



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería.

Diseño e instrumentación de invernadero didáctico usando PLC basado en FPGA.

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el título de:

Ingeniero electromecánico

(Especialidad en Mecatrónica)

Presenta:

Emmanuel Resendiz Ochoa

Dirigido por:

Dr. Roque Alfredo Osornio Ríos
M. en I. Carlos Rodríguez Doñate

San Juan del Río, Querétaro. Agosto del 2012

Diseño e instrumentación de invernadero didáctico usando PLC basado en FPGA.

Dedicatoria

A mis padres, y toda mi familia
por su apoyo incondicional
durante todo este tiempo.

Agradecimientos

A mi familia que ha sido el pilar más importante en el logro de mi formación académica, que con este trabajo culmina una etapa muy importante de mi vida haciéndome sentir muy orgulloso como persona.

Al Dr. Roque A. Osornio Ríos, por las grandes oportunidades ofrecidas durante la carrera, por el apoyo siempre brindado para poder realizar este trabajo, y por el tiempo invertido como guía durante el desarrollo y documentación de esta tesis.

Al M. en I. Carlos Rodríguez Doñate quien fue la persona que compartió sus conocimientos para que llevara a cabo el desarrollo de este trabajo.

A cada uno de los profesores que día a día me brindaron sus conocimientos y al personal de la universidad por hacer de las instalaciones un buen lugar para estudiar.

A la Universidad Autónoma de Querétaro por brindarme la oportunidad de estudiar la licenciatura y de desenvolverme académicamente en sus instalaciones.

Y por último y no menos importante agradecer a mis compañeros y amigos que conocí durante la carrera con quien compartí experiencia y momentos que hicieron amena la estancia durante el estudio de la ingeniería.

GRACIAS.

Índice general.

Contenido

Dedicatoria.....	iii
Agradecimientos	iv
Índice general.....	v
Índice de figuras.....	vii
Índice de tablas.	x

Capítulo I

Introducción.....	1
1.1. Antecedentes.....	2
1.2. Objetivos.	4
1.2.1 Objetivo general.	4
1.2.2. Objetivos particulares.	5
1.3. Descripción del problema.....	5
1.4. Justificación.....	6
1.5. Planteamiento general.	8

Capítulo II

Fundamentación teórica.	10
2.1. Invernadero.....	11
2.1.1. Características de un invernadero.....	11
2.1.2. Materiales para la construcción de un invernadero.	12
2.1.3. Factores para la elección de un invernadero.	13
2.1.4. Tipos de invernadero.	14
2.1.5. Invernadero automatizado.....	22
2.2. Instrumentación de un invernadero.....	24
2.2.1. Actuadores.....	24
2.2.2. Sensores.	26
2.2.3. Acondicionadores de señal.....	26
2.3. Instrumentos de control en invernaderos.	29
2.3.1. Microcontroladores.....	29
2.3.2. PLC (Programmable Logic Controller, Controlador Lógico Programable)	30
2.3.3. FPGA (Field Programmable Gate Array, Arreglo de compuertas programables en campo).....	31

Universidad Autónoma de Querétaro

2.3.4. Controladores.....	31
Capítulo III	
Metodología.....	35
3.1. Diseño del invernadero didáctico.....	36
3.2. Construcción y forrado del invernadero didáctico.....	41
3.3. Diseño y construcción de PCBs.....	45
3.4. Instrumentación del invernadero didáctico.....	61
3.5. Cableado del PLC basado en FPGA.....	67
3.6. Módulos de control en VHDL.....	70
3.7. Interfaz de comunicación en C++.....	75
3.8. Control en el prototipo de invernadero.....	76
3.9. Rutina con el PLC basado en FPGA.....	81
Capítulo IV	
Resultados	83
4.1. Diseño de la estructura del invernadero didáctico.....	84
4.2. Construcción y forrado del invernadero didáctico.....	84
4.3. Pruebas de funcionamiento de tarjetas PCBs.....	85
4.4. Pruebas de control del prototipo de invernadero.....	87
4.5. Rutina con el PLC basado en FPGA.....	90
Capítulo V	
Conclusiones.....	101
Referencias.....	103
Apéndice.....	105

Índice de figuras.

	Página
Figura 1.1. Diagrama general del proyecto.	9
Figura 2.1. Invernadero plano.....	15
Figura 2.2. Invernadero en raspa y amagado.....	15
Figura 2.3. Invernadero asimétrico.....	16
Figura 2.4. Invernadero de capilla.....	16
Figura 2.5. Invernadero de doble capilla.....	17
Figura 2.6. Invernadero túnel o semicilíndrico.....	17
Figura 2.7. Invernadero de cristal.....	18
Figura 2.8. Sistema de riego aéreo (tren de riego).....	18
Figura 2.9. Sistema de riego localizado (por goteo).....	19
Figura 2.10. Sistema de riego por subirrigación.....	20
Figura 2.11. Sistema de riego por inundación.....	21
Figura 2.12. Invernadero automatizado.....	23
Figura 2.13. Circuito amplificador inversor.....	27
Figura 2.14. Circuito amplificador no inversor.....	27
Figura 2.15. Circuito amplificador restador o de diferencia.....	28
Figura 2.16. Circuito amplificador de instrumentación.....	29
Figura 3.1. Diseño de invernadero tipo raspa y amagado.....	36
Figura 3.2. Modelado en 3D.....	37
Figura 3.3. Diseño de la estructura en AUTOCAD.....	38
Figura 3.4. Diseño del techo del invernadero.....	39
Figura 3.5. Selección de Estilos visuales y Materiales.....	40
Figura 3.6. Aplicación de texturas en la estructura del prototipo de invernadero.....	40
Figura 3.7. Diseño de la base del prototipo de invernadero.....	41
Figura 3.8. Base principal de la estructura.....	43
Figura 3.9. Parte del techo de la estructura.....	43
Figura 3.10. Construcción del techo del invernadero.....	44
Figura 3.11. Construcción de la estructura del invernadero.....	44
Figura 3.12. Forrado de la estructura del invernadero.....	45
Figura 3.13. Sensor de temperatura.....	46
Figura 3.14. Esquemático de la tarjeta de acondicionamiento de señal del sensor de temperatura.....	47
Figura 3.15. PCB para la tarjeta de acondicionamiento de señal del sensor de temperatura.....	47
Figura 3.16. PCB de acondicionamiento de señal del sensor de temperatura.....	49
Figura 3.17. Sensor de iluminación.....	49
Figura 3.18. Esquemático de la tarjeta de acondicionamiento de señal del sensor de iluminación.....	50
Figura 3.19. PCB para la tarjeta de acondicionamiento de señal del sensor de iluminación.....	50
Figura 3.20. PCB de acondicionamiento de señal del sensor de iluminación.....	51
Figura 3.21. Sensor de humedad.....	52

Figura 3.22. Esquemático del circuito sensor óptico.....	53
Figura 3.23. Circuito impreso del sensor óptico.....	53
Figura 3.24. Sensor óptico.....	54
Figura 3.25. Esquemático del circuito puente H.....	54
Figura 3.26. Impreso del circuito puente H.....	55
Figura 3.27. Tarjeta PCB del circuito puente H.....	56
Figura 3.28. Esquemático de la tarjeta de potencia.....	56
Figura 3.29. Impreso de la tarjeta de potencia.....	57
Figura 3.30. Tarjeta de potencia.....	57
Figura 3.31. Esquemático de la fuente de alimentación.....	58
Figura 3.32. Fuente de alimentación.....	59
Figura 3.33. Esquemático de la tarjeta de señal de entrada.....	60
Figura 3.34. Impreso de la tarjeta de señal de entrada.....	60
Figura 3.35. Tarjeta de señal de entrada.....	61
Figura 3.36. Sensores de humedad, temperatura e iluminación.....	62
Figura 3.37. Sensores ópticos.....	63
Figura 3.38. Motor utilizado para el control de ventanillas.....	64
Figura 3.39. Mecanismo de la malla sombra.....	65
Figura 3.40. Motor de malla sombra.....	65
Figura 3.41. Resistencia de calefacción.....	66
Figura 3.42. Ventiladores.....	66
Figura 3.43. Bomba de riego.....	67
Figura 3.44. PLC basado en FPGA.....	68
Figura 3.45. Diagrama a bloques de módulo de control de ventanillas laterales.....	71
Figura 3.46. Diagrama a bloques del módulo de control de ventanilla superior y mecanismo de malla sombra.....	71
Figura 3.47. Diagrama a bloques de módulo de control de sistema a riego.....	72
Figura 3.48. Módulo de control de PWM para el control de resistencia de calefacción.....	73
Figura 3.49. Módulo de control de ventiladores.....	73
Figura 3.50. Diagrama a bloques de módulo de lectura de ADC.....	74
Figura 3.51. Entradas y salidas del PLC basado en FPGA para el control de prototipo de invernadero.....	74
Figura 3.52. Menú principal de la interfaz de comunicación para el control del invernadero.....	75
Figura 3.53. Identificación de temperatura en el prototipo de invernadero.....	76
Figura 3.54. Simulación y comparación de la planta ante una entrada escalón.....	78
Figura 3.55. Control lazo cerrado.....	79
Figura 3.56. Diagrama a bloques del controlador PID.....	80
Figura 3.57. Diagrama escalera de rutina del prototipo de invernadero.....	81
Figura 4.1. Diseño del prototipo del invernadero.....	84
Figura 4.2. Estructura final del invernadero.....	85
Figura 4.3. Gráfica de los datos obtenidos en la prueba del sensor de temperatura.....	86
Figura 4.4. Gráfica de los datos obtenidos en la prueba del sensor de iluminación.....	87
Figura 4.5. Control de temperatura a una entrada de referencia de 40 °C.....	88
Figura 4.6. Lectura del sensor de iluminación.....	89
Figura 4.7. Lectura del sensor de humedad.....	90

Figura 4.8. Prototipo de invernadero.	91
Figura 4.9. Diagrama escalera para ubicar la ventanilla lateral a 1/3 de su posición.	92
Figura 4.10. Ventanilla lateral ubicada en 1/3 de su posición.	93
Figura 4.11. Diagrama escalera para ubicar la ventanilla lateral a 2/3 de su posición.	93
Figura 4.12. Ventanilla lateral ubicada en 2/3 de su posición.	94
Figura 4.13. Diagrama escalera para abrir la ventanilla totalmente abierta.	95
Figura 4.14. Ventanilla lateral ubicada totalmente abierta.	96
Figura 4.15. Diagrama escalera para la ventanilla superior.	96
Figura 4.16. Ventanilla superior en estado abierto.	97
Figura 4.17. Diagrama escalera para la malla sombra.	98
Figura 4.18. Malla sombra cerrada.	99
Figura 4.19. Diagrama escalera para activar resistencia de calefacción, ventiladores y sistema de riego.	99
Figura 4.20. (a) Ventilador en funcionamiento y (b) resistencia de calefacción activada.	100

Índice de tablas.

	Páginas
Tabla 3.1. Conexión de entradas digitales del PLC basado en FPGA.	69
Tabla 3.2. Conexión de salidas digitales del PLC basado en FPGA.	69
Tabla 3.3. Conexión de entradas analógicas del PLC basado en FPGA.	70

Capítulo I

Introducción.

El cultivo es una de las actividades más desarrolladas en México, así que la búsqueda para mejorar la eficiencia en la producción de los cultivos ha llegado a tal grado de que se desarrollen nuevas tecnologías enfocadas a este tipo de actividad. La tecnología en invernaderos ha contribuido de gran forma la producción de cultivo, la eficiencia de productos y la mano de obra.

La ingeniería ha contribuido en buena medida para que haya un desarrollo en la tecnología de invernaderos, las áreas de electrónica, comunicación, instrumentación, etc., juegan un papel muy importante en el control de invernaderos automatizados, y de esa manera tener un desempeño favorable en la integración de los procesos de cultivo. Un sistema de control al interior de un invernadero permitirá alcanzar las condiciones óptimas para maximizar la relación costo-beneficio de la producción agrícola.

Un invernadero automatizado es de gran ayuda en la agricultura, debido a que en éstos se pueden controlar variables como temperatura, iluminación, humedad, entre otras, lo que proporcionará las características óptimas que requiere cada cultivo para un buen crecimiento y desarrollo. Además, los invernaderos facilitan al agricultor su trabajo, teniendo como resultado productos de buena calidad, alta productividad y eficiencia en el cultivo.

El proyecto que se realiza esta enfocado al desarrollo de tecnología en invernaderos, pero más que eso, es un proyecto que servirá para la integración de tecnología desarrollada en la Facultad de Ingeniería campus San Juan del Rio; con lo cual se pretende que este prototipo ayude a mostrar a empresas interesadas, módulos de automatización enfocados a este campo que se han desarrollado en la universidad. Contar con un invernadero didáctico automatizado con un PLC (Controladores Lógicos Programables) basado en tecnología FPGA (Field Programmable Gate Array, Arreglo de compuertas programables en campo).

El proyecto incluye el diseño y construcción de una estructura de invernadero, la instrumentación será lo más parecido a los invernaderos reales, finalmente para lograr la automatización del invernadero, se hará la integración del PLC basando en FPGA. Como resultado final se pretende que el invernadero didáctico desarrollado emule el comportamiento de un invernadero real.

A continuación se describe el contenido de esta tesis que se ha dividido en cinco capítulos, en el primer capítulo se dará una breve introducción además de presentar los antecedentes, objetivos que se pretenden alcanzar, la justificación del proyecto y un panorama general que muestra un resumen del proyecto desarrollado. El capítulo número dos lleva por título fundamentación teórica, aquí se muestra una recopilación de información que sirve como herramienta para el desarrollo del proyecto, la cual es obtenida de publicaciones, libros o proyectos realizados anteriormente. En el tercer capítulo se presenta la metodología, en la cual se describe paso a paso el desarrollo del proyecto. En el cuarto capítulo de nombre experimentación y resultados, se describirá en forma clara y precisa las pruebas de funcionamiento que se realizan en el invernadero. En el último capítulo se presentan las conclusiones que se obtuvieron al finalizar el trabajo. Por último lleva una sección de referencias, en el cual se hace referencia a los trabajos, artículos, tesis o proyectos, los cuales ayudaron para el desarrollo del proyecto.

1.1. Antecedentes.

La tecnología de invernaderos surgió en países como España, Holanda e Israel. La necesidad de producir cultivos de buena calidad hizo que estos países desarrollaran tecnología para el cultivo. Se descubrió que el cultivo en invernaderos con calefacción y

con el más alto nivel de cristal cubriéndolos incrementaba el rendimiento. Las plantas crecían más rápidamente cuando se les daba más luz y cuando el entorno cálido era constante. Esto significaba que se podía cultivar otros productos que solamente se podría cultivar en países cálidos.

En México, desde la llegada de esta nueva tecnología al sector agrícola del país se han desarrollado nuevas investigaciones para el mejoramiento de nueva tecnología en invernaderos. La Universidad Autónoma de Querétaro se ha enfocado en las necesidades de la producción de cultivo a tal grado que en 1998 inicio investigaciones y desarrollo en dicha área. A la fecha, la universidad ha visto el desarrollo de una industria pujante y que crece a ritmos muy acelerados.

Una de las dificultades de dicha industria es el no contar con expertos en el país que apoyen sus instalaciones, es por ello la necesidad no sólo de generar tecnología para esta industria sino a la vez la formación de cuadros especializados en esta área. El grupo de investigación de la facultad de ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro con especialización en tecnología de invernaderos ha realizado investigaciones desde 1998 en el área de ingeniería de invernaderos dedicándose principalmente al diseño, construcción, equipamiento, instrumentación, control, etc. Para dar solución a los problemas que se presentan en el país.

A continuación se presentan varios trabajos que desarrollados con un enfoque hacia nuevas tecnología en invernaderos. La ingeniería de invernaderos está basado para la protección de cultivos y para ello se han desarrollado trabajos como el de Maruri (2009) quien diseñó un prototipo de invernadero Nodriza a ser empleado en etapas tempranas de establecimiento de plántulas de *Albizia occidentails* (es el nombre científico, pertenece al género de las leguminosas y son arboles de rápido crecimiento, subtropicales y tropicales), para protección ante los agentes climáticos. Además, el control es un factor muy importante que se debe tomar en cuenta en un invernadero ya que de ello depende la respuesta del sistema, Rojas (2003) desarrolló e implementó un algoritmo de control difuso, para un sistema de riego de invernaderos hidropónicos, García (2004) realizó un control climático de invernaderos basado en el modelo del cultivo y en el procesamiento de imágenes, Gómez

(2005) implementó en FPGA un control difuso para el control de riego en invernadero, Santillán (2005) realizó un prototipo funcional que se encargó del suministro de la solución nutritiva a un cultivo bajo invernadero hidropónico de manera automática.

