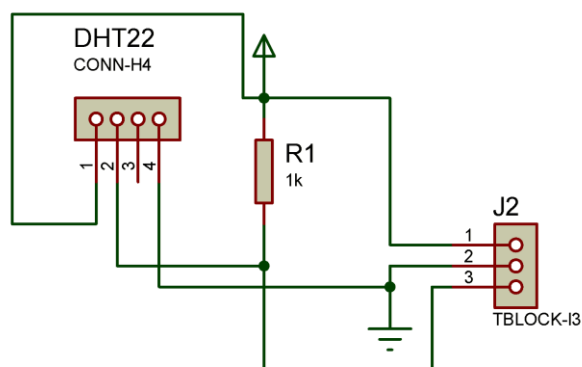


Figura 71. Circuito en ISIS para Sensores DHT-22.

El diseño para estos sensores debe ser repetido cuatro veces en la placa de cobre debido a que se coloca un sensor por cada sección.

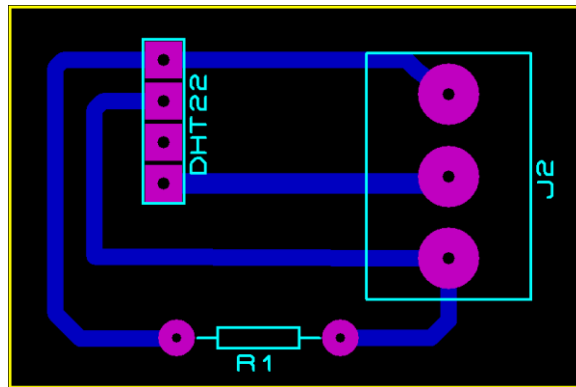


Figura 72. Diseño de Circuito Impreso para Sensores DHT-22

Sensores LDR

Para el circuito de instrumentación de los sensores LDR solamente se necesita una resistencia de 1 K Ω para formar el divisor de tensión y la entrada de la fuente de 5 volts para polarización del circuito.

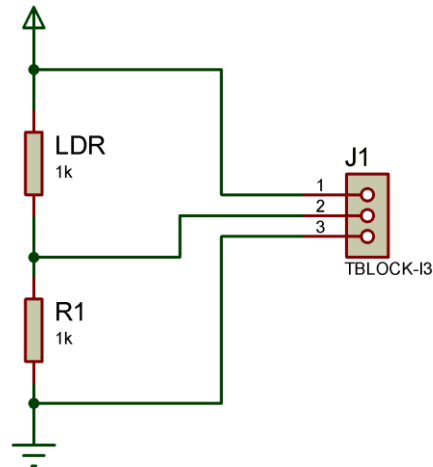


Figura 73. Circuito en ISIS para sensores LDR.

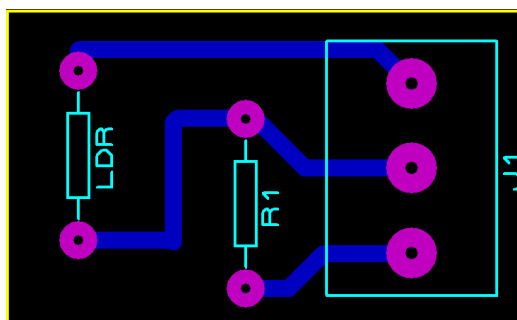


Figura 74. Diseño de Circuito Impreso para sensores LDR.

Potenciómetros

Los potenciómetros utilizados para regular la luminosidad cuando el sistema se encuentra en modo manual solamente requieren de la polarización de la fuente de 5 volts y su terminal central es utilizado como señal de voltaje variable que se envía al microcontrolador, por lo cual es el diseño más sencillo para la placa del proyecto.

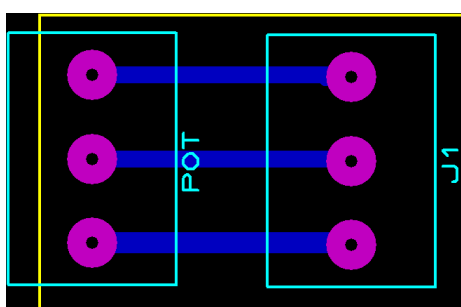


Figura 75. Diseño de Circuito Impreso para Potenciómetros.

Sistema de Control

En el circuito impreso diseñado el sistema de control consta de todos los elementos que no deben estar distribuidos por la estantería, estos son los microcontroladores, transistores para la etapa de potencia, regulador de 5 volts y elementos relacionados con ambos microcontroladores. Para obtener una mejor distribución de dichos elementos se debe considerar la distribución de pines que tiene cada microcontrolador, teniendo énfasis en sus salidas y entradas por lo que se debe

procurar realizar la colocación de los elementos en posiciones cercanas a los pines que corresponden.

Además se ha considerado que con la distancia que tiene cada sensor desde el controlador hasta su ubicación se generará interferencias y pérdidas de las señales, siendo estas no mayores a 4 metros no requieren de un circuito de mayor complejidad para amplificar la señal pero si de un filtrado sencillo que se realiza colocando capacitores en las entradas de señales analógicas captadas por el sensor, con esto reducimos considerablemente el ruido generado en la señal; para compensar pérdidas de tensión no se ha considerado un circuito ya que abarcan unos pocos milivolts que no son considerables para alterar el funcionamiento del sistema.

El regulador de 5 volts es parte principal de este circuito ya que la mayoría de elementos del sistema necesita una polarización de esta tensión, y también se debe tener en consideración que la referencia sea la misma para ambas fuentes, ya que de no ser así se puede generar una respuesta incorrecta por parte de sensores o actuadores debido a que estos trabajan en base a la referencia del microcontrolador especialmente las señales analógicas.