El monitoreo de variables climatológicas en un invernadero es un aspecto muy importante que se debe seguir ya que de ello depende el estado actual en el que se encuentra el invernadero, ejemplo de ello es el trabajo de Nila (2009) quien diseñó e implementó un sistema inalámbrico basado en un FPGA para el monitoreo remoto del estado de las variables climatológicas en invernaderos.

Los dispositivos de control que se utilizan en invernaderos dependen del presupuesto con que el proyecto cuente, se puede utilizar un microcontrolador, un PLC, FPGA, entre otros. En nuestro caso se utilizará un PLC basado en FPGA desarrollado por Muñoz (2009) basado en la arquitectura de un procesador PLC implementado en un FPGA mediante lenguaje de descripción de hardware, el cual cuenta con entradas y salidas, el cual el utilizó para controlar los eventos discretos de una máquina de control numérico.

Estos fueron algunos proyectos que se han realizado que van enfocados o se pueden aplicar a las nuevas tecnologías en invernaderos.

1.2. Objetivos.

Para el desarrollo de este proyecto se ha planteado un objetivo general y objetivos particulares, los cuales se estarán desarrollando durante el transcurso del proyecto de manera sistemática.

1.2.1 Objetivo general.

Diseñar e instrumentar un invernadero didáctico utilizando un controlador PLC basado en FPGA para emular el comportamiento de un invernadero real.

1.2.2. Objetivos particulares.

- Diseñar y construir una estructura a escala que se asimile a un invernadero tipo raspa y amagado, para fines didácticos de las siguientes medidas, 60 cm de ancho, 90 cm de largo y 50 cm de alto.
- Diseñar y construir tarjetas PCB para acondicionamientos de señal, tarjetas de potencia y amplificadores de salida para actuadores (sistema de riego, motores de ventanas, ventiladores, resistencia de calefacción, malla sombreada) y sensores (temperatura, humedad, iluminación, ventanillas).
- Instrumentar el invernadero didáctico con sensores de temperatura, humedad, iluminación y ventilación, así como la colocación de actuadores.
- Integrar el PLC basado en FPGA al invernadero didáctico para realizar el cableado.
- Integrar una PC y una pantalla touch screen al invernadero didáctico.
- Realizar pruebas de funcionamiento del invernadero didáctico.

1.3. Descripción del problema.

En la Facultad de Ingeniería Campus San Juan del Río, de la Universidad Autónoma de Querétaro se ha desarrollado tecnología, la cual puede ser implementada en la automatización de procesos y que ya ha sido probada en la facultad, en máquinas de control numérico, en máquina inyectora, en robots, etc.; sin embargo, aun no se ha abordado el área de invernaderos por lo que se hace necesario contar con un sistema o prototipo a escala donde esta tecnología pueda integrarse para que empresas interesadas en la aplicación en invernaderos puedan ver su funcionamiento.

La implementación de tecnología de invernadero ha sido de gran ayuda para la mayoría de personas que han podido brindar este tipo de tecnología en sus cultivos, pero el problema es

que la mayoría de estas tecnologías cuentan con equipos comerciales que pueden tener un precio muy elevado, esto se debe a que la mayoría de los equipos que se utilizan para la automatización de invernaderos son tecnologías provenientes del extranjero haciendo que el costo del equipo sea elevado, y además que son equipos de arquitectura cerrada, esto quiere decir que no se le puede hacer ninguna modificación o llega al grado que el equipo se daña y el único que lo puede reparar es el proveedor del producto, todo esto implica una ineficiencia en el control del invernadero.

Existe una gran diferencia entre cultivos que son producidos dentro de un invernadero y las que se generan a campo abierto. Ya que cuando se cultiva en campo abierto el producto está expuesto a la naturaleza, haciendo que se generen enfermedades en el cultivo, animales se lleguen a comer los frutos o flores dependiendo el tipo de plantío cultivado o que el clima alcance a destruir plantíos completos y de esta manera reduciendo la productividad ya que el producto no es óptimo y eficaz para su comercio y de esa manera se ve afectada la producción del cultivo.

Otro de los problemas que existe es la falta de confianza que se tiene a la tecnología generada en el país, una gran parte de las empresas dedicadas a la tecnología de los invernaderos utiliza tecnología extranjera desaprovechando y haciendo a un lado la tecnología que el país produce siendo de esta manera que no se reconozca las investigaciones y desarrollos que el país realiza con respecto a esta área.

Es por esto la necesidad de aplicar y mostrar la tecnología que la universidad ha desarrollado a empresas que se dedican a la tecnología de invernaderos, en un prototipo a escala, para convencer a los productores que pueden obtener mejores resultados en sus cultivos. Ya que muchos de los productores no quieren utilizar los invernaderos como una de las opciones que se tiene para el cultivo y mucho menos en invernaderos automatizados, debido al desconocimiento o desconfianza de la efectividad de la inversión en sus cultivos.

1.4. Justificación.

El invernadero didáctico controlado por un PLC basado en FPGA, parte de la necesidad de contar con un prototipo de invernadero como una de las nuevas tecnologías que se quiere

implementar en el área de tecnología en invernaderos, ya que al emular este tipo de tecnología permite ver el comportamiento de un invernadero real, además de que con este tipo de prototipo se puede mostrar la tecnología desarrollada en la universidad a empresas interesadas en los productos tecnológicos, como es el caso del PLC basado en FPGA, el cual servirá para la automatización en el proyecto.

Con la implementación de ese proyecto, se pueden obtener resultados que permitan llevar a cabo la automatización en invernaderos reales. Y de esa forma dar solución a personas que se dedican al cultivo, cuando la eficiencia de su producto no es muy buena. Además de que se podrá llevar al mercado productos frescos y de buena calidad para el consumo humano, con la integración de la tecnología que se desarrollara en su cultivo.

La tecnología que se aplica en este proyecto comparado con la tecnología que empresas dedicadas a la automatización de invernaderos aplica es muy similar ya que se pretende que se cuente con las mismas funcionalidades, sólo que la tecnología que se va aplicar al invernadero didáctico va a ser desarrollada durante el transcurso del proyecto o se integrara elementos que ya han sido desarrollados en la universidad como el PLC basado en FPGA, para que de esta forma se cuente con una tecnología que permita desarrollarse en invernaderos reales, pero con la gran diferencia de que la tecnología que se está desarrollando no se compara económicamente con la que empresas dedicadas a la automatización de invernaderos cuenta, ya que ellos basan su automatización en equipos comerciales que tienen un precio elevado y equipos estándares. De esta manera se puede comparar lo que se realiza en este proyecto con empresas dedicadas a la automatización de invernaderos ya que la tecnología es desarrollada en el país, haciendo que el costo sea menor. Recordar que en México hay grupos que producen tecnología la cual es utilizada por el país, el grupo TUNA (Tecnología Universitaria en Automatización) es uno de ellos el cual también desarrolla productos diseñados para automatizar y facilitar el trabajo en el campo mexicano. Contando con sistemas de monitoreo, control climático, sistemas de automatización, riego automático, etc. Basando su desarrollo de tecnología en FPGA. Con el proyecto presentado se aporta al igual que los grupos dedicado al desarrollo de nuevas tecnologías en la automatización de invernaderos.

Una de las grandes ventajas que tiene el cultivo bajo la tecnología de invernadero con respecto a campo abierto es que se ha comprobado que cultivar bajo la tecnología de invernadero tiene una producción de 3 a 10 veces más que cultivando a campo abierto (dato obtenido de SAGARPA) dependiendo del tipo de plantío que se cultive. Además de que el producto es mucho mejor, de buena calidad y se puede conservar más tiempo. Es por eso que la implementación de tecnología de invernadero juega un papel muy importante en la agricultura.

Al mostrar la tecnología que la universidad ha desarrollado a empresas que se dedican a la tecnología de invernaderos, en un prototipo a escala, se estará dando una opción para la aplicación en invernaderos reales pero primero se tendrá que convencer a los productores que pueden obtener mejores resultados en sus cultivos. Mostrando el funcionamiento del prototipo adecuadamente y que el prototipo del invernadero sea muy didáctico el cual muestre cada una de las funcionalidades de tal manera que sea comprensible para cualquier persona que este presenciando la emulación del invernadero y también para que se den cuenta de que la universidad ha venido trabajando en tecnología que puede ser aplicada de gran forma en el cultivo. Dando paso de esta forma al convencimiento de personas o empresas dedicadas a la tecnología del invernadero que utilizar la tecnología desarrollada en la universidad es un buena opción ya que se tendrá grandes ventajas como en el costo o en la misma tecnología que se ha generado ya que puede ser reprogramable o se puede dar solución a los problemas que se lleguen a presentar con personas de la misma universidad ya que conocen de gran forma la tecnología que se ha desarrollado dentro de la universidad. De esta manera es como el prototipo de invernadero tendrá su aportación en la universidad.

1.5. Planteamiento general.

En la figura 1.1 se muestra un diagrama a bloques del sistema en forma general. El primer bloque es el diseño de invernadero didáctico, aquí se realiza el diseño de la estructura del invernadero mediante el programa de AUTOCAD, seleccionando el material que se utiliza y las medidas que se requieren.

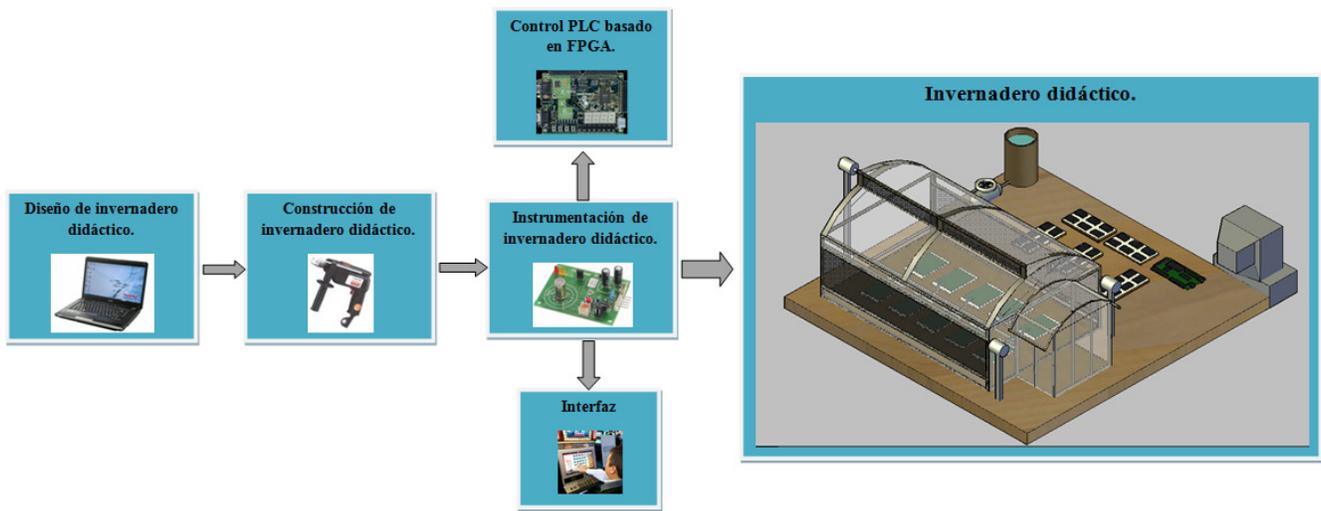


Figura 1.1. Diagrama general del proyecto.

En el bloque de construcción de invernadero didáctico, se construye la estructura del invernadero y se lleva a cabo el recubrimiento y protección adecuada del invernadero didáctico.

El bloque de instrumentación implica el diseño, la construcción e instalación de tarjetas PCB de sensores de temperatura, iluminación, humedad y ventilación, así como las tarjetas PCB que requieren los actuadores además de la ubicación de motores, ventiladores, malla sombreada, válvulas de riego etc.. Una vez construidas las tarjetas, se desarrollan los manejadores de las tarjetas y se prueban para comprobar que actúen de forma correcta. El siguiente bloque es el de interfaz donde se desarrolla el software y hardware para la comunicación PC-tarjeta (PLC). Posteriormente se desarrolla la implementación del PLC basado en FPGA en donde se realiza la conexión de las tarjetas PCB realizadas, con el PLC, una vez realizado esta etapa se pone a trabajar todo el módulo de conexiones para obtener el resultado final, ya que el resultado sea el adecuado, se tendrá un invernadero didáctico usando un PLC basado en FPGA.

Capítulo II

Fundamentación teórica.

El diseño e instrumentación de un invernadero didáctico como el que se plantea, requiere del conocimiento de varias herramientas teóricas de diversas disciplinas de la ingeniería, entre la más relevante se encuentra lo referente a invernaderos, instrumentación y control, entre otros.

2.1. Invernadero

El invernadero es una construcción de madera o de hierro u otro material, cubierta por cristales o plástico translucido, que tiene como objetivo reproducir o simular las condiciones climáticas más adecuadas para el crecimiento y desarrollo de las plantas cultivadas establecidas en su interior (Tognoni F. y Alpi A, 1999).

La producción de cultivos bajo invernaderos es una de las técnicas más modernas que se utilizan actualmente en la producción agrícola. La ventaja del sistema de invernadero sobre el método tradicional a cielo abierto, es que, bajo invernadero, se establece una barrera entre el medio ambiente externo y el cultivo. Esta barrera limita un microclima que permite proteger el cultivo del viento, lluvia, plagas, enfermedades, hierbas y animales. Igualmente, esta protección permite al agricultor controlar la temperatura, la cantidad de luz y aplicar efectivamente control químico y biológico para proteger el cultivo.

Un invernadero brinda un mayor control sobre el clima y las plagas para que el cultivo pueda lograrse, pero hay que recordar que el invernadero es solo un auxiliar para el logro de la cosecha, ya que se puede cultivar tanto a campo abierto como dentro de un invernadero, siendo la diferencia el control de las variables que se puede tener en el cultivo.

2.1.1. Características de un invernadero

Un invernadero debe de facilitar el cultivo y no dificultarlo, esa es la diferencia entre un invernadero útil y una estructura que por fuera parece un invernadero, pero por dentro es un horno para plantas. Un invernadero debe de cumplir con las siguientes características, para obtener un cultivo adecuado y eficiente para el consumo humano:

Proporcionar una temperatura adecuada para las plantas: La temperatura ejerce una gran influencia sobre el metabolismo de las plantas. La mayoría de las plantas solo puede vivir dentro de un rango de temperatura bastante estrecha, que va de 0 a 50°C. Sin embargo, el crecimiento de la mayoría de los cultivos ocurre dentro de un rango de temperaturas óptimas, la cual oscila entre 10 y 35°C (Alpi y Tognoni, 1999).

Permitir la entrada de la luz solar: La luz es un elemento que no se puede almacenar, solo se dispone de ella durante el día para emplearse en la fotosíntesis. Las plantas captan la energía solar en sus hojas para transformar la materia inorgánica, en materia orgánica que utilizan para su crecimiento y desarrollo. De tal manera que la luz se convierte en un elemento fundamental para un invernadero.

Permitir la ventilación dentro del invernadero: La función principal de la ventilación es la renovación del aire en el invernadero con la finalidad de aportar CO₂ necesario para el desarrollo de los cultivos y disminuir la temperatura interna. El CO₂ es un elemento de gran importancia para las plantas, puesto que interviene en la fotosíntesis, proceso mediante el cual las plantas liberan oxígeno y asimilan carbón para alimentar a todas las células de su cuerpo, formando todas sus estructuras del cuerpo.

Mantener una buena humedad ambiental: La humedad dentro de un invernadero interviene en varios procesos, como, el amortiguamiento de los cambios de temperatura, el crecimiento de las plantas y el desarrollo de enfermedades. La humedad se puede controlar y aumentar mediante sistemas de evaporación de agua, como nebulizadores, microaspersores y muros húmedos o regando agua en el piso para que se evapore, disminuya la temperatura y aumenta el contenido de humedad.

Evitar el crecimiento de maleza: La maleza son plantas que crecen abundantemente y que no tienen ningún valor comercial para el agricultor, por lo contrario son consideradas como una molestia dentro de los cultivos e instalaciones, siendo un obstáculo para el crecimiento y desarrollo adecuado del cultivo.

2.1.2. Materiales para la construcción de un invernadero.

Un invernadero es construido con diferentes materiales dependiendo de los recursos y factores con los que se cuenta.

Estructura: Los materiales más utilizados en la construcción de las estructuras de invernaderos son de madera, hierro, aluminio, alambre galvanizado y hormigón armado; es difícil encontrar un tipo de estructura que utilice solamente una clase de material, ya que lo común es emplear varias.

Cubierta: Un material perfecto para la cubierta es aquél que reúne los siguientes requisitos:

- Buen efecto de abrigo.
- Gran retención de calor.
- Gran rendimiento térmico.
- Gran transparencia a las radiaciones solares.
- Gran opacidad a las radiaciones infrarrojas largas emitidas por suelo y plantas durante la noche.

La cubierta que los invernaderos puede ser de vidrio impreso o catedral, plástico, plástico rígido: polimetacrilato de metilo (PMM), policarbonato (PC), poliéster con fibra de vidrio, policloruro de vinilo (PVC), plástico flexible: policloruro de vinilo (PVC), polietileno de baja densidad (PE), etileno vinilo de acetato (EVA), policloruro de vinilo (PVC) y materiales coextruidos.

Sombreado: El sombreado de invernaderos, produce el descenso de las temperaturas en el interior de las estructuras para disminuir la radiación global incidente. Se utiliza un tipo de malla, la cual se llama malla sombreada.

2.1.3. Factores para la elección de un invernadero.

La elección de un tipo de invernadero, es decir de su estructura, está en función de una serie de factores o aspectos técnicos tales como:

Tipo de suelo. Se deben elegir suelos con buen drenaje y de alta calidad aunque con los sistemas modernos de fertirriego es posible utilizar suelos pobres con buen drenaje o sustratos artificiales.

Topografía. Son preferibles lugares con pequeña pendiente orientados de norte a sur.

Vientos. Se tomarán en cuenta la dirección, intensidad y velocidad de los vientos dominantes.

Características climáticas. Se toma en cuenta el tipo de clima al cual está sometida la zona o el área geográfica donde se vaya a construirse el invernadero.

Disponibilidad de mano de obra (factor humano). Los recursos humanos deberán tomarse en cuenta con el fin de llevar un trabajo de la mejor manera sin carencias de ningún tipo (Alpi y Tognoni, 1999).

2.1.4. Tipos de invernadero.

Los invernaderos se pueden clasificar dependiendo de varios factores que caracterizan a cada uno de ellos, se dará una breve explicación de los diversos tipos de invernaderos que existen en base a su tipo de estructura, sistema de riego y tipo de clima.

Tipo de estructura:

La estructura con la que los invernaderos son construidos es de gran importancia ya que cada tipo de estructura tiene un propósito. Algunas de las configuraciones de invernaderos más comunes son:

Invernadero plano: El invernadero plano mostrado en la figura 2.1 está compuesto de dos partes: una estructura vertical y otra horizontal bien diferenciadas. Generalmente se utiliza en zonas con escasas precipitaciones. La estructura vertical está formada por soportes rígidos perimetrales de madera o acero galvanizado, usualmente cilíndricos que tienen una inclinación hacia el exterior de unos 30° con respecto a la vertical. La estructura horizontal está constituida por dos mallas de alambre galvanizado superpuestas, implantadas manualmente las que sirven para portar y sujetar la lámina del plástico.



Figura 2.1. Invernadero plano.

Invernadero en raspa y amagado: El invernadero en raspa y amagado mostrado en la figura 2.2 tiene una estructura similar a la del invernadero plano, pero varía la forma de la cubierta. En la cumbre, la altura máxima del invernadero oscila entre 3 y 4.2 m, formando una raspa. En la parte más baja se unen las mallas de la cubierta al suelo mediante vientos y horquillas de hierro que permiten colocar los canalones para el desagüe de las aguas pluviales. La orientación recomendada es en dirección este-oeste.



Figura 2.2. Invernadero en raspa y amagado.

Invernadero asimétrico: El invernadero asimétrico difiere del tipo raspa y amagado, en el aumento de la superficie en la cara expuesta al sur, este aumento tiene por objeto acrecentar la capacidad de captación de la radiación solar, para ello el invernadero se orienta en sentido este-oeste, paralelo al recorrido aparente del sol.

La inclinación de la cubierta es tal que permite que la radiación solar incida perpendicularmente sobre ella al medio día solar, durante el solsticio de invierno, época en la que el sol alcanza su punto más bajo. La figura 2.3 muestra un ejemplo de invernadero asimétrico.



Figura 2.3. Invernadero asimétrico.

Invernadero de capilla: El invernadero de capilla, la techumbre forma uno o dos planos inclinados, según sea a un agua o a dos aguas. La ventilación se realiza a través de ventanas frontales y laterales, pero cuando se trata de estructuras formadas por varias naves, la ausencia de ventanas cenitales dificulta la ventilación. La figura 2.4 muestra este tipo de estructura.



Figura 2.4. Invernadero de capilla.

Invernadero de doble capilla: El invernadero de doble capilla mostrado en la figura 2.5 está formado por dos naves yuxtapuestas. Su ventilación es mejor que en otros tipos de invernaderos, debido a la ventilación cenital en la cumbre de los dos eslabones que forma la yuxtaposición de la nave, estas aberturas de ventilación suelen permanecer abiertas constantemente y, por lo general, cuentan con malla mosquitera.

También posee ventilación vertical en las paredes frontales y laterales. Este tipo de invernadero no está muy extendido debido a que su construcción es más difícil y costosa, respecto del tipo de invernadero de capilla simple a dos aguas.



Figura 2.5. Invernadero de doble capilla.

Invernadero túnel o semicilíndrico: El invernadero túnel o semicilíndrico se caracteriza por la forma de su cubierta y por su estructura totalmente metálica, la figura 2.6 muestra este tipo de estructura. El empleo de este tipo de invernadero se está extendiendo en razón de su mayor capacidad para el control de los factores climáticos, su gran resistencia a fuertes vientos y su rapidez de instalación al constar de estructuras prefabricadas.

La ventilación se realiza mediante ventanas cenitales que se abren hacia el exterior del invernadero.



Figura 2.6. Invernadero túnel o semicilíndrico.

Invernadero de cristal: El invernadero de cristal mostrado en la figura 2.7, se emplea generalmente en el norte de Europa, consta de una estructura metálica prefabricada y de una cubierta de vidrio. El techo está formado por paneles de vidrio que descansan sobre los canales de recogida de pluviales y sobre un conjunto de barras transversales (Colombini et. al., 2005).



Figura 2.7. Invernadero de cristal.

Tipo de sistemas de riego.

El objetivo del riego es racionalizar el uso de agua, incidiendo en el control más estricto del riego y la fertilización para generar un menor impacto ambiental.

Algunos sistemas de riego se describen a continuación:

Sistema de riego aéreo.

Estos son sistemas de riego en los que el agua se aplica a los cultivos en forma de lluvia, mojando la totalidad de la planta así como la del sustrato o superficie cultivada. Se clasifican en: aspersión, miniaspersión, nebulización, pulverización y tren de riego. La figura 2.8 muestra un sistema de tren de riego.



Figura 2.8. Sistema de riego aéreo (tren de riego).

Aspersión: Sistema apropiado para el riego de cultivos en el exterior en los que se desee aportar una precipitación de tipo medio.

Miniaspersión: Sistema apropiado para el riego de todo tipo de cultivos especialmente en invernaderos, con la posibilidad de obtener precipitaciones muy diversas orientadas a distintos tipos de cultivos.

Nebulización: Sistema apropiado para el riego de plantas, semilleros y plantas en maceta de pequeño formato de un fino tamaño de gota, debido a la fragilidad de la misma planta.

Tren de riego: Sistema apropiado para el riego de plántulas en invernaderos y de plantas de maceta o contenedor en el exterior. Consiste en una rampa de riego regulable a la altura, que se desplaza sobre un carro motor que discurre sobre un perfil o guía, llevando consigo la tubería o manguera de conducción del agua, originando un circuito de ida y vuelta.

Sistemas de riego localizados.

Son sistemas de riego en los que sólo se humedece una parte del suelo, de donde la planta podrá obtener el agua y los nutrientes que necesita e implica una alta frecuencia de aplicación. Este tipo de sistema de riego se clasifica en: goteo, cintas exudantes y microaspersión. La figura 2.9 muestra un sistema de riego por goteo.



Figura 2.9. Sistema de riego localizado (por goteo).

Goteo: Sistema apropiado para el riego de árboles y arbustos tanto en exterior como en invernadero, en los que se pretende localizar el agua en cada planta a través de un emisor.

Cintas exudantes: Las cintas de exudación son tuberías de material poroso que distribuyen el agua de forma continua a través de sus poros, lo que da lugar a la formación de una franja continua de humedad, que las hace muy indicadas para el riego de cultivos en línea.

Microaspersión: Sistema apropiado para el riego de grandes contenedores de árboles y arbustos de gran tamaño en invernadero o en el exterior, que consiste con un solo emisor, humedecer toda la superficie del sustrato.

Sistema de riego por subirrigación.

Se basa en la instalación de una lámina de tejido absorbente bajo las macetas, bien en suelo o mesa de cultivo, fabricada normalmente de materiales de tipo lana o algodón, siendo apropiado para el riego de plantas en maceta cuyo pequeño diámetro y altura permita así la absorción del agua hacia el sustrato por capilaridad. La figura 2.10 muestra este tipo de sistema de riego.



Figura 2.10. Sistema de riego por subirrigación.

Sistema de riego por inundación.

El sistema de riego por inundación mostrado en la figura 2.11, tiene características parecidas al de subirrigación, se basa en el llenado y vaciado de grandes bandejas o recintos prefabricados sobre los que se sitúan las macetas o contenedores, permaneciendo estos sumergidos durante un corto periodo de tiempo, durante el cual un sustrato absorbe el agua por capilaridad, siendo la altura del nivel de agua necesaria, proporcional a la altura de la maceta o contenedor a regar (Santos et. al., 2010).



Figura 2.11. Sistema de riego por inundación.

Tipo de clima.

El clima es un factor muy importante en un invernadero ya que el cultivo depende de la temperatura a la que se encuentre dentro del invernadero y esta varía dependiendo del cultivo a sembrar.

Se describen algunos tipos de climas en invernaderos:

Invernaderos de clima frio: Un invernadero de clima frio es el más barato de mantener, ya que consiste en una estructura que sólo recibe el calor del sol. En este tipo de invernaderos la temperatura interior será de 5°C. Este tipo de invernaderos se usa para sembrar o almacenar plantas de semillero a finales de invierno o primavera. También se puede utilizar en verano y hasta principios de otoño para cultivar determinadas plantas.

Invernaderos de clima fresco: Este tipo de invernaderos puede mantener una temperatura mínima de 5-7°C. Estos invernaderos se calientan durante los meses de invierno en zonas de clima frio. Puede usarse para proteger a las plantas sensibles a las heladas, para cultivar plantas tres o cuatro semanas antes que en el invernadero frio, para cultivos de estación templada durante el verano, para cultivos de clima fresco durante el otoño e invierno.

Invernaderos de clima templado: Este tipo de invernadero puede tener una temperatura mínima de 13°C con calor adicional durante el día y la noche, dependiendo de su comportamiento. La calefacción en este tipo de invernaderos es muy importante ya que en cuanto la temperatura empiece a descender la calefacción subirá para mantener el clima adecuado.

Invernaderos de clima cálidos: Este tipo de invernaderos resulta ser el más caro en cuanto a su mantenimiento, ya que mantiene una temperatura mínima de 18°C con ayuda de calor adicional. Aunque puede resultar demasiado sofocante para diversos cultivos, puede destinarse al cultivo de plantas tropicales y subtropicales.

2.1.5. Invernadero automatizado.

Para lograr una buena producción en el cultivo, se debe tener en cuenta los factores que afectan y que perjudican la siembra y encontrar cuál de estos factores se pueden controlar y de esa manera ayudar y favorecer al cultivo para lograr un buen producto.

Un invernadero automatizado es una estructura para generar un producto de buena calidad, eficiente y que no depende del momento en que se cultive, ya que solo depende de variables a controlar como son: temperatura ambiente, humedad relativa, nivel de iluminación y aireación ambiental para lograr una buena producción en el cultivo. En la figura 2.12 se puede observar cómo es que se produce el riego al cultivo automáticamente por un sistema de tren de riego.

Tomando en cuenta las variables a controlar, se realiza la instrumentación del invernadero, con la colocación de sensores que puedan proporcionar las lecturas de la temperatura, humedad, ventilación e iluminación, dependiendo de las lecturas que estos proporcionen un controlador (PLC, Microcontrolador, FPGA, controlador PID, etc.) tomará la lectura y evaluará el comportamiento del sistema para poner a trabajar a los actuadores (motores, ventiladores, etc.) si el sistema lo requiere, logrando así un microclima para el óptimo desarrollo de una plantación específica. De esta manera es como un invernadero automático realiza sus funciones (Colombini et al., 2005).



Figura 2.12. Invernadero automatizado.

2.2. Instrumentación de un invernadero.

La instrumentación está formada por un grupo de elementos que sirven para medir, controlar o registrar variables de un proceso con el fin de optimizar los recursos utilizados en éste. En la instrumentación de un invernadero lo más importante es el medio ambiente que es generado por eso el control de los parámetros ambientales se realiza mediante el conjunto de actuadores, de modo más o menos sofisticado, con la medición de una red de sensores. El grado de coordinación y eficiencia de la relación ambiente-sensores-actuadores determina la sensibilidad y fiabilidad del sistema del control del ambiente.

2.2.1. Actuadores.

El invernadero, el más representativo de las protecciones, es una estructura concebida para que deje atravesar la radiación solar sin alterar por ello el espectro y al mismo tiempo impedir la dispersión del calor hacia el exterior. De hecho es un actuador, si bien se regula con dificultad. Su funcionamiento está determinado por las características estructurales, pero sobre todo por el ambiente colindante por lo que de vez en cuando es necesario elevar (la temperatura, la intensidad luminosa, la humedad relativa y el nivel de CO₂), bajar (la temperatura, la intensidad luminosa) o sustituir (aplicación o reducción de la duración del día o de la noche) los niveles de los parámetros ambientales espontáneos del invernadero con intervenciones capaces de adecuarlas a las exigencias específicas o contingentes de las plantas en cultivo.

En estas condiciones, los límites mayores hacia una regulación suficientemente buena de los parámetros ambientales los determina:

Las asimetrías de las condiciones ambientales en el interior del invernadero.

La discontinuidad operativa de los actuadores especiales.

La necesidad de tratar al mismo tiempo una masa de aire desproporcionada con la potencia de los actuadores.

A continuación se describen de forma breve los actuadores más comunes y los problemas relacionados con su eficiencia operativa.

Temperatura (aumento). El aumento de la temperatura se realiza con métodos estáticos (termosifón, tubos de aletas, calentamiento de los sustratos o del pavimento del invernadero) y dinámicos (aerotermos), siendo estos últimos los más utilizados. Los problemas que surgen en su funcionamiento son diversos: Los sistemas estáticos tienen una mayor inercia y necesitan, en general, de un doble sistema de set-point (punto de ajuste), uno para el fluido de intercambio y otro para el aire del invernadero. Los sistemas dinámicos provocan una consistencia y repentina disminución de la humedad del aire.

Temperatura (disminución). El invernadero es fundamentalmente una trampa de calor, esto significa que buena parte del año es necesario soportar el calor en exceso en cuanto la temperatura tiende a asumir valores incompatibles con las exigencias de la planta. Los métodos para la disminución de temperatura pueden ser: ventilación natural (apertura de las portezuelas laterales y de arriba, aprovechando el efecto corriente), ventilación forzada (extractores) y refrigeración permiten contener estas elevaciones térmicas.