El circuito para generar un reinicio de emergencia del sistema esta implementado para ambos microcontroladores en común y consta de una acción anti rebotes con un capacitor que permite reducir la interferencia de la señal de pulsación, de esta manera el reinicio se realiza de forma general, sin embargo los osciladores para cada microcontrolador son distintos. El microcontrolador PIC18F4550 posee un post escalador interno de frecuencias para lograr alcanzar la velocidad del protocolo USB 2.0 a 48MHz, por lo que aprovechamos dicha característica y utilizamos un oscilador externo de 4MHz mientras que el microcontrolador PIC16F882 al no poseer esta característica requiere de un oscilador de alta velocidad externo para poder generar los 25 KHz de la salida PWM, por lo que se utilizó un oscilador de 20MHz.

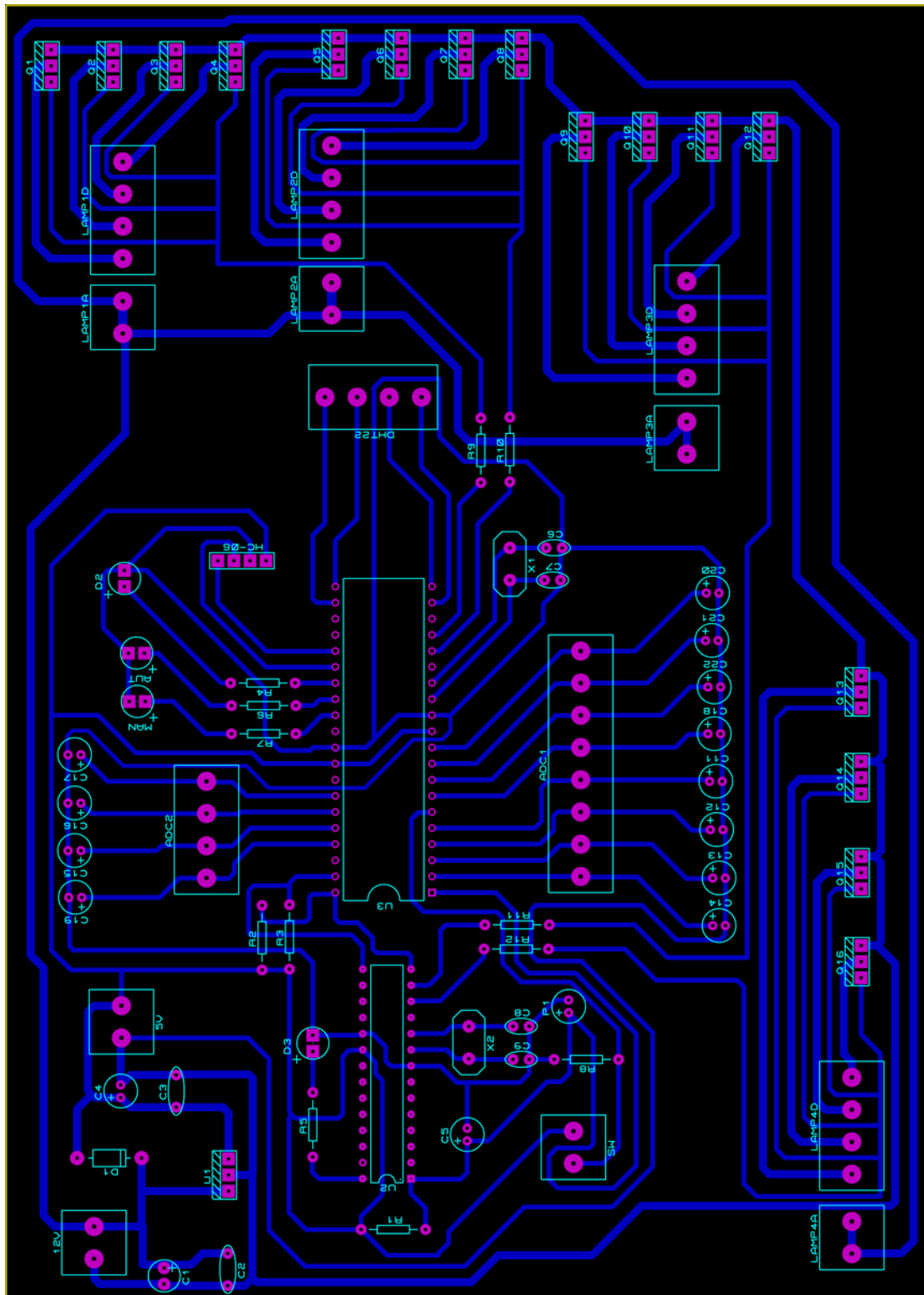


Figura 76. Diseño de Circuito Impreso para Sistema de Control

Cada microcontrolador tiene un indicador LED que sirve como identificador de ciclo del programa, generando una secuencia de encendido y apagado en cada ciclo

de programa que tenga, esto sirve para el análisis de tiempo de ciclos de programa con la finalidad de comprobar si el controlador PI integrado en el microcontrolador va a ser lo suficientemente rápido para responder a los cambios generados por consigna del usuario y de los sensores de realimentación del controlador, adicionalmente el microcontrolador principal tiene indicadores LED que muestran el modo de operación del sistema, contando con dos LED uno rojo correspondiente a modo de operación manual y uno verde correspondiente al automático.