Humedad relativa. La humedad relativa se regula casi exclusivamente en aumento en cuanto la mayor parte de las plantas cultivadas en invernadero exigen niveles más elevados que los exteriores. Si fuese necesario se puede deshumidificar con la ventilación. La regulación se efectúa actuando sobre los tiempos y frecuencias de funcionamiento de los actuadores. Los elementos o técnicas más utilizadas para regular la humedad relativa se describen a continuación.

Anhídrido carbónico. Para el enriquecimiento de CO_2 del aire del invernadero se utiliza sobre todo tres sistemas; distribución de bombas y depósitos, generación específica o bien generación de recuperación en los sistemas de calentamiento a gas. No se plantean problemas particulares de regularización y las anomalías de concentración se deben casi exclusivamente al funcionamiento de las instalaciones de ventilación.

Iluminación. La luz es objeto de regulación solo cuando considera los excesos de radiación y sobre todo con los sistemas de sombra, con la tela fija o móvil, que reducen la radiación

natural en un determinado porcentaje. Para evitar en parte este inconveniente se recurre a un ensombreamiento fijo estacional o dos o más redes. Sin embargo, con estos actuadores no se podrá pensar una buena regulación.

Los actuadores empleados en el invernadero y el mismo invernadero, se prestan mas a una regulacion demaciado sofisticada, y el nivel de automatizacion debe ser proporcional a la eficiencia de las máquinas y de los aparatos instalados.

2.2.2. Sensores.

Un papel determinante en la gestion del ambiente lo desempeñan los sensores, los cuales informan a los instrumentos de control y mando sobre el nivel de determinado parámetro y sobre la necesidad o no de hacer que intervenga el actuador específico para restablecer el nivel seleccionado de antemano. En consideración a la importancia de esta funcion se deben satisfacer una serie de requisitos:

Sensibilidad y poder de resolución elevados.

Estabilidad de la respuesta en el tiempo sin que sean necesarios ajustes demasiado frecuentes.

Insensibilidad mecánica y operativa respecto a los demas parámetros ambientales y a los productos empleados en el proceso productivo.

Los principales sensores utilizados en invernaderos son: de temperatura, iluminacion, humedad relativa y CO₂ (Alpi y Tognoni, 1999).

2.2.3. Acondicionadores de señal.

Los acondicionadores de señal, adaptadores o amplificadores, en sentido amplio, son los elementos del sistema de medida que ofrecen, a partir de la señal de salida de un sensor electrónico, una señal apta para ser representada o registrada o que simplemente permita un procesamiento posterior mediante un equipo o instrumento estándar. Consiste normalmente en circuitos electrónicos que ofrecen entre otra funciones, las siguientes: amplificación, filtrado, adaptación de impedancias y modulación o demodulación (Pallás, 2002).

Amplificador operacional.

Los amplificadores operacionales han estado usándose desde hace mucho tiempo y una de sus principales aplicaciones se encuentra dentro de la instrumentación electrónica como acondicionador de señal. A continuación se presenta las configuraciones que se pueden utilizar con los amplificadores operacionales.

Amplificador inversor.

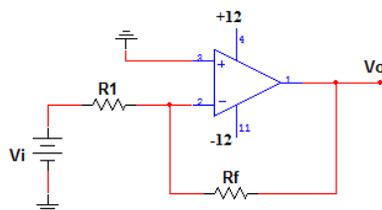


Figura 2.13. Circuito amplificador inversor.

Es representado con la ecuación 2.1.

$$V_o = -\frac{R_f}{R_1} V_i \quad (2.1)$$

Amplificador no inversor.

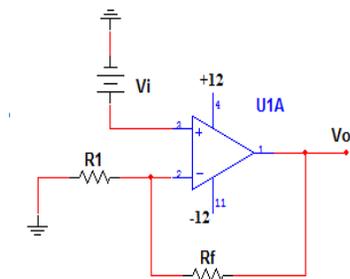


Figura 2.14. Circuito amplificador no inversor.

El circuito no inversor es representado con la ecuación 2.2.

$$V_o = \frac{V_i R_f + R_1}{R_1} = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) V_i \quad (2.2)$$

Amplificador restador o de diferencia.

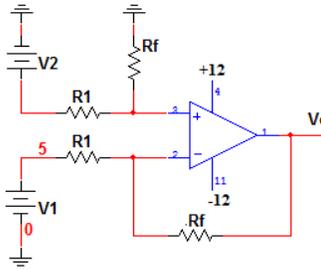


Figura 2.15. Circuito amplificador restador o de diferencia.

La ecuación 2.3 representa al circuito amplificador restador o de diferencia.

$$V_o = \frac{R_f}{R_1} (V_2 - V_1) \quad (2.3)$$

Amplificador de instrumentación.

El amplificador de instrumentación (figura 2.14) es un amplificador diferencial tensión-tensión cuya ganancia puede establecerse de forma muy precisa y que ha sido optimizado para que opere de acuerdo a su propia especificación aún en un entorno hostil. Es un elemento esencial de los sistemas de medida, en los que se ensambla como un bloque funcional que ofrece características funcionales propias e independientes de los restantes elementos con los que interacciona (Coughlin y Driscoll, 1993).

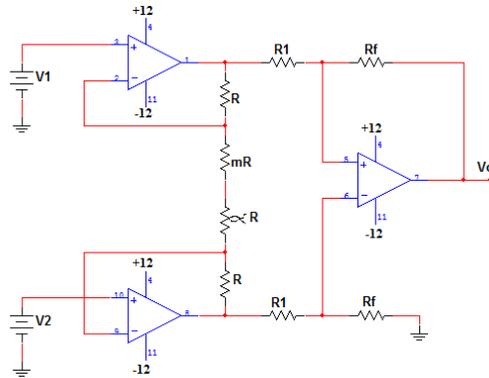


Figura 2.16. Circuito amplificador de instrumentación.

La ecuación 2.4 describe matemáticamente al circuito de instrumentación.

$$V_o = \frac{R_f}{R_1} \left(\frac{2R}{\alpha R + mR} + 1 \right) (V_2 - V_1) \quad (2.4)$$

2.3. Instrumentos de control en invernaderos.

Todo proceso en el cual la automatización está presente, es necesario contar con un instrumento que permita dar lectura a las variables que se controlan (señales que reciben de entrada) para que de esta forma activen los actuadores para que realicen su labor (señales de salida del controlador) y de esta manera tener un sistema automático donde las variables a controlar y los actuadores son comandados por un instrumento de control. Entre los instrumentos de control que son utilizados para la automatización se encuentra el microcontrolador, PLC, FPGA.

2.3.1. Microcontroladores.

Un microcontrolador es un circuito integrado programable que contiene todos los componentes necesarios para controlar el funcionamiento de una tarea determinada. Para ésto, el microcontrolador utiliza muy pocos componentes asociados. Un sistema con microcontrolador debe disponer de una memoria donde se almacena el programa que gobierna el funcionamiento del mismo que una vez programado y configurado, sólo sirve

para realizar la tarea asignada. La utilización de un microcontrolador en un circuito reduce notablemente el tamaño y número de componentes y, en consecuencia, disminuye el número de averías y el volumen y el peso de los equipos, entre otras ventajas (Palacios et. al. ,2004).

Hay varias características que son deseables en un microcontrolador.

Recursos de entrada y salida. Entradas/salidas, manejo de interrupciones, señales analógicas.

Espacio optimizado. Menor espacio posible.

Capacidad idónea para una aplicación.

Seguridad en el funcionamiento

Bajo consumo de energía.

2.3.2. PLC (Programmable Logic Controller, Controlador Lógico Programable)

Un PLC es un instrumento electrónico digital con una memoria programable capaz de almacenar instrucciones que desarrollan funciones específicas para controlar a través de entradas y salidas digitales o analógicas, diversos tipos de máquina o procesos. Los PLC son dispositivos muy usados en automatización industrial. Actualmente los PLC se encuentran en muchas industrias, realizando la tarea de control de los procesos, los cuales pueden ser muy diferentes. El PLC puede recibir entradas analógicas y digitales, las cuales procesa de acuerdo a la programación que introduce el usuario para obtener una respuesta de control deseada. Para programar la función del PLC existen diferentes lenguajes que pueden ser utilizados, desde diagramas de escalera hasta lenguajes de programación de alto nivel.

Una de las aplicaciones del PLC es trabajar con señales discretas, las cuales funcionan con entradas y salidas, esto quiere decir que cuando una entrada es activada o desactivada en la

salida también se va notar el cambio de estado de la bobina, o sea que la salida siempre dependerá de cómo se comporte la entrada. Es así el funcionamiento de las señales discretas en el PLC.

2.3.3. FPGA (Field Programmable Gate Array, Arreglo de compuertas programables en campo).

Los FPGA son dispositivos semiconductores programables que están basados en una matriz de bloque lógicos configurables conectados por interconexiones programables. Debido a su naturaleza programable y a su capacidad (hasta millones de compuertas), los FPGA`s han incursionado en distintos mercados, y con muchas aplicaciones, por ejemplo en los campos: aeroespacial y defensa, automotriz, transmisión de audio y video, redes de comunicación, industria (Control) y medicina, entre otros (Kucklick, 2006).

El diseño electrónico es cada vez más accesible, lenguajes de descripción de hardware y tecnologías como un FPGA permiten desarrollar sistemas complejos con gran facilidad y a un costo accesible. Por la razón antes mencionada se ha desarrollado un procesador PLC que es posible implementar en la automatización. El diseño de un procesador PLC basado en un FPGA permite controlar eventos discretos.

2.3.4. Controladores.

Controladores Clásicos.

Un sistema que mantiene una relación determinada entre la salida y la entrada de referencia, comparándolas y usando la diferencia como medio de control se denomina sistema en lazo cerrado. Los sistemas en los cuales la salida no tiene efecto sobre la acción correctora se denominan sistemas en lazo abierto (Ogata, 2006).

El controlador es el elemento encargado de procesar la señal de error y generar una señal encargada de disminuir el valor de dicha señal de error con el objetivo de lograr la máxima precisión posible del sistema de control. El procedimiento mediante el cual dicho controlador genera la señal de control se denomina acción de control.

Los controladores pueden clasificarse de acuerdo a su acción de control como:

1. Controladores de dos posiciones o encendido-apagado.
2. Controladores proporcionales.
3. Controladores integrales.
4. Controladores proporcionales integrales.
5. Controladores proporcionales derivativos.
6. Controladores proporcionales integrales derivativos.

- Controlador de dos posiciones.

Este tipo de controladores solo tiene solo dos posibles salidas dependiendo del valor de su entrada el comportamiento del controlador se puede mostrar de la siguiente manera:

$$m(t)=M_1 \quad \text{para} \quad e(t) > 0$$

$$m(t)=M_2 \quad \text{para} \quad e(t) < 0$$

Donde $m(t)$ es la salida del controlador, $e(t)$ es la señal de error actuante y M_1 y M_2 son constantes.

- Controlador proporcional.

El controlador proporcional genera en su salida una señal de control que es proporcional a la señal de error. De este modo su función de transferencia está determinada por (2.5).

$$\frac{U(s)}{E(s)} = Kp \quad (2.5)$$

Donde $U(s)$ es la salida del controlador, $E(s)$ es la señal de error y Kp es la ganancia proporcional.

- Controlador integral.

La acción de control integral genera una señal de control proporcional a la integral de la señal de error, tiene como función de transferencia la indicada por (2.6).

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{Ki}{s} \quad (2.6)$$

Donde $U(s)$ es la salida del controlador, $E(s)$ es la señal de error y Ki es la ganancia integral.

La característica más importante de este tipo de control es que la acción correctora se efectúa mediante la integral del error, ello permite decir que el control integral proporciona una señal de control que es función de la propia 'historia' de la señal de error, permitiendo obtener una señal de control diferente de cero aunque la señal de error sea cero (Spartacus et. al., 2001).

- Controlador proporcional integral.

La acción de control proporcional integral (PI) genera una señal resultante de la combinación de la acción proporcional y la acción integral conjuntamente. Su función de transferencia se representa en (2.7).

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{Ki}{s} + Kp \quad (2.7)$$

Donde $U(s)$ es la salida del controlador, $E(s)$ es la señal de error, Kp es la ganancia proporcional y Ki es la ganancia integral.

El control proporcional integral combina las ventajas de la acción proporcional y de la acción integral; la acción integral elimina el error estacionario, mientras que la acción proporcional reduce el riesgo de inestabilidad que conlleva la introducción de la propia acción integral (Spartacus et. al., 2001).

- Controlador proporcional derivativo.

La acción de control proporcional derivativa (PD) genera una señal que combinación de la acción proporcional y la acción derivativa conjuntamente. Su función de transferencia se representa en (2.8).

$$\frac{U(s)}{E(s)} = Kds + Kp \quad (2.8)$$

Donde $U(s)$ es la salida del controlador, $E(s)$ es la señal de error, Kp es la ganancia proporcional y Kd es la ganancia derivativa.

El control proporcional derivativo proporciona al sistema una mayor estabilidad relativa que se traduce en una respuesta transitoria con menor sobreimpulso. Sin embargo, cuando la influencia del control es muy grande, el sistema de control tiende a ofrecer una respuesta excesivamente lenta.

- Controlador proporcional integral derivativo.

La acción de control proporcional integral derivativa (PID) genera una señal resultado de la combinación de la acción proporcional, la acción integral y la derivativa conjuntamente siendo este el más utilizado para los problemas de control en la industria. En (2.9) se presenta la función de transferencia de este controlador.

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{kds^2 + kps + ki}{s} \quad (2.9)$$

Donde $U(s)$ es la salida del controlador, $E(s)$ es la señal de error, Kp es la ganancia proporcional, y Ki es la ganancia integral y Kd es la ganancia derivativa.

La acción de control proporcional integral derivativa permite eliminar el error en estado estacionario, logrando una buena estabilidad relativa del sistema de control. La mejora de estabilidad relativa implica una respuesta transitoria con tiempos de adquisición y un valor de sobreimpulso máximos pequeños (Spartacus et. al., 2001).

Capítulo III

Metodología

En este capítulo se presenta el proceso de desarrollo de este trabajo. Este trabajo se dividió en varias etapas. La primera etapa consiste en el diseño de la estructura del invernadero didáctico mediante el software de diseño AutoCAD. La segunda etapa se presenta la construcción de la estructura del invernadero y el forrado de la estructura. La etapa número tres es el diseño y construcción de PCBs. Una vez que las PCBs han sido construidas se realiza la instrumentación del prototipo de invernadero que es la etapa número cuatro. La etapa cinco es probar si realmente funcionan las tarjetas correctamente es necesario para esto generar módulos en VHDL y poner en funcionamiento la instrumentación que se ha realizado en el invernadero y hacer el control con el PLC basado en FPGA. Para que se pueda interactuar con el control del invernadero y un usuario desde la computadora es necesario realizar una interfaz de comunicación la cual se desarrollo en la etapa número seis. Ya por último se presenta una rutina que pone en funcionamiento la automatización del invernadero que realiza el PLC basado en FPGA.

3.1. Diseño del invernadero didáctico.

Primero se buscó información con respecto a los tipos de diseños de invernaderos, una vez visualizado los diseños se ha seleccionado el tipo raspa y amagado (figura 3.1). La elección del diseño fue simplemente por la arquitectura y forma de vista que tiene.



Figura 3.1. Diseño de invernadero tipo raspa y amagado.

Ya que se cuenta con la forma y la característica que la estructura del prototipo de invernadero va tener, se seleccionan las medidas con las cuales va contar, aunque no tiene una escala exacta, las medidas que se proporcionan tienen una relación con las de los invernaderos reales, es por eso que se acordó que cuente con las siguientes medidas: 60 cm de ancho, 90 cm de largo y 30 cm de alto para la base principal y que el techo tenga 20 cm más de alto para que el invernadero tenga una altura total de 50 cm, también cuenta con una entrada de 20 cm de ancho, 20 cm de largo y 30 cm de alto.

Se planteó el diseño con el cual el invernadero se puede visualizar, para que de esta forma se cuente con una herramienta que permite observar la forma o aspecto que el proyecto tiene y así seguir con la construcción del mismo.

Para realizar el diseño se utilizó el software AUTOCAD 2010 ya que con las herramientas suficientes para facilitar el diseño del invernadero didáctico.

La secuencia del diseño fue la siguiente:, lo primero es abrir el programa de AUTOCAD y ver donde se encuentran las herramientas de las que se puede disponer. Ahora como se

quiere visualizar en 3D, en la parte de abajo se encuentra una opción de modelado que si se elige desplaza un menú, se selecciona la opción de Modelado en 3D como se muestra en la figura 3.2, para tener el espacio de trabajo en 3D y de esta forma empezar con el diseño.

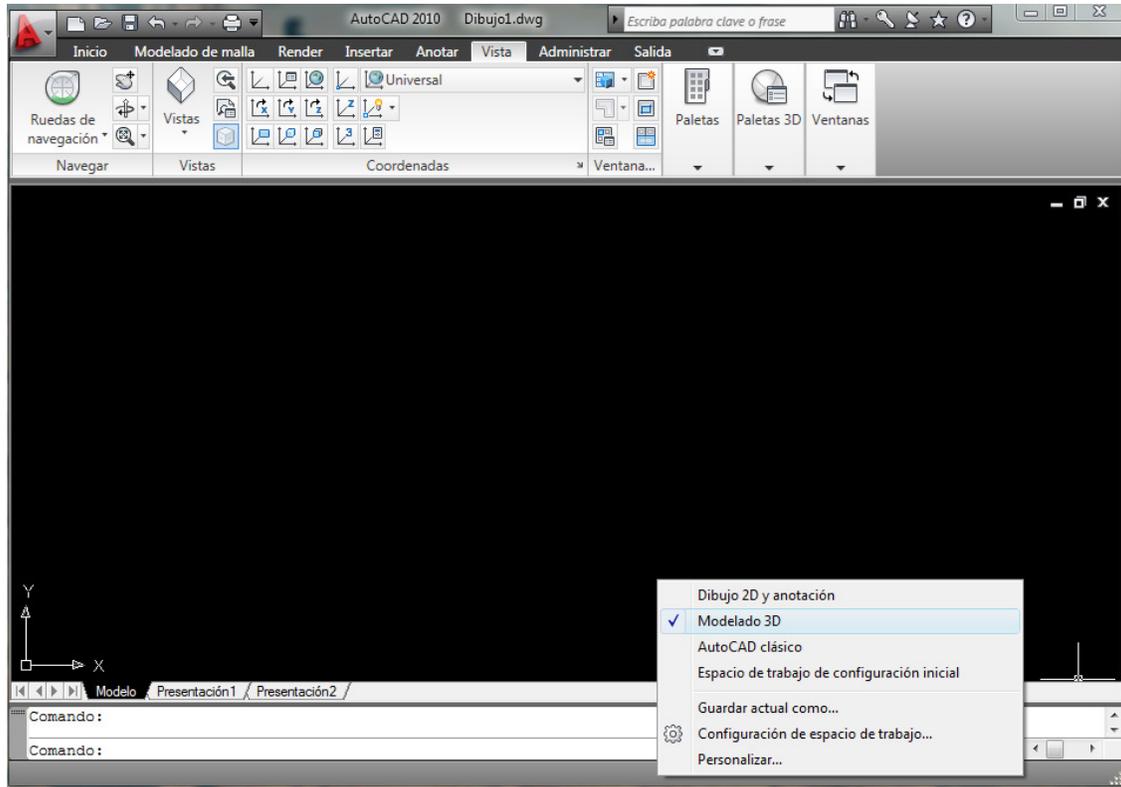


Figura 3.2. Modelado en 3D.

Una vez que ya se cuenta con el espacio de trabajo en 3D del menú principal de AUTOCAD se selecciona Inicio y una de las herramientas es Prisma rectangular, con esa opción se dibuja la base principal del invernadero, la figura 3.3 muestra la selección de la herramienta para el trazo de la base principal. La opción de Prisma rectangular se forma con tres parámetros ancho, largo y alto, es necesario por lo tanto proporcionar dichas medidas para que se forme un prisma rectangular.

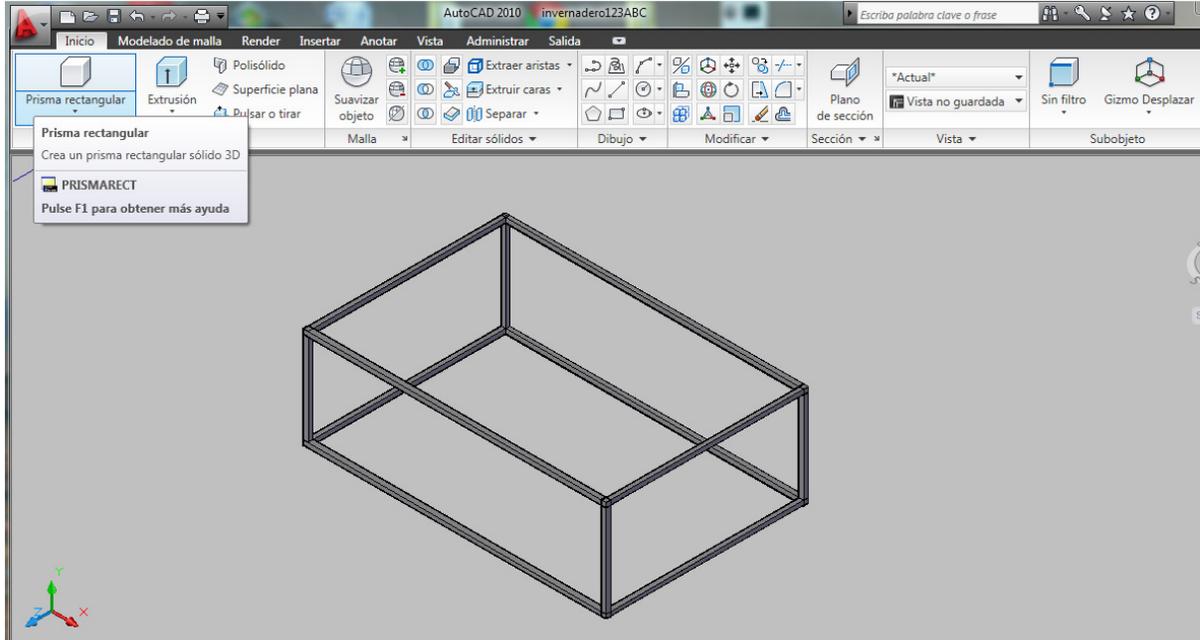


Figura 3.3. Diseño de la estructura en AUTOCAD.

Para realizar otro tipo de trazos geométricos se utilizan las mismas herramientas que el menú inicio de AUTOCAD brinda como arcos, círculos, elipses u otra forma geométrica que se requieran. Para dibujar el techo del invernadero se utiliza la opciones del menú inicio, una opción para la realización de este diseño fue la de superficie plana y arcos, es como utilizando estas dos opciones se genera el diseño de la estructura del techo. En la figura 3.4 se puede observar la forma que toma el techo de la estructura del invernadero desarrollada en AUTOCAD.

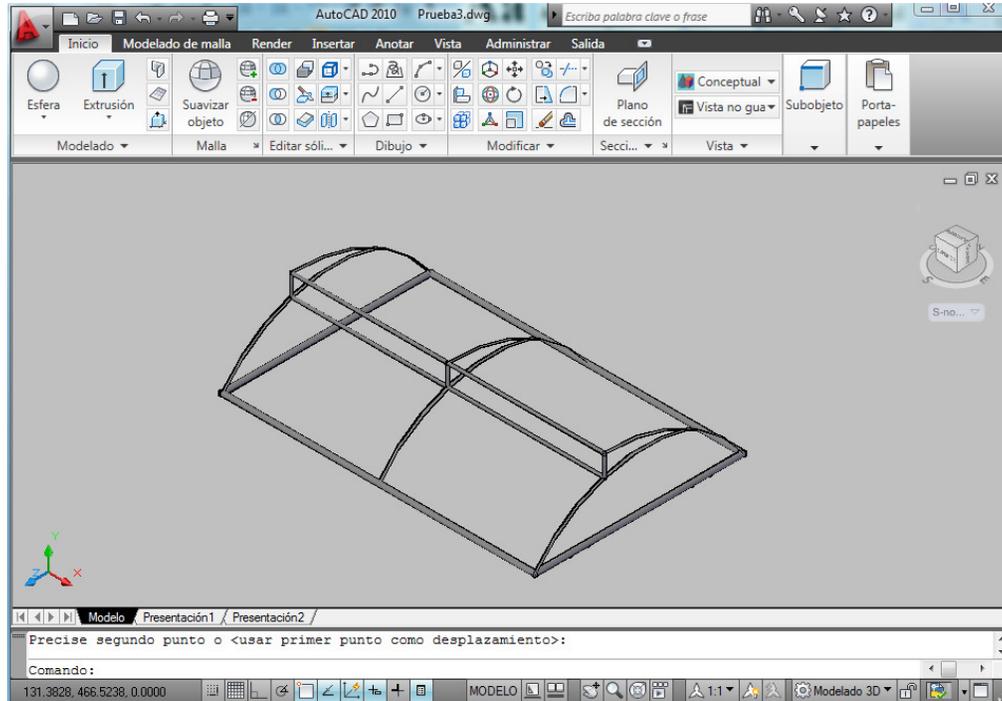


Figura 3.4. Diseño del techo del invernadero.

Ya que se dibujo la estructura principal del prototipo de invernadero se le da color y textura al diseño seleccionando del menú de AUTOCAD, Vista la cual brinda dos herramientas muy importantes una es la de Estilos visuales y la otra de Materiales, en la figura 3.5 se observa la ubicación de estas dos herramientas. Al seleccionar la herramienta de Materiales proporciona opciones de textura las cuales se pueden utilizar para hacer más real el diseño. De las opciones de textura que el software brinda en este caso se eligió la de plásticos para que la estructura se vea como el forro que cubren los invernaderos, para hacerlo transparente se baja el brillo y la opacidad de las propiedades del material y otra opción para el diseño del invernadero didáctico es la de cuero negro para que se vea como si fuera la malla sombra que se encuentra en los invernaderos e igual que el material anterior se configuran sus propiedades para hacerlo más real. La figura 3.6 muestra la forma que va tomando el diseño una vez que se le ha dado textura y color.

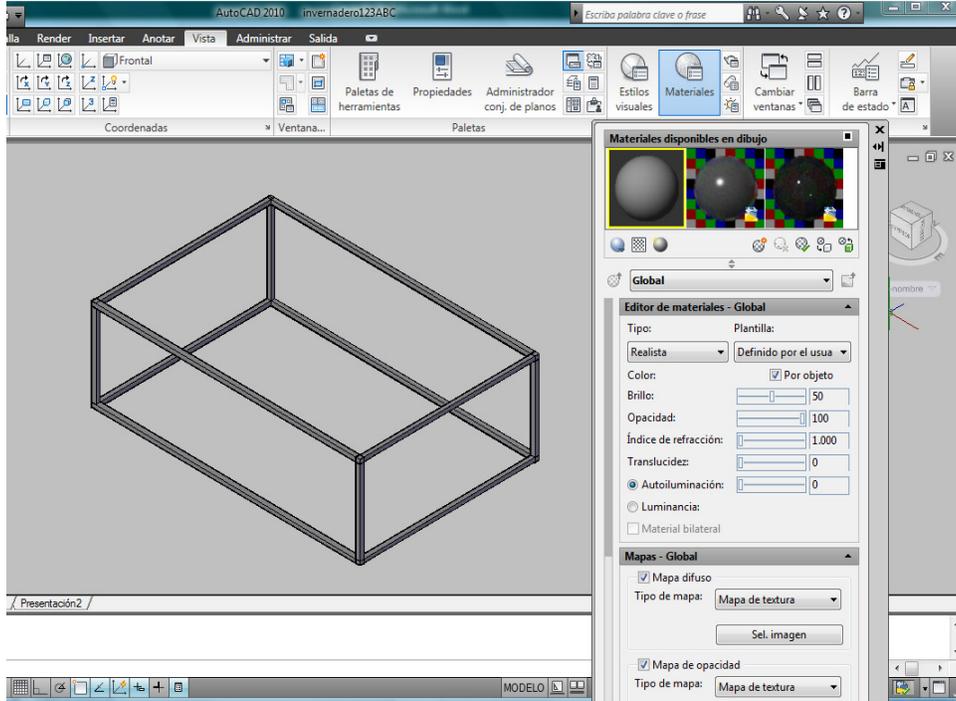


Figura 3.5. Selección de Estilos visuales y Materiales.

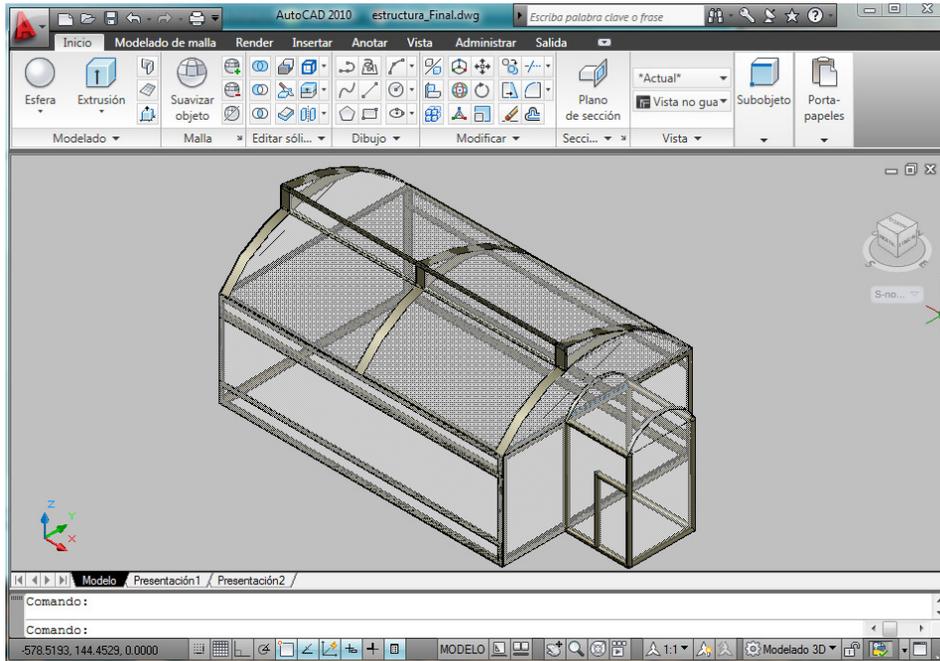


Figura 3.6. Aplicación de texturas en la estructura del prototipo de invernadero.

Posteriormente se dibuja la base donde la estructura se va a montar la cual mide 1.30 m de largo y 1.10 m de ancho y donde se va a colocar toda la instrumentación, para dar la idea del

espacio que ocupa y como es que se va a ver el prototipo de invernadero. La figura 3.7 muestra la base principal así como componentes que asimilan lo que en el prototipo didáctico va contar. Cada componente se dibujo con las herramientas principales utilizadas durante todo el diseño que se ha realizado.

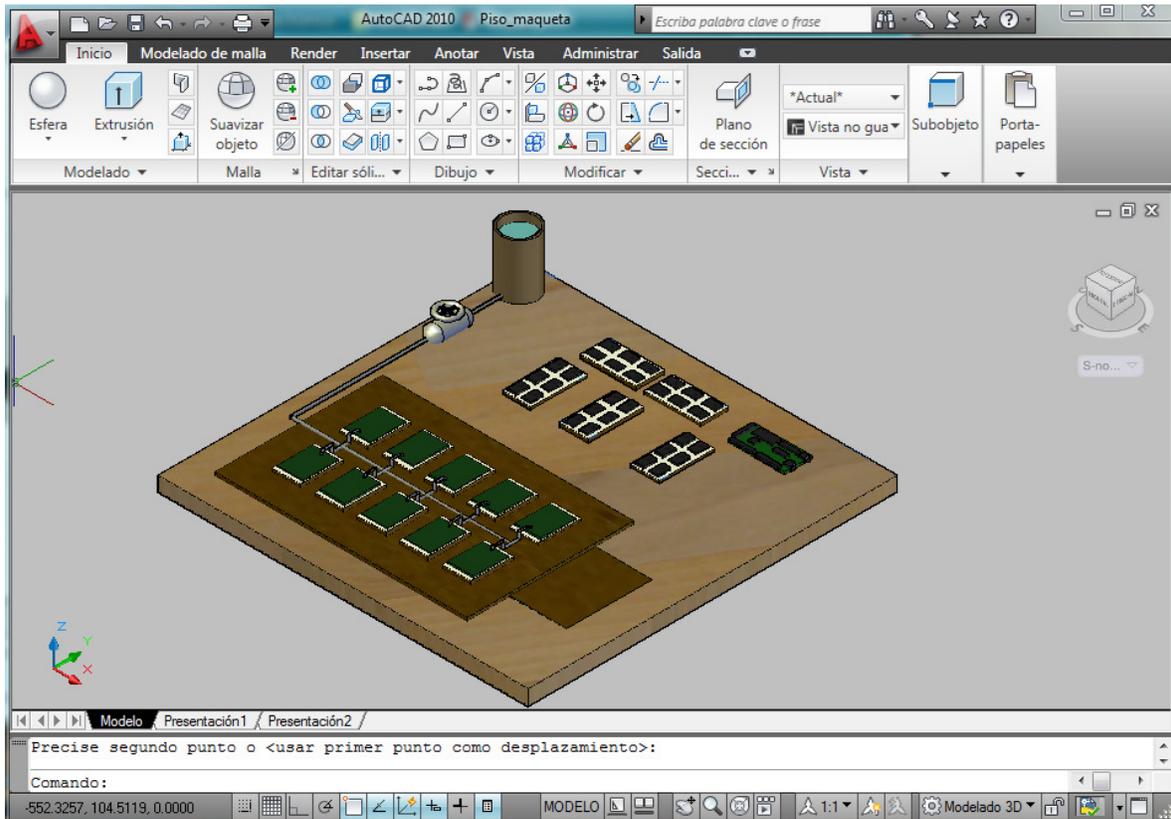


Figura 3.7. Diseño de la base del prototipo de invernadero.