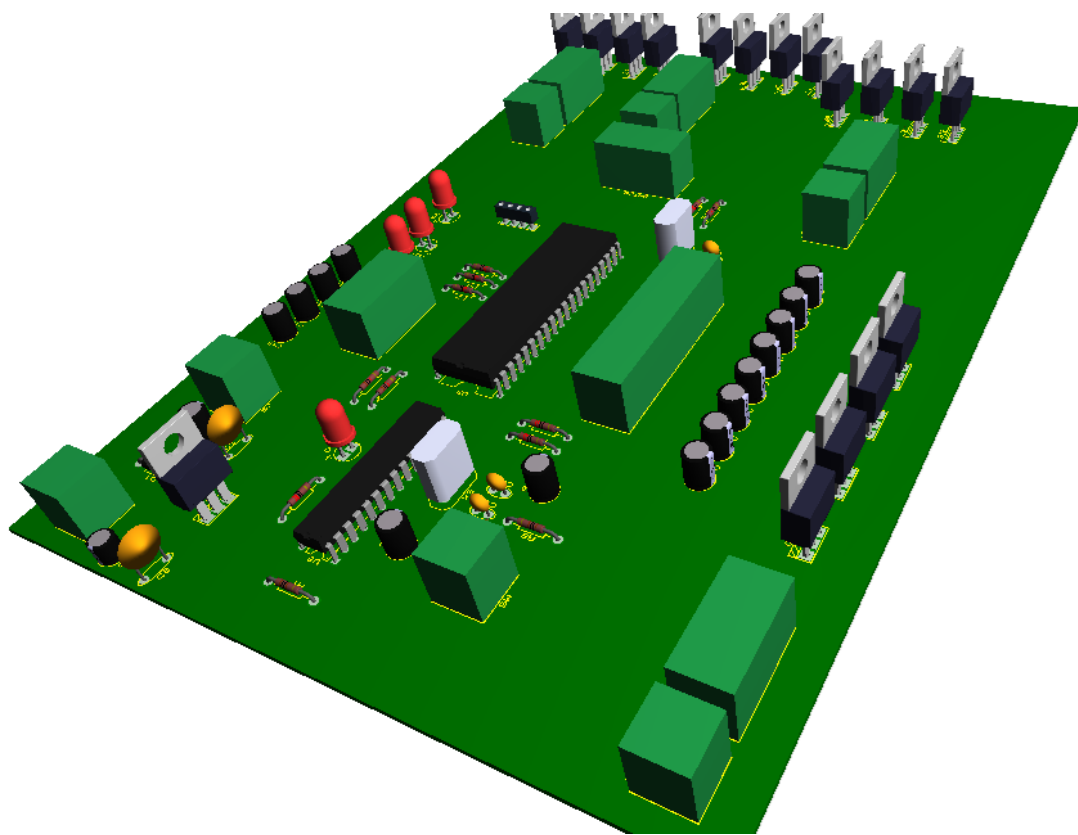


Figura 77. Modelo Tridimensional Virtual de PCB de Sistema de Control.

Al recorrer una cantidad significativa de corriente a través de los transistores, se estableció un grosor de pistas de 0.5 cm que es mayor a lo normalmente utilizado en circuitos de baja potencia y especialmente colocadas para sus terminales de drenaje y fuente, que son los involucrados en la conmutación de energía suministrada por los convertidores Buck. El regulador LM7805 al recibir directamente la energía de la fuente general del sistema de 12 volts, tiene que tener un disipador que prolongue su tiempo de vida útil debido a que la parte de baja potencia consume aproximadamente

2.5 Watts y este circuito integrado al tener una capacidad máxima de potencia 5 Watt se genera un calentamiento considerable en el de aproximadamente 40 grados centígrados.

4.7. Distribución Física del Sistema

El sistema está distribuido de manera que cada sección de la estantería metálica tenga los sensores correspondientes y se realice el cableado del sistema de control que estará ubicado encima de todas las secciones junto con la fuente general, siendo el lugar ideal para ser colocada la caja del controlador debido a la ausencia de espacio en las secciones. En cada sección se tienen que colocar cuatro dispositivos que son los dos sensores LDR, un sensor DHT-22 que mida temperatura y humedad de la sección y el potenciómetro que trabaja regulando la luminosidad en modo manual del sistema.

Cada potenciómetro fue ubicado en la parte frontal derecha de la estantería aprovechando la estructura física del material con perforaciones que se ajustan perfectamente a los potenciómetros pudiendo ser fijados con un ajuste físico resistente con tuercas metálicas y facilitando el trabajo de realizar el cableado hacia el controlador por estar cerca a las columnas de la estantería metálica.

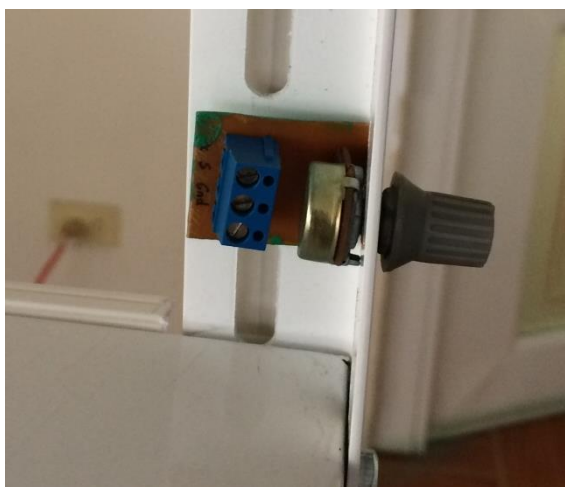


Figura 78. Ubicación de Potenciómetros en la Estantería.

Para los sensores de luminosidad se utilizó como base que los sostenga una curva en forma de “L” de metal de aproximadamente 7cm; esto se hace por que los frascos con especies vegetales colocados por sección tienen un alto de aproximadamente 5cm y de darse el caso de colocarse algunos alrededor del sensor sin soporte, se generaría la obstaculización de la luz para la correcta lectura del sensor por lo que es necesario utilizar un soporte que tenga al menos la altura que van a tener los frascos con especies vegetales, cada soporte metálico de los sensores de luminosidad tendrá una canaleta para guiar el cableado.

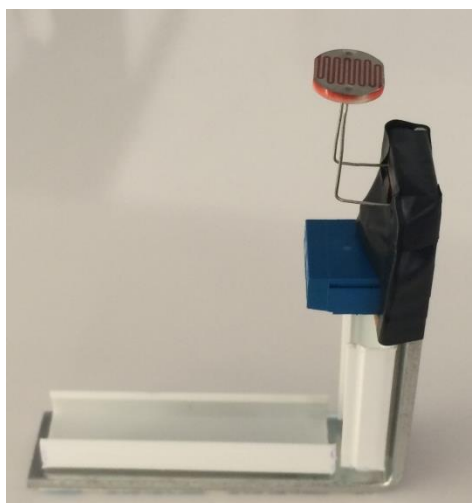


Figura 79. Soporte con Sensor LDR instrumentado.

Los sensores de temperatura y humedad no necesitan de soportes para realizar su tarea, por lo que para ahorro de costos de implementación se los colocó encima de la canaleta principal de cada sección, la cual atraviesa la mayoría de la superficie rectangular de la sección por la mitad con la finalidad de llevar los cables cubiertos de los dos sensores LDR y sensor DHT22 de la sección y llevarlos hacia el controlador ubicado en la parte superior de la estantería.



Figura 80. Distribución de Sensores por Sección.

El cableado correspondiente a los sensores y potenciómetros ubicados en cada sección se realiza a través de canaletas que están colocadas en las columnas de la estantería, ambas columnas tienen canaletas correspondientes a los cableados de sensores y potenciómetros y lámparas LED respectivamente, de esta manera dividiendo los cables que manejan baja potencia y los que manejan alta potencia. La distribución de los sensores sobre la superficie rectangular se realiza de manera equidistante para que los sensores de luminosidad puedan cubrir toda el área iluminada y en la mitad de ambos se coloca el sensor de temperatura y humedad para que capte la zona central de la sección sin tener interferencias por la temperatura de los bordes.

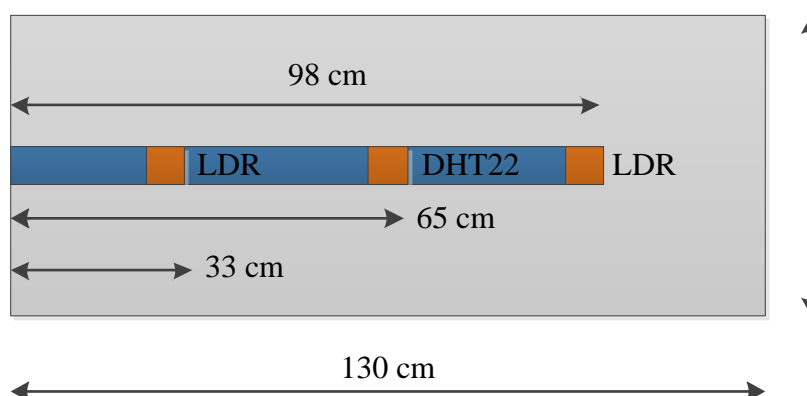


Figura 81. Distribución por Sección de Sensores.

El controlador del sistema se encuentra en una caja plástica de 25cm de ancho, 35cm de largo y 5 cm de alto que evita descargas eléctricas sobre ella que afecten al sistema, en ella se colocan la placa del sistema de control, los convertidores Buck regulados para cada sección y en sus exteriores se colocan conectores tipo banana que facilitan la conexión hacia el controlador de todos los elementos externos y también se colocan elementos auxiliares como conectores para entrada de corriente alterna que requiere la fuente y el switch de cambio de modo de operación, esta caja se coloca en la parte superior de la estantería con la fuente de corriente continua.

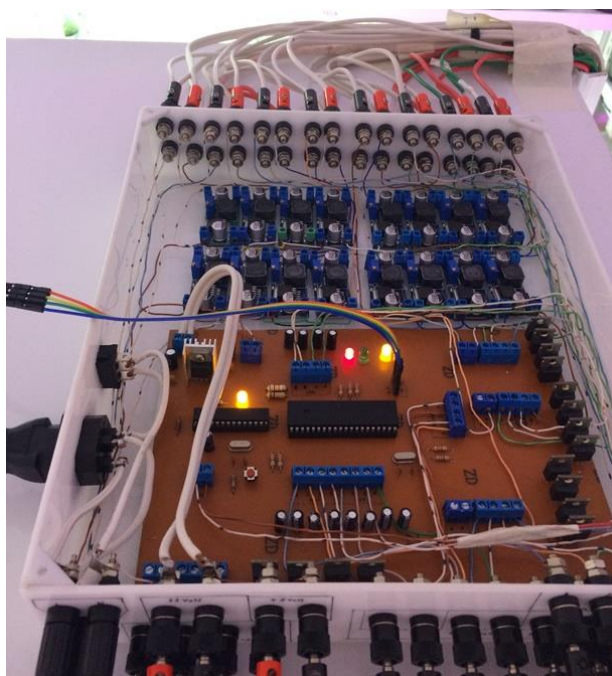


Figura 82. Caja del Controlador del Sistema con sus Conexiones Externas.