Ya que se dibujo lo que contiene el diseño del prototipo de invernadero didáctico, se finaliza con la unión de cada una de sus partes para obtener el diseño de la maqueta del invernadero didáctico.

3.2. Construcción y forrado del invernadero didáctico.

Una vez que se cuenta con el diseño del invernadero, se inicia con la selección de materiales para su construcción. Como debe ser un prototipo de invernadero que no tenga mucho peso ya que servirá para mostrar la tecnología desarrollada en la universidad, se seleccionó ángulo de aluminio para la estructura principal del invernadero de $\frac{1}{2}$ in y solera

Universidad Autónoma de Querétaro

del mismo material para el domo pero de 1 in y para cubrir la estructura se utilizó plástico transparente tipo cristal, estos materiales son los principales para llevar a cabo la construcción y forrado de la estructura.

Para la construcción del invernadero se utilizaron los siguientes materiales:

- Ángulo de aluminio de 1/2 in.
- Remaches de 1/8 in.
- Tornillos de 1/8 in.
- Solera de aluminio de 1 in.
- Plástico transparente tipo cristal.
- Pegamento silicón.

Se utilizaron las siguientes herramientas para el armado de la estructura:

- Taladro.
- Broca de 1/8 in.
- Arco y segueta.
- Remachadora.
- Lima plana.
- Escuadra.
- Flexómetro.

Se inicia cortando 4 tramos de 30 cm, 4 tramos de 60 cm y 6 tramos de 90 cm de aluminio de 1/2 in. Ya cortados se perforan los trozos de aluminio en los extremos para colocar los remaches y formar la base principal del invernadero como es mostrado en la figura 3.8.



Figura 3.8. Base principal de la estructura.

Una vez terminada la estructura principal, se construyó el techo del invernadero con solera de aluminio de 1 in. Se construyeron 3 partes con la forma de domo como se muestra en la figura 3.9 y luego los unimos con dos cortes de 90 cm de largo.



Figura 3.9. Parte del techo de la estructura.

La figura 3.10 muestra como fue unida las tres partes que forman el techo para que tenga la forma de la estructura del invernadero tipo raspa y amagado.



Figura 3.10. Construcción del techo del invernadero.

Ya que se construyó la estructura principal y el techo del invernadero, se realizó una entrada del mismo material utilizado en la estructura principal ángulo de $\frac{1}{2}$ in y esta entrada cuenta con las siguientes medidas 20 cm de ancho, 20 cm de largo y 30 cm de alto.

La figura 3.11 muestra cómo es que ha quedado la estructura del invernadero tipo raspa y amagado para proceder a cubrirlo con el plástico transparente.



Figura 3.11 Construcción de la estructura del invernadero.

Ya que se ha construido la estructura, se prosigue con el forrado de la misma como es mostrado en la figura 3.12, utilizando el plástico transparente tipo cristal, cortando y pegando adecuadamente en la totalidad de la estructura para que permita obtener las condiciones que en un invernadero real se presentan.



Figura 3.12. Forrado de la estructura del invernadero.

Después de haberse construido y colocado el forro a toda la estructura del invernadero, se montó la estructura en una tabla que mide 1.10 m de ancho y 1.30 m de largo, la cual es la base donde se lleva a cabo toda la instrumentación que el prototipo de invernadero requiere.

3.3. Diseño y construcción de PCBs.

Para el diseño de PCBs se recurrió al software Altium Designer Summer 09 ya que cuenta con las herramientas necesarias para realizar diseños de tarjetas electrónicas.

Antes de empezar a diseñar las tarjetas PCBs, primero se analiza cuales son las variables que se van a controlar dentro del invernadero, así como el tipo de actuadores a utilizar para saber que diseños se requieren en el acondicionamiento de señal, tarjetas de potencia, amplificadores, etc..

El invernadero didáctico cuenta con la instrumentación, control y toma de lectura de variables como temperatura, iluminación, humedad, el control de ventanillas y de malla sombreada como se presenta en un invernadero real, así que como actuadores se ubicaron una resistencia de calefacción, dos ventiladores, una bomba de riego y motores. También se utilizaron sensores ópticos tipo herradura para la ubicación de la ventanilla a complementándolos con limit-switches.

Posteriormente se dio inicio con la construcción de tarjetas PCBs que han sido diseñadas y probadas en proyectos anteriores. La tarjeta de acondicionamiento de señal del sensor de temperatura y la de iluminación son diseños ya realizados con anterioridad, solamente se reproducen para ser utilizadas en este proyecto.

Sensor de temperatura.

El sensor de temperatura que se utilizó es del tipo RTD (Resistance Temperature Detector), el HEL-705, mostrado en la figura 3.13.



Figura 3.13.Sensor de temperatura.

Características:

Tipo RTD de película delgada de platino.

Rango de temperatura de $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+260\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Linealidad de $\pm 0.1\%$ de la escala de temperatura que abarca $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Ahora en la figura 3.14 se muestra el esquemático de la tarjeta de acondicionamiento de señal que ya fue diseñada y probada en proyectos anteriores en la universidad.

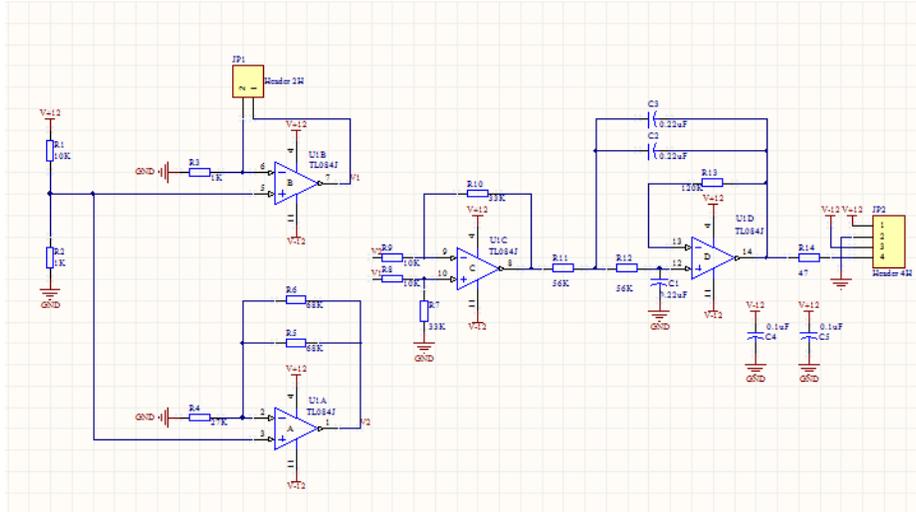


Figura 3.14. Esquemático de la tarjeta de acondicionamiento de señal del sensor de temperatura.

Ya con el diseño esquemático de la tarjeta se realizó el diseño impreso para continuar con la construcción de la tarjeta PCB. La figura 3.15 muestra el diseño impreso de las pistas de la PCB de acondicionamiento de señal del sensor de temperatura.

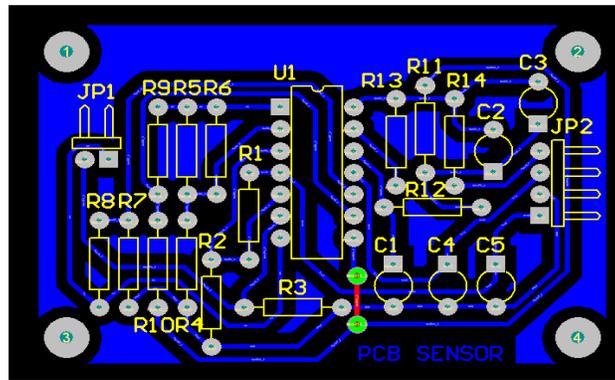


Figura 3.15. PCB para la tarjeta de acondicionamiento de señal del sensor de temperatura.

Contando con el impreso de la tarjeta de acondicionamiento de señal del sensor de temperatura se construye la tarjeta como se muestra en la figura 3.16, se utilizó el método de transferencia de tonner (planchado) para que el impreso de la tarjeta se plasmara en la placa para circuito impreso y revelando la tarjeta con cloruro férrico para que solamente quedara las pistas del circuito, una vez revelado la placa se perfora la tarjeta para la colocación de los componentes con el moto-tool utilizando una broca de 1mm y estaño para

soldar cada componente electrónico que forma la PCB, este procedimiento se realizó de igual manera para cada una de las tarjetas PCBs que se han construido para el proyecto.

Material:

Amplificador TL084.

3 Resistencias de 10 K Ω .

2 Resistencias de 68 K Ω .

2 Resistencias de 56 K Ω .

2 Resistencias de 33 K Ω .

2 Resistencias de 1 K Ω .

1 Resistencia de 120 K Ω , de 27 K Ω y de 47 Ω .

3 Capacitores de 0.22 μ F.

2 Capacitores de 0.1 μ F.

Pines tipo macho.

Placa para circuitos impresos.

Con el material, se construyó la tarjeta de acondicionamiento de señal para el sensor de temperatura.

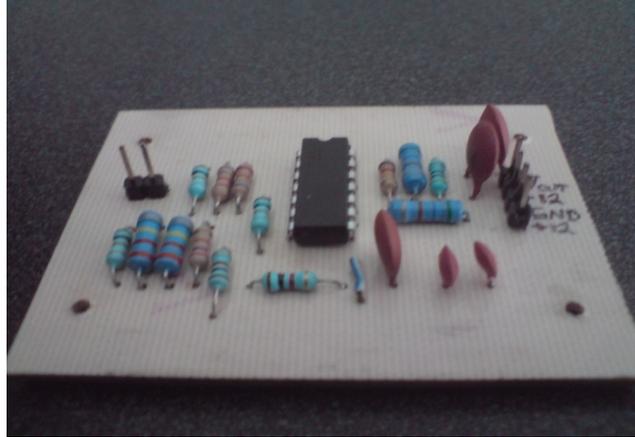


Figura 3.16. PCB de acondicionamiento de señal del sensor de temperatura.

Sensor de iluminación.

El sensor de iluminación que se va a utilizar es de tipo LDR (light-dependent resistor). VT90N1, figura 3.17.



Figura 3.17. Sensor de iluminación.

Características:

Es de tipo LDR.

Rango de temperatura que opera de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $75\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Potencia nominal de 80 mW.

Resistencia en Lux 24 Kohm.

Contando ya con el diseño de acondicionamiento de señal que se ha probado y utilizado en anteriores proyectos en la universidad, se muestra en la figura 3.18 el esquemático de la tarjeta de acondicionamiento de señal.

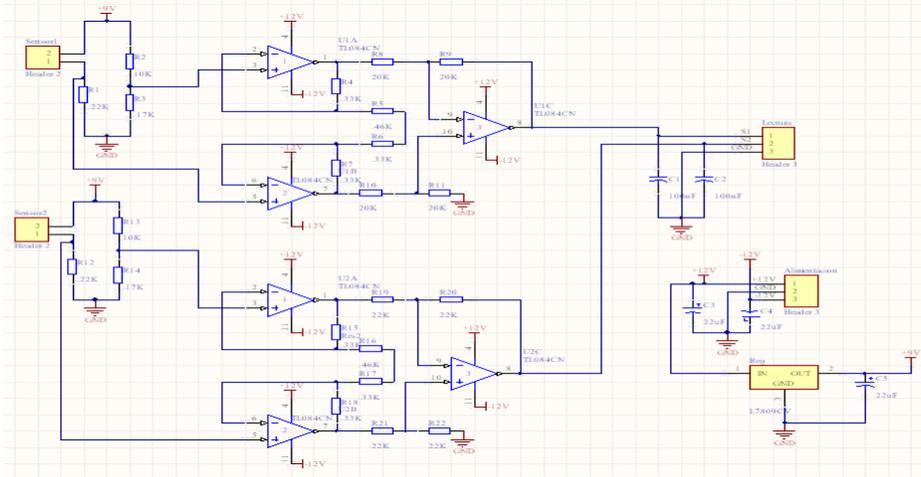


Figura 3.18. Esquemático de la tarjeta de acondicionamiento de señal del sensor de iluminación.

Ahora se observa en la figura 3.19 el diseño impreso de la PCB del sensor de iluminación.

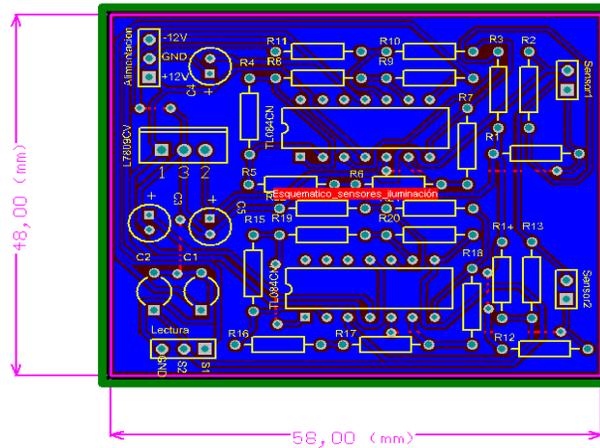


Figura 3.19. PCB para la tarjeta de acondicionamiento de señal del sensor de iluminación.

Se construyó la tarjeta de acondicionamiento de señal del sensor de iluminación de la misma forma que la tarjeta PCB de temperatura, la figura 3.20 muestra como quedó construida la tarjeta de acondicionamiento de señal del sensor de iluminación.

Material:

Amplificador TL084.

Regulador de voltaje L7809CV.

4 Resistencias de 20 K Ω .

3 Resistencias de 330 Ω .

1 Resistencia de 220 Ω , 170 Ω , 460 Ω y 10 K Ω .

2 Capacitores de 100 nF.

2 Capacitores de 22 μ F.

Placa para circuitos impresos.

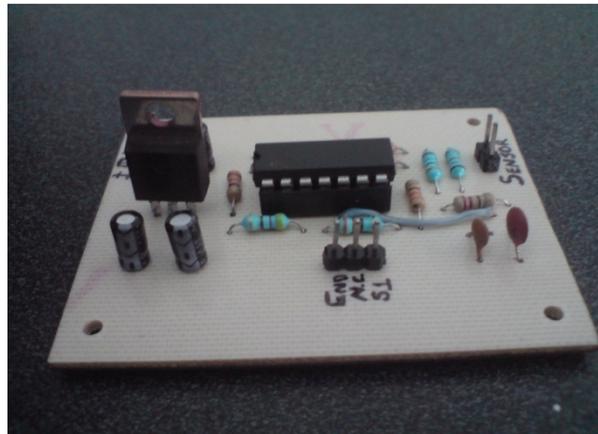


Figura 3.20. PCB de acondicionamiento de señal del sensor de iluminación.

Sensor de humedad.

El sensor de humedad que se utilizó es el HIH-4000-002, figura 3.21.



Figura 3.21. Sensor de humedad.

Características:

Entrega voltaje lineal en su salida respecto a % HR (Humedad Relativa).