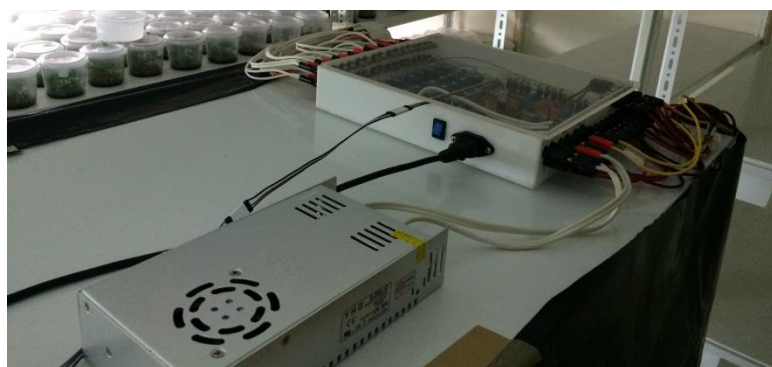


Figura 83. Controlador con Fuente en parte Superior de Estantería.

CAPITULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. Análisis de Parámetros de desempeño del Sistema

El sistema de control diseñado para el sistema en simulación obtuvo ciertas características de desempeño final con respecto a la respuesta del sistema al ingresar una consigna, el máximo sobre pico que se daba en la señal generada por la acción del controlador y el error en estado estacionario obtenido. Con la implementación práctica del controlador Proporcional-Integral se obtuvieron varios resultados diferentes para cada sección.

Para el caso de la primera sección se obtuvieron resultados similares a los simulados con respecto a tiempo de establecimiento y máximo sobre impulso, sin embargo el error en estado estacionario es oscilante, esto se da por la sensibilidad que poseen los sensores, pero aun de esta manera los errores obtenidos son aceptables para la aplicación.

Tabla 15.

Resultados Prácticos vs Teóricos obtenidos para la sección 1

Parámetros Obtenidos para Sección 1		
Parámetro	Simulación	Resultado Práctico
Tiempo Establecimiento	0.22	0.3
Máximo sobre Impulso	1%	3%
Error Estado Estacionario	0 %	5 %

Al ingresar la consigna de luminosidad de 800 luxes en la sección 1, el sistema respondió aproximadamente a los 0.3 segundos obteniendo el valor más cercano a la consigna siendo una diferencia bastante considerable a la simulación con un 36%

aproximado de error pero para finalidad práctica no es de relevancia por ser un tiempo relativamente aun pequeño, también se observó que se produce un impulso más notorio que el obtenido en simulación, ya que casi después de establecer la consigna el valor se elevó hasta 830 Luxes correspondiente a un poco más del 3% adicional a la magnitud que se espera obtener. A pesar de que el impulso que se genera inicialmente es mayor al esperado no afecta con respecto a las necesidades del usuario final ya que el 3% generado no significa mayor inconveniente al tratarse de un periodo corto de tiempo que se produce y no tiene consecuencias de inestabilidad en el funcionamiento final.

$$\text{Error Tiempo} = \left| \frac{0.22 - 0.3}{0.22} \right| * 100 \approx 36\%$$

Ecuación 29. Error de tiempo de respuesta de Sección 1.

Un punto a recalcar es el error en estado estacionario que idealmente debía ser nulo en la práctica está aproximadamente en 5%, sin embargo este error no es fijo ya que el 5% es la máxima variación detectada con respecto a la consigna, el sistema permanentemente se encuentra oscilando alrededor de valores cercanos a la consigna, es decir que para este caso fue 800 y la respuesta se encuentra variando entre 760 luxes y 840 luxes como valores máximos, sin embargo esto pudo ser detectado de mayor manera para valores de luminosidad bajos, ya que al establecer valores altos superiores a 2000 Luxes el error se reduce considerablemente a pesar de que la oscilación permanece pero en menor grado. Este inconveniente se da por la sensibilidad que tienen las LDR al cambio mínimo de luminosidad que incide sobre ellas, y se genera un constante cambio ya que fuentes externas pueden afectar con cualquier aporte mínimo de luz haciendo muy complicado mantener la intensidad luminosa fija.

Para la segunda sección se obtuvieron resultados un poco menos aproximados a los de la primera, siendo el tiempo de establecimiento y máximo sobre impulso uno de los factores más afectados ya que se alejan bastante a los simulados, a pesar de ello el tiempo de establecimiento puede ser aceptado debido a que para el ojo

humano y las plantas el tiempo que toma el cambio de luminosidad no es muy notorio, sin embargo esta sección tiene un sobre impulso que conlleva a generar una oscilación antes de estabilizarse el sistema.

Tabla 16.

Resultados Prácticos vs Teóricos obtenidos para la sección 2

Parámetros Obtenidos para Sección 2		
Parámetro	Simulación	Resultado Práctico
Tiempo Establecimiento	0.22	0.4
Máximo sobre Impulso	1%	5% y posterior -1%
Error Estado Estacionario	0 %	3 %

Al obtener una respuesta del sistema para llegar a su consigna de 0.5 segundos se obtiene un error del 45% aproximadamente, que para parámetros de control no cumple lo esperado significando un ajuste en los parámetros del controlador o un modelamiento poco aproximado. Utilizando una consigna de 600 luxes en esta sección se obtuvo el valor pico de 631 luxes que es aproximadamente el 5% del valor final y posteriormente la señal se redujo 1% aproximadamente a 595 luxes para ser estabilizada después. Sin embargo esta sección tiene un error oscilante menor, manteniéndose en valores alrededor de 587 luxes y 615 luxes correspondientes a un aproximado del 3%. Al tener este inconveniente en ambas secciones se tapó cada sección del sistema para que la luz externa no influya en la medición, y en efecto se obtuvo un resultado mejor, disminuyendo considerablemente el valor oscilante de todas las secciones a ± 1 lux.