Rango de temperatura de -40 °C a 85 °C.

Opera a un rango de humedad de 0 a 100% HR.

Para este tipo de sensor no es necesario acondicionar la señal ya que entrega un voltaje lineal con respecto a % HR, solamente para la calibración del sensor se ocupa la siguiente fórmula, obtenida de la hoja de datos del sensor:

$$\text{Sensor HR} = \frac{V_{out} - (0.9237 - 0.0041 T + 0.000040 T^2)}{0.0305 + 0.000044 T - 0.0000011 T^2}$$

Donde:

T es la temperatura en °C.

Vout es el voltaje de salida que el sensor de humedad entrega.

Sensor HR se da en % de HR.

Sensor óptico.

Se acondicionó un sensor óptico tipo herradura A21, para la ubicación de las ventanillas laterales ya que se tienen varios niveles de apertura y con el sensor se puede saber en qué parte se encuentra el recorrido de la ventanilla. La figura 3.22 muestra el esquemático, solo

se acondicionó con dos resistencias y su alimentación para que el sensor trabaje correctamente y la figura 3.23 muestra el impreso del circuito.

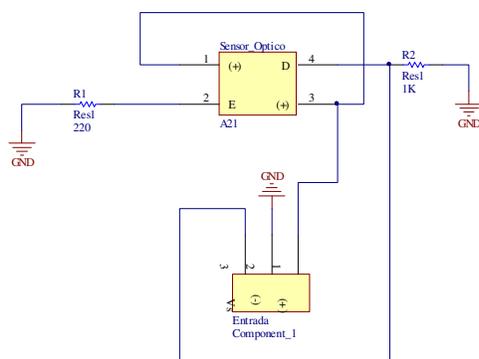


Figura 3.22. Esquemático del circuito sensor óptico.

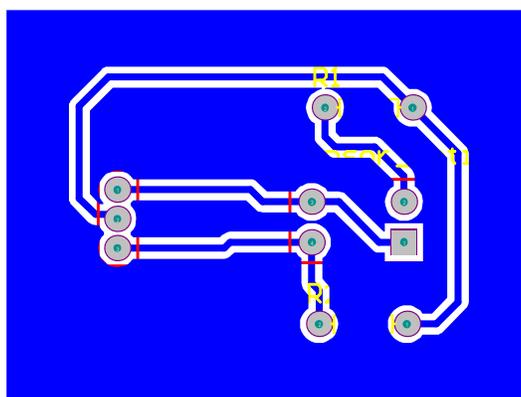


Figura 3.23. Circuito impreso del sensor óptico.

Se construyó el circuito que acondiciona al sensor óptico, la figura 3.24 muestra la tarjeta PCB del sensor.

Material:

Sensor óptico tipo herradura A21.

1 Resistencia de 1 K Ω .

1 resistencia de 220 Ω .

Pines tipo macho.

Placa para circuitos impresos.

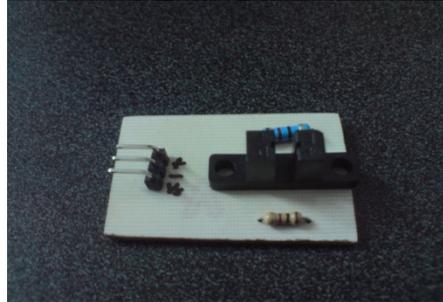


Figura 3.24. Sensor óptico.

Puente H para el control de motores.

Para controlar la apertura y cierre de ventanillas laterales del invernadero didáctico fue necesario el control de giro del motor es por eso que se diseñó y construyó una tarjeta PCB que realizara el cambio de giro automáticamente.

La figura 3.25 muestra el esquemático del circuito para generar el control de giro de un motor y la figura 3.26 muestra el impreso del circuito.

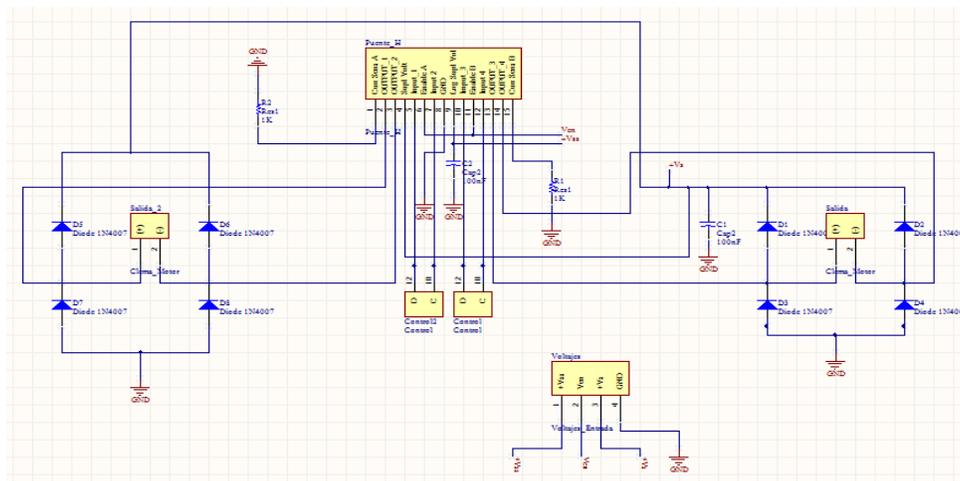


Figura 3.25. Esquemático del circuito puente H.

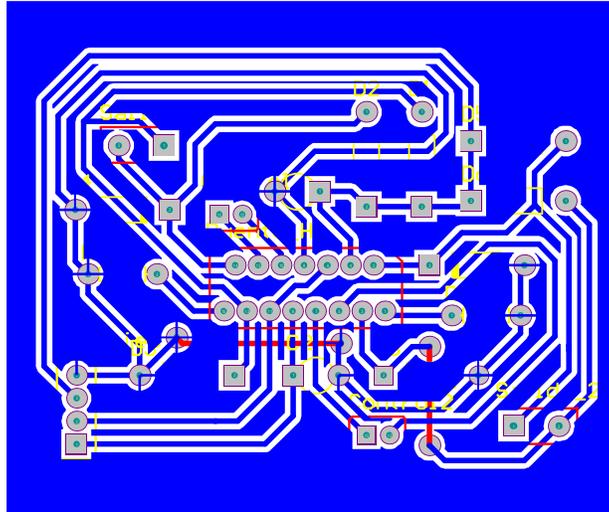


Figura 3.26. Impreso del circuito puente H.

Ya que se tiene el diseño de la tarjeta PCB del circuito puente H, se llevó a cabo la construcción.

Material:

Puente H L298N.

8 diodos 1N4007

4 Clemas.

Pines tipo macho.

2 Capacitores de 100 nF.

Placa para circuitos impresos.

Con el material mencionado y con el procedimiento de realización de PCB se construyó la tarjeta de circuito puente H mostrada en la figura 3.27.

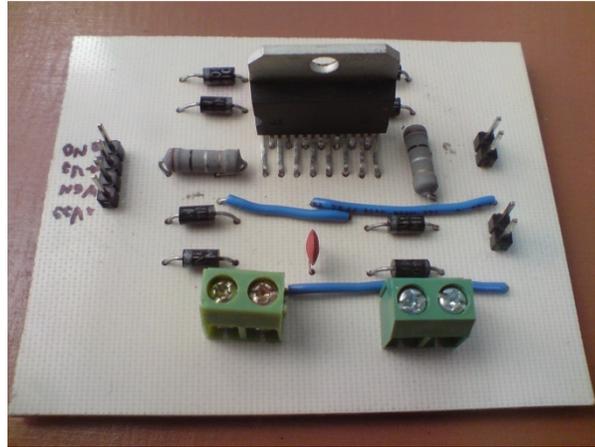


Figura 3.27. Tarjeta PCB del circuito puente H.

Tarjeta de potencia, para la resistencia de calefacción y bomba de riego.

Para el control de los actuadores es necesario contar con una tarjeta de potencia ya que la resistencia de calefacción y la bomba de riego son alimentadas con CA (Corriente Alterna) y el control de estos elementos se hace con CD (Corriente Directa). Es por eso que se realizó el diseño de una tarjeta PCB de potencia, en la figura 3.28 se observa el esquemático del circuito y en la figura 3.29 el impreso de la tarjeta PCB.

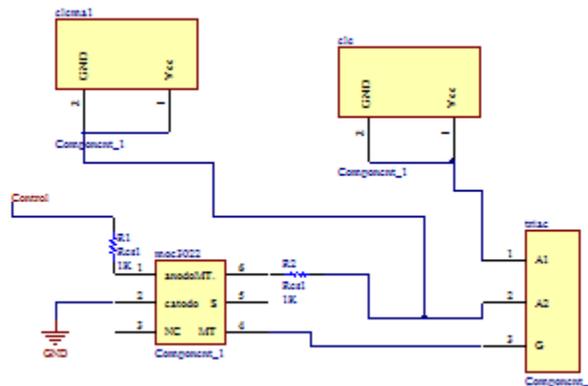


Figura 3.28. Esquemático de la tarjeta de potencia.

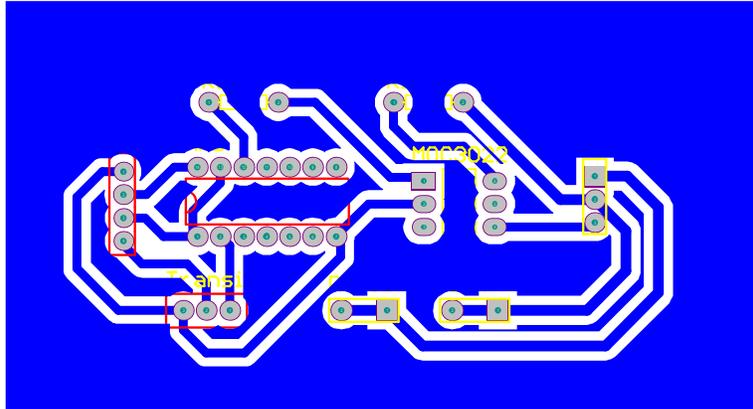


Figura 3.29. Impreso de la tarjeta de potencia.

Una vez que se diseñó la tarjeta de potencia, se construyó la tarjeta PCB, la figura 3.30 muestra cómo es que ha quedado construida.

Material:

MOC 3022.

TRIAC BTA16.

2 Resistencias de 1 K Ω .

Clemas.

Placa para circuitos impresos.



Figura 3.30. Tarjeta de potencia.

3 Capacitores de 1000 μ F electrolíticos.

3 Capacitores de 10 μ F de tantalio.

Placa para circuitos impresos.

Clemas.

Pines tipo macho.

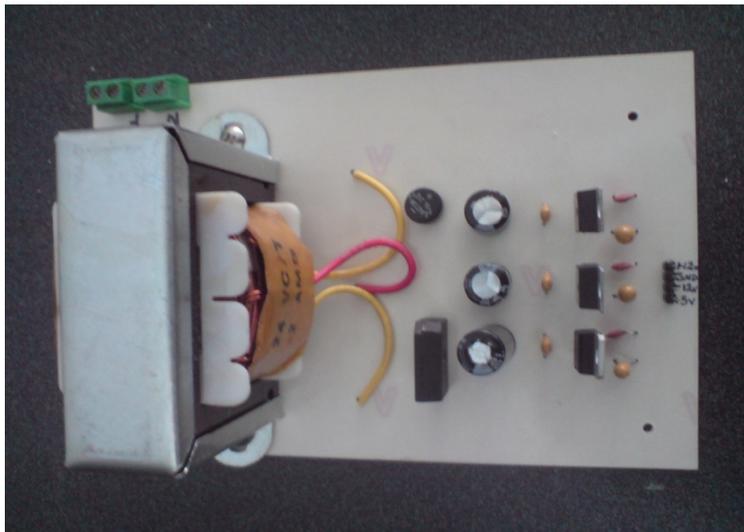


Figura 3.32. Fuente de alimentación.

Una vez que se han construido cada una de las tarjetas PCBs necesarias para llevar a cabo el prototipo de invernadero didáctico, se procedió a la instrumentación del invernadero.

Activación de entradas.

Fue necesario diseñar y construir una tarjeta extra para la activación de las entradas provenientes de la ventanilla lateral ya que las entradas del PLC se desactivan con tierra y las tarjetas de los sensores ópticos solo manda salida en alto o bajo dado por voltaje. Así mediante relevadores y transistores se puede hacer el arreglo para que la señal de entrada se genere correctamente. La figura 3.33 muestra el esquemático de la PCB y la figura 3.34 el impreso de la tarjeta.

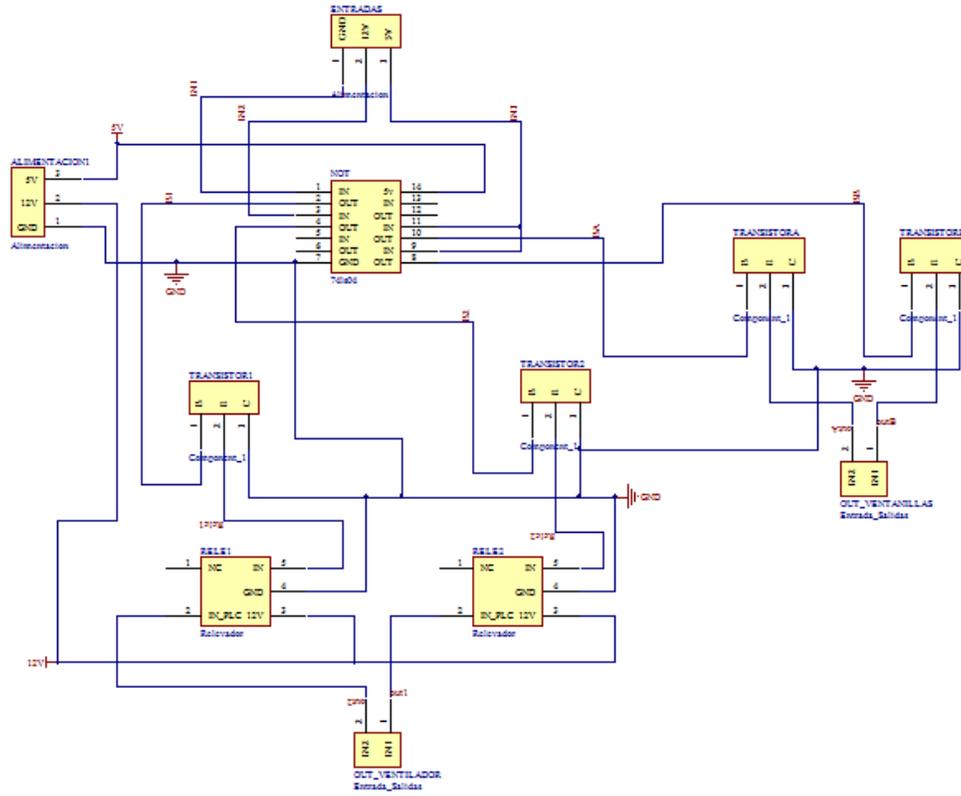


Figura 3.33. Esquemático de la tarjeta de señal de entrada.

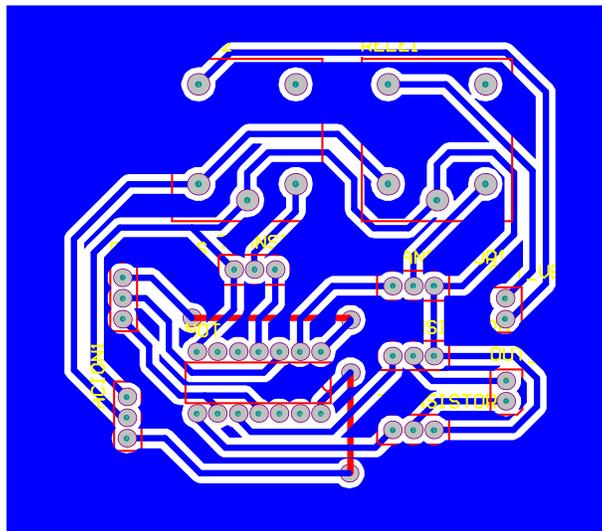


Figura 3.34. Impreso de la tarjeta de señal de entrada.

Una vez diseñada la tarjeta PCB, se construyó como se observa en la figura 3.35, se utilizaron los siguientes componentes.

Material:

Dos relevadores RAS-0510.