Para la tercera sección siendo la primera en la cual están implementadas luces de colores se realizó las pruebas con una consigna de 800 luxes, obteniendo buenos resultados con respecto a las dos anteriores secciones, el controlador que trabaja en las dos últimas no es el mismo debido a que estas no alcanzan el mismo límite de luminosidad que las de las primeras secciones, sin embargo en estas los parámetros obtenidos son más eficientes, ya que la oscilación es mucho menor, el tiempo de establecimiento es mucho más aproximado al simulado y el impulso es casi nulo.

Con un tiempo de establecimiento de 0.25 segundos captados al ingresar la consigna se obtiene un error de 12% que es mucho menor al obtenido a las anteriores secciones y se considera como un tiempo rápido para la aplicación de regular la intensidad de la luz, de igual manera al ingresar la consigna se registró en todas las pruebas que el valor sobrepasa la consigna casi un 1%, es decir al ingresar 800 luxes se observa que se llega a 807 luxes y enseguida se estabiliza en los valores cercanos comprendidos entre 795 luxes y 804 luxes de forma oscilante que corresponde a aproximadamente el 0.5% de la consigna, comprobando el eficiente funcionamiento del controlador para esta sección.

Tabla 17.

Resultados Prácticos vs Teóricos obtenidos para la sección 3

Parámetros Obtenidos para Sección 3		
Parámetro	Simulación	Resultado Práctico
Tiempo Establecimiento	0.22	0.25
Máximo sobre Impulso	1%	0.9%
Error Estado Estacionario	0 %	0.5 %

Para la última sección se ingresó una consigna de 1200 luxes con la que se obtuvieron resultados buenos, de igual manera que la anterior sección en esta el tiempo de establecimiento es muy bueno significando que el controlador diseñado para las secciones 3 y 4 tiene mejores coeficientes que el utilizado para las secciones 1 y 2. El tiempo de establecimiento de igual manera fue aproximadamente 0.25 segundos pero esta vez con un sobre impulso de 2% aproximadamente, alcanzando después de ingresar la consigna un valor de 1223 luxes y reduciéndose hasta estabilizarse en los valores cercanos oscilantes a la consigna, este valor oscilante es mayor al obtenido a la sección pero menor que el de las secciones 1 y 2, reafirmando el óptimo desempeño del controlador.

También debe ser considerado que las dos últimas secciones utilizan una combinación de colores con diferentes longitudes de onda y que los sensores LDR

posiblemente reacciones con menos sensibilidad a estos que a la luz blanca, sin embargo los resultados obtenidos para cada sección son lo suficientemente buenos de acuerdo a lo establecido en los requerimientos del sistema.

Tabla 18.

Resultados Prácticos vs Teóricos obtenidos para la sección 4.

Parámetros Obtenidos para Sección 4		
Parámetro	Simulación	Resultado Práctico
Tiempo Establecimiento	0.22	0.25
Máximo sobre Impulso	1%	2%
Error Estado Estacionario	0 %	1.5 %

El sistema se ha sometido a un funcionamiento continuo bajo condiciones climáticas rigurosas del laboratorio el cual mantiene una temperatura y humedad alta, obteniendo resultados óptimos, sin que exista sobrecalentamiento en sus elementos o se generen bloqueos en el programa del microcontrolador, logrando el objetivo de tener un sistema que trabaje a tiempo completo ininterrumpidamente, a excepción de requerir mantenimiento preventivo.



Figura 84. Pantalla de Control y Monitoreo Operativa del Sistema.

5.3. Análisis de Eficiencia Energética

Con la implementación del sistema de crecimiento utilizando luces LED el consumo energético debe ser menor, primeramente al considerar la carga completa del antiguo sistema que cuenta con cuatro tubos fluorescentes de 32 Watt por sección en total se obtiene 128 Watts de consumo energético, si se considera toda la estantería esto suma un consumo de potencia energética de 512 Watts, el cual solamente puede ser reducido al quitar varios tubos de la sección, lo cual se realizaba para disminuir la intensidad dependiendo de la especie colocada por sección.

Si consideramos el consumo máximo con el sistema LED tenemos que en cada sección hay 4 lámparas LED, estas difieren en el consumo dependiendo de si son blancas o de colores. Para el caso de luces blancas se requiere de 9.9V y 1.75A para obtener la máxima potencia que mediante la aplicación de la ley de Ohm se obtiene 17.32 Watt. Al ser cuatro de estas lámparas en la sección esta consume un total de 69.28 Watt en las dos primeras secciones que están equipadas con luces blancas. Mientras que las secciones 3 y 4 tienen lámparas de colores que requieren de 8.5V y 1.75A para su funcionamiento a máxima potencia son 14.87 Watt; y considerando las cuatro ubicadas por sección son un total de 59.5 Watt.

$$P_{S1-2} = 9.9V * 1.75A = 17.32Watt$$

$$P_{S3-4} = 8.5V * 1.75A = 14.87Watt$$

Ecuación 30. Ley de Ohm para cálculo de potencia de lámparas LED.

Una vez obtenido el consumo de potencia por sección se suma el total de potencias para obtener el total consumido por la estantería el cual es 257.6 Watt y más los 2.5 Watt del consumo del sistema de control electrónico es aproximadamente 260 Watt totales de consumo de este sistema. Al relacionarlo con los 512 Watts consumidos por el sistema fluorescente anterior el ahorro energético es de aproximadamente el 50% significando mucho menos costo por utilización del sistema. Este costo incluso puede reducirse más debido a que las condiciones de iluminación máxima del sistema muy posiblemente no sean utilizadas.

Tabla 19.**Relación de consumo Máximo de sistema LED vs Fluorescente**

Magnitud	Fluorescentes	LED
Potencia Consumida	512 Watt	260 Watt
Relación Porcentual	100%	50.78%

La tarea de crecimiento de las especies vegetales requiere de intensidades de luz entre los valores de 0 a 3000 Luxes dependiendo de la especie colocada en el sistema, al establecer la relación que tiene este rango con respecto a las capacidades máximas de cada sección dependiendo de sus colores se obtienen valores menores al 100% de consumo energético. Las luces de color blancas alcanzan hasta un valor máximo de 9000 luxes y las de combinación de color alcanzan los 6000 Luxes, estableciendo que los 3000 luxes máximos utilizados en el crecimiento de especies vegetales corresponde al 33.33% de la capacidad máxima de lámparas LED blancas y corresponde al 50% de las luces de colores, significando que los 260 Watts totales de consumo son reducidos significativamente. Al utilizarse salidas PWM para controlar el paso de la energía eléctrica a los LED se establece una relación lineal con respecto al consumo energético de las mismas con lo que obtenemos el consumo energético correspondiente a 3000 luxes en el caso de suponer que este será el valor máximo establecido dada la naturaleza para la cual está diseñado el sistema.

Tabla 20.**Relación de Consumo Máximo vs 3000 Luxes de lámparas LED.**

Tipo de Lámpara	Consumo Máximo	Consumo a 3000 Luxes
Blancas	17.32 Watt	5.78 Watt
Azul+Rojo	14.87 Watt	7.43 Watt

El ahorro energético es significativo y gracias a esto se reduce el costo de pago de consumo verificando así que el costo inicial de implementar tecnología de iluminación basada en LED es alto pero genera un ahorro energético que a largo plazo devuelve dicha inversión.

5.4. Análisis de Impacto del Alcance del Proyecto

Con los resultados obtenidos con respecto al ahorro energético y la eficiencia de trabajo del sistema se puede realizar varios estudios que permitan el mejoramiento de las técnicas utilizadas para crecimiento de especies vegetales mediante luz artificial, con la automatización de este sistema se logra un impacto significativo ya que la diferencia entre poder controlar y almacenar datos de manera automática genera nueva expectativa para el campo de la biotecnología, si bien estos equipos existen comercialmente su precio es muy elevado significando una gran inversión por parte de la empresa.

Mediante el diseño e implementación se logra alcanzar un ahorro significativo y un resultado muy eficiente, ya que con el estudio realizado con este sistema se planea mejorar la producción de la empresa y promover que el proyecto se vuelva reproducible generando una gran oportunidad para el desarrollo de equipos automatizados en el campo de la biotecnología en el Ecuador, ampliando de mayor manera el campo de aplicaciones a las que habitualmente se dedica la ingeniería electrónica en automatización y control. Además de generar la dedicación a la elaboración de estos sistemas se consigue reducir problemas en la micropropagación de especies vegetales como son los índices de mortandad, y mejorar varios aspectos como un producto final más resistente, la disminución de tiempos necesarios para tener el crecimiento adecuado para ser trasladadas al invernadero y el mejoramiento de las técnicas de crecimiento mediante el estudio del historial generado.

El mejoramiento de las características en la etapa de crecimiento de especies vegetales mediante luz artificial generara una expectativa futura que en el Ecuador se pueda hacer utilización de estos equipos para obtener productos propios y se pueda abastecer de los alimentos mediante la biotecnología reduciendo importaciones para mejorar la economía interna del país y se establezca una sólida fuente de ingresos mediante la exportación de los productos.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

Al completar el sistema automatizado de la cámara de crecimiento para la empresa Germoplanta Cía. Ltda. Se logró conseguir resultados exitosos según lo esperado y con la disposición de realizar los estudios pertinentes con el fin de encontrar los mejores protocolos basados en iluminancia para mejorar el crecimiento y producción de plantas.

Mediante el diseño e implementación de las lámparas LED se concluye que se obtiene un ahorro económico significativo que fue aproximadamente el 40% con respecto a las comercializadas y con el diseño inicial se puede establecer las técnicas para variar su intensidad de luz.

Se verificó que mediante la utilización de señales digitales PWM se puede realizar la variación de intensidad de la luz de las luminarias LED con la obtención de una característica lineal en todo el rango de luz que es capaz de otorgar, lo cual no se obtiene con la variación sola de la tensión

Se realizó la instrumentación para los sensores de temperatura, humedad y luminosidad con la mínima utilización de elementos electrónicos posibles obteniendo resultados satisfactorios de señal de salida y consumo energético.

Se verificó la versatilidad de los sensores de luz LDR para aplicaciones de alta precisión debido a su sensibilidad alta a los cambios de luz obteniendo una salida del sistema más fiable para el monitoreo del sistema para el usuario final.

Se obtuvo exitosamente la lectura de las magnitudes de temperatura y humedad en un solo dispositivo utilizando el sensor DHT-22, mediante la decodificación de su señal digital que asegura una lectura fiable sin interferencias como sucede en señales analógicas.

Se utilizó todas las capacidades del microcontrolador PIC18F4550, aprovechando al máximo sus módulos embebidos que permiten la implementación de un sistema robusto y capaz de funcionar permanentemente en las tareas de control requeridas.

Se logró alcanzar resultados eficientes en la respuesta y control de la luminosidad mediante el diseño de dos controladores de tipo Proporcional-Integral digitales que permiten su programación en el microcontrolador para un funcionamiento no dependiente del computador.

Se aprovechó las capacidades de la plataforma Java™ para la realización de un software que realice la gestión remota del sistema mediante tecnología inalámbrica Bluetooth con capacidad de control, monitoreo en tiempo real y consulta y almacenamiento de base de datos.