4 transistores IRF540.

Circuito integrado 74LS04.

Pines tipo macho.

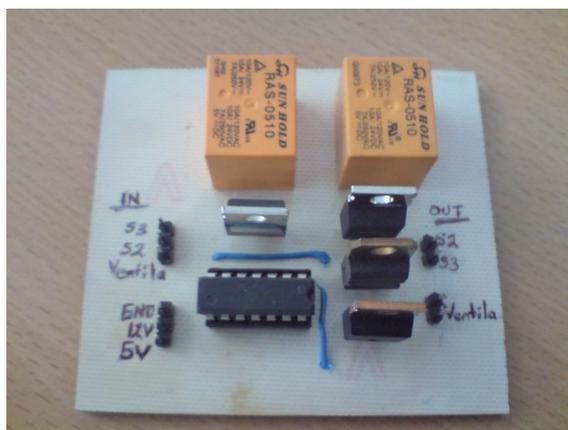


Figura 3.35. Tarjeta de señal de entrada.

3.4. Instrumentación del invernadero didáctico.

Contando con cada una de las tarjetas PCBs necesarias para el funcionamiento del prototipo de invernadero didáctico, se llevó a cabo la colocación de cada sensor y actuador para poder simular las acciones que se presentan en los invernaderos reales.

Sensores de temperatura, iluminación y humedad.

En el prototipo de invernadero se va tomar lectura de las variables de temperatura, iluminación y humedad, colocando tres sensores ya descritos anteriormente en la parte

superior de la estructura principal del invernadero como se muestra en la figura 3.36, describiendo la figura de izquierda a derecha se observa primero el sensor de humedad, para obtener la lectura y poder saber el estado de la humedad dentro del invernadero, un segundo sensor se encuentra ubicado y es el de temperatura para obtener el estado y poder controlar la temperatura dentro del invernadero y se finaliza con el sensor de iluminación que al igual que el de humedad, solamente da lectura de el estado de iluminación del invernadero.

Es así como se ubican los sensores y se lleva a cabo el cableado para alimentar u obtener la señal de entrada de las tarjetas de acondicionamiento de señal que son requeridas para poder trabajar correctamente con los sensores.



Figura 3.36. Sensores de humedad, temperatura e iluminación.

Ventanillas laterales.

Sensores.

Para controlar la apertura y cierre de las ventanillas fueron necesarios sensores que ayuden a informar la ubicación de la ventanilla, es por eso que se utilizaron elementos de tipo on-off que permiten ser activados para así tomar la señal como entrada digital para tener un control con la apertura y cierre de la ventanilla. Como elementos se utilizaron sensores ópticos tipo herradura y limit switch.

La ubicación de las tarjetas de los sensores ópticos fueron en la estructura del invernadero como se muestra en la figura 3.37, se colocaron dos para obtener la ubicación de la ventanilla ya que la apertura y cierre de la ventanilla se hacen por niveles los cuales son totalmente cerrado, 1/3 de ventanilla abierta, 2/3 de ventanilla abierta y totalmente abierta, así con la colocación de los sensores ópticos se pueden obtener los niveles intermedios de la ubicación de la ventanilla y cuando la ventanilla se encuentra totalmente cerrado o totalmente abierto son limit switches los que brindan el estado de estos niveles, es así como la instrumentación para la apertura y cierre de ventanillas se llevo a cabo.

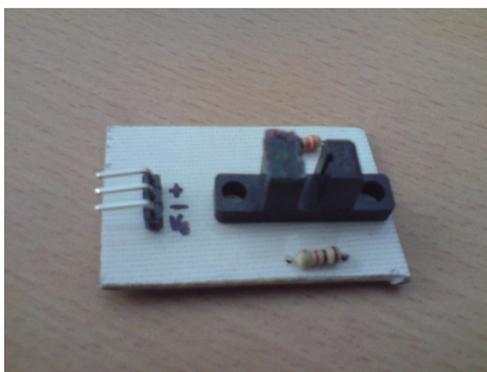


Figura 3.37. Sensores ópticos.

Actuador.

Para mover las ventanillas laterales se utilizaron motores de cd (corriente directa) con su caja reductora de engranes ya incluida, los cuales se alimentan a 12 V y son activados por medio de la tarjeta PCB de puente H para el sentido de giro del motor. La figura 3.38 muestra el tipo de motor utilizado para el control de ventanillas.

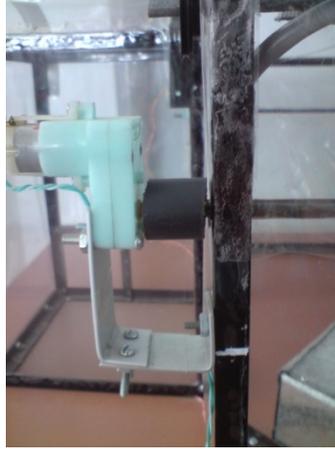


Figura 3.38. Motor utilizado para el control de ventanillas.

Ventanilla superior.

Sensores.

Como la ventanilla superior simplemente el control va ser cerrada o abierta, se colocaron dos limit switch que indiquen la posición.

Actuador.

Al igual que las ventanillas laterales se utilizó un motor similar el cual simplemente hace subir o bajar la ventanilla y es activado con un puente H para generar el cambio de giro.

Malla sombra.

Para poder tener una malla sombra dentro del prototipo de invernadero fue necesario realizar un pequeño mecanismo que permita desplazar la malla en la parte superior del invernadero, en la figura 3.39 se puede observar el mecanismo diseñado. El mecanismo es simple ya que con un motor se puede enrollar la malla sombra sobre un eje colocado a lo largo del invernadero y cuando se requiera extender la malla sombra otro motor desenrolla la malla sombra del eje.

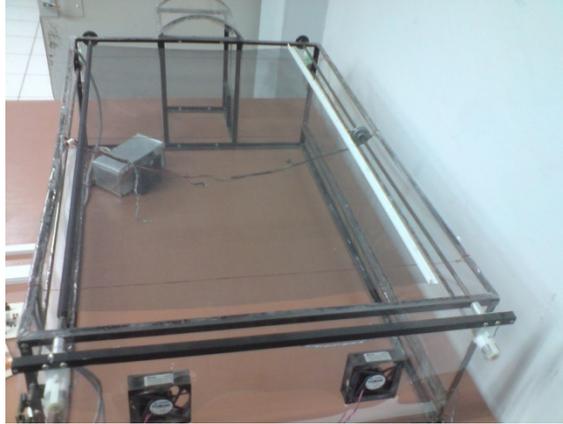


Figura 3.39. Mecanismo de la malla sombra.

Sensores.

Como la malla sombra simplemente tiene la función de extenderse sobre la parte superior del invernadero y enrollarse totalmente solo fue necesario colocar dos limit switch uno al inicio y otro al final de carrera de la malla sombra.

Actuadores.

Se colocaron dos motores como se muestra en la figura 3.40, los cuales son alimentados a 12 VCD y son activados con una tarjeta PCB de puente H para el sentido de giro de los motores.



Figura 3.40. Motor de malla sombra.

Calefacción.

Para la calefacción fue necesario colocar una resistencia como se muestra en la figura 3.41, el ventilador se utiliza para expandir el aire caliente dentro de todo el invernadero. La resistencia se alimenta con 127 VCA, es cerámica de 500 Watts. Para el control de temperatura es necesaria una tarjeta de potencia la cual permite controlar la resistencia.



Figura 3.41. Resistencia de calefacción.

Ventilación.

Para la disminución de la temperatura es necesario ventiladores con los cuales se obtiene una ventilación forzada, es por eso que se utilizaron dos ventiladores colocados como la figura 3.42 lo muestra, aquí simplemente se utilizó un transistor para la activación ya que los ventiladores se alimentan con 12 VCD.



Figura 3.42. Ventiladores.

Sistema de riego.

Para emular el sistema de riego fue necesario una bomba de agua pequeña de 5.5 Watts a 127 VCA para tener un bombeo de agua y de esa forma obtener un sistema de riego, para el control se estableció el tiempo de riego y el periodo de riego y la tarjeta de potencia para realizar el control de la bomba, la figura 3.43 muestra la bomba que se utiliza para el sistema de riego.



Figura 3.43. Bomba de riego.

3.5. Cableado del PLC basado en FPGA.

Para conectar todas las tarjetas PCB realizadas en el proyecto con el PLC basado en FPGA se utilizó alambre telefónico para la recepción y transmisión de las señales que son necesarios para que el prototipo de invernadero funcione y para la lectura de los ADC se ocupó cable blindado para disminuir el ruido que se genera en las señales de los sensores.

El PLC basado en FPGA está diseñado con entradas digitales y analógicas, así como salidas digitales y analógicas, comunicación RS232 y USB, la figura 3.44 muestra como está constituido el PLC.

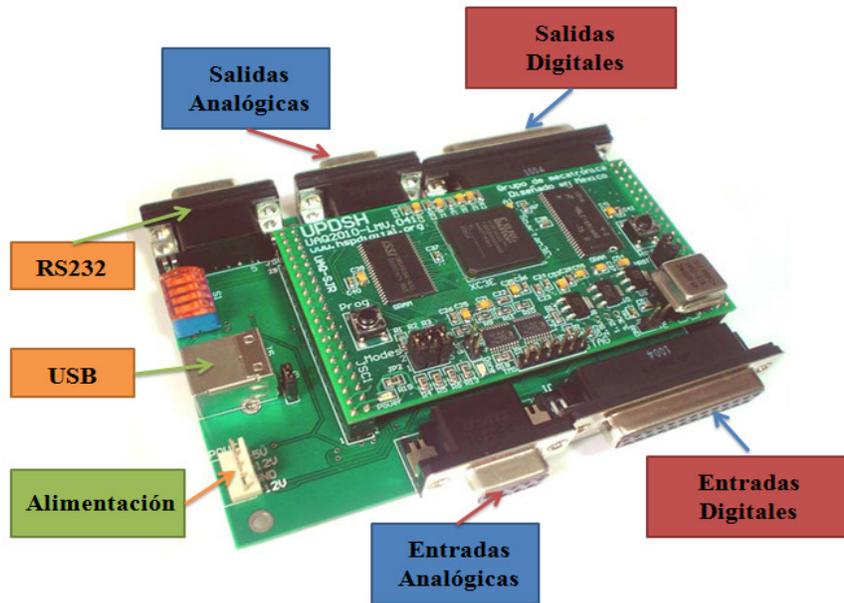


Figura 3.44. PLC basado en FPGA.

El PLC basado en FPGA proporciona 16 entradas digitales, 16 salidas digitales, 8 entradas analógicas de ± 10 V y 8 salidas analógicas de ± 10 V. De la hoja de datos del PLC se obtiene la ubicación de las entradas y salidas para que de esta forma se conecten las señales generadas con las PCB's o sensores utilizados para el funcionamiento del prototipo de invernadero.

La tabla 3.1 muestra la ubicación de las entradas digitales del PLC basado en FPGA.

Universidad Autónoma de Querétaro

Entradas digitales			
Nombre	Pin	Conexión	
IN0	11	S1	Señales de sensores de las ventanillas laterales.
IN1	23	S2	
IN2	10	S3	
IN3	22	S4	
IN4	9	S5	Señal de paro de emergencia.
IN5	21	S6	Señales de sensores de ventanilla superior.
IN6	8	S7	
IN7	20	S8	Señales de malla sombra.
IN8	5	S9	
IN9	17	-	-
IN10	4	-	-
IN11	16	-	-
IN12	3	-	-
IN13	15	-	-
IN14	2	-	-
IN15	14	-	-
GND	1,13,18,19,25	-	-
VCC5	6,7,12,24	-	-

Tabla 3.1. Conexión de entradas digitales del PLC basado en FPGA.

Ahora la tabla 3.2 muestra la ubicación de las salidas digitales del PLC basado en FPGA.

Salidas digitales			
Nombre	Pin	Conexión	
OUT0	5	T1A	Activación de motores para ventanillas laterales.
OUT1	18	T1B	
OUT2	6	T2A	Activación de motor para ventanilla superior.
OUT3	19	T2B	
OUT4	7	T3	Activación de bomba de riego.
OUT5	20	T4A	Activación de motores para malla sombra.
OUT6	8	T4B	
OUT7	21	T5	Activación de resistencia de calefacción.
OUT8	9	T6	Activación de ventiladores.
OUT9	22	-	-
OUT10	10	-	-
OUT11	23	-	-
OUT12	11	-	-
OUT13	24	-	-
OUT14	12	-	-
OUT15	25	-	-
GND	1,2,3,4,13	-	-
VCC5	14,15,16,17	-	-

Tabla 3.2. Conexión de salidas digitales del PLC basado en FPGA.

Las señales que los sensores de temperatura, iluminación y humedad generan son conectadas a las entradas analógicas del PLC como se muestra en la tabla 3.3.

Entradas analógicas			
Nombre	Pin	Conexión	
ADC0	3	CH0	Sensor temperatura.
ADC1	8	CH1	Sensor iluminación.
ADC2	4	CH2	Sensor humedad.
ADC3	9	-	-
ADC4	6	-	-
ADC5	1	-	-
ADC6	2	-	-
ADC7	7	-	-
GND	5	-	-

Tabla 3.3. Conexión de entradas analógicas del PLC basado en FPGA.

Como el prototipo de invernadero desarrollado en este proyecto no utiliza salidas analógicas no se realizó ninguna conexión con el puerto de las salidas.

Una vez que se estableció la conexión entre el PLC basado en FPGA con las tarjetas PCB's y los sensores es necesario probar el funcionamiento para eso se generaron módulos de control en VHDL para probar.

3.6. Módulos de control en VHDL.

Para probar el funcionamiento de las tarjetas PCB's y las conexiones entre las señales de entradas y salidas del PLC fue necesario utilizar el PLC como FPGA solamente y probar cada módulo de control generado en VHDL por sí sólo.

Algunos de los módulos de control como el PWM y el del ADC, se tomaron de los que se han desarrollado en la área de mecatrónica de la facultad de ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro.

El primer módulo generado fue para el control de las ventanillas laterales. Aquí se utilizaron 4 entradas digitales y 2 salidas digitales. Las entradas digitales indican la posición en la que las ventanillas laterales se encuentran ya que se controlan 4 posiciones

(cerrada, 1/3 abierta, 2/3 abierta y abierta totalmente). Las salidas se utilizan como PWM para controlar la velocidad del motor que actúa para mover las ventanillas y hacer el cambio de giro por medio de un puente H, es por eso que se utilizan 2 salidas de activación para la tarjeta PCB del puente H. La figura 3.45 muestra el diagrama de bloques del módulo de control de las ventanillas laterales. Las entradas S1, S2, S3 y S4 son las señales digitales que los sensores colocados en las ventanillas laterales generan, la entrada A es la posición que el usuario quiere que se coloque la ventanilla. Las salidas T1A y T1B son señales PWM que activan la PCB de puente H.

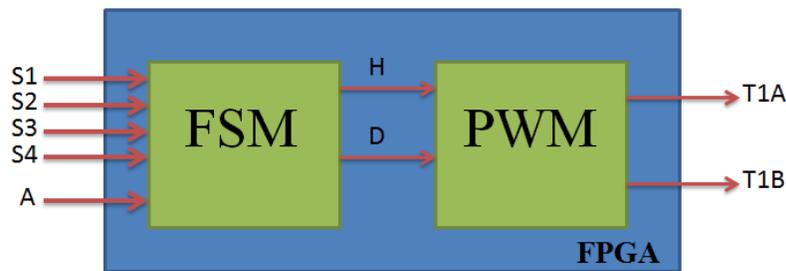


Figura 3.45. Diagrama a bloques de módulo de control de ventanillas laterales.

También se generó un módulo de control de la ventanilla superior que también sirve para el control de malla sombra, este módulo es muy parecido al anterior solo cambia las entradas ya que son menos pero actúa de forma similar. La figura 3.46 muestra el diagrama a bloques de los módulos de control de ventanilla superior y de malla sombra. Las entradas S6 y S7 son las señales de la ventanilla superior que indican el estado de la ventanilla, la señal A2 es enviada por el usuario para darle ubicación a la ventanilla (abierta o cerrada) y las salidas T2A y T2B activan la PCB del puente H para generar el cambio de giro. Para el control de la malla sombra se utiliza el mismo módulo de control de la ventanilla superior.