Se realizó una interfaz gráfica de usuario en el software desarrollado en Java™ que cumpla los principios de ergonomía adecuada en la distribución y tamaño de mandos y señales, y que también no afecta el desempeño del usuario al reducir la carga mental a la que está sometido al utilizar el software por largos periodos de tiempo.

Se logró establecer una comunicación entre el software de gestión del sistema en Java™ y la base de datos MySQL mediante sentencias de lenguaje SQL que es capaz de obtener todo el potencial del motor de búsqueda InnoDB utilizado por MySQL y aprovechar todas sus prestaciones gracias las licencias GNU/GPL utilizadas por ambos entornos.

Mediante el almacenamiento de los datos del sistema en la base de datos MySQL se obtuvieron las ventajas de estudio del desarrollo de especies vegetales con respecto al mejoramiento de las técnicas para crecimiento.

Se logró establecer una comunicación inalámbrica eficiente utilizando tecnología Bluetooth mediante al módulo HC-06 que trabaja como un punto de acceso con respecto al computador, de esta manera realizando el intercambio de datos entre ambos puntos evitando el cableado por el laboratorio y el acceso al mismo que evita contaminación no deseada en las especies vegetales.

Se aprovechó las características del motor de búsqueda InnoDB de MySQL para generar varias opciones de búsqueda de la información para el usuario, utilizando al máximo la capacidad de filtrado de las sentencias SQL implementadas en este motor.

El proceso de diseño e investigación de este tipo de sistemas permitió el conocimiento de las técnicas y métodos más comunes en la Biotecnología para la propagación masiva de especies vegetales.

6.2. Recomendaciones

Para la implementación de futuros proyectos de cámaras de crecimiento se vuelve necesario el estudio realizado con respecto a los patrones de crecimiento óptimos de la mayor cantidad de especies posible, con la finalidad de generar un controlador inteligente que automatice todas las etapas de vida de la planta.

Una de las principales ventajas pero que a la vez generan problemas en la utilización de sensores LDR es su alta sensibilidad, la cual puede producir señales ruidosas en la lectura por lo que se recomienda utilizar filtros analógicos o digitales para reducir dicha interferencia en su señal analógica.

Para el correcto funcionamiento del sistema por un largo periodo de tiempo se debe considerar el tiempo y potencia de utilización del sistema, para establecer un

posible mantenimiento preventivo que permita alargar la vida del sistema y llevar el tiempo de uso de los LED los cuales tienen una vida útil de 50000 horas.

Es recomendable utilizar dispositivos que regulen tensión y corriente para utilizar LEDs de potencia ya que estos tienen un comportamiento diferente a los comúnmente utilizados como indicadores de estado con respecto a la corriente consumida, dichos dispositivos pueden ser drivers basados en transistores como amplificador o convertidores de Potencia Buck o Boost.

Para el diseño e implementación de una luminaria basada en LEDs es importante la realización de los cálculos que conllevan al consumo energético de los mismos, con el fin de optimizar la energía en los LED y que no se desperdicie en forma de calor en transistores, resistencias o alambres.

Para realizar una comunicación inalámbrica Bluetooth exitosa es recomendable la utilización de caracteres de validación en la trama de datos que se envía ya que se puede dar la probabilidad de que se genere interferencia y dichos datos cambien, afectando al sistema de control en sus actividades con un comportamiento errado.

BIBLIOGRAFÍA

Jiménez, M. G. (2012). *ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD PARA EL MEJORAMIENTO DE LA ILUMINACION DEL EDIFICIO T-3 APLICANDO TECNOLOGÍA LED*. Tesis de Ingeniero Electricista. Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, Guatemala.

Holophane. (2015, Marzo 29). *LED Lighting Solutions*. Obtenido de <http://www.holophane.com/education/fundamentals.asp>

Bombillas Bajo Consumo. (2014, Febrero). *Comparativa y Equivalencia entre las Lámparas LED y otras del mercado*. Obtenido de http://www.bombillasbajoconsumo.com/iluminacion_bajoconsumo/lamparas_led/comparativa_led.html

KIOSKEA. (2014, Junio). *Cómo Funciona Bluetooth*. Obtenido de <http://es.kioskea.net/contents/69-como-funciona-bluetooth>

Navarro, V. (2013). *ANÁLISIS DE LA UTILIZACIÓN DE LUZ EMITIDA POR LAMPARAS DE DIODO (LED) EN LA PRODUCCIÓN IN VITRO PARA LA OBTENCIÓN DE SEMILLA PREBÁSICA DE SOLANUM TUBEROSUM* (Tesis de Ingeniero en Producción Agropecuaria, Pontificia Universidad Católica Argentina, Buenos Aires, Argentina). Obtenido de <http://bibliotecadigital.uca.edu.ar/repositorio/tesis/analisis-utilizacion-luz-emitida.pdf>

Salgado, R. (2015, Marzo 27). *LA PROPAGACIÓN DE PLANTAS IN VITRO, UN ÉXITO BIOTECNOLÓGICO*. Obtenido de <http://www.sabermas.umich.mx/archivo/secciones-anteriores/articulos/75-numero-10/153-la-propagacion-de-plantas-in-vitro-un-exito-biotecnologico.html>

Saber más, Revista de Divulgación de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Bluetooth Organization. (2015, Marzo). Bluetooth Brand Trademarks Logos. Obtenido de <https://www.bluetooth.org/en-us/bluetooth-brand/bluetooth-brand>

ACTA DE ENTREGA

El Proyecto fue entregado al Departamento de Eléctrica y Electrónica y reposa en la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, desde:

Sangolquí, 13 DE MAYO de 2015

ELABORADO POR:



DENIS MICHAEL FLORES PAZOS

171989577-1

AUTORIDAD



Ing. Luis Orozco MSc.



DIRECTOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL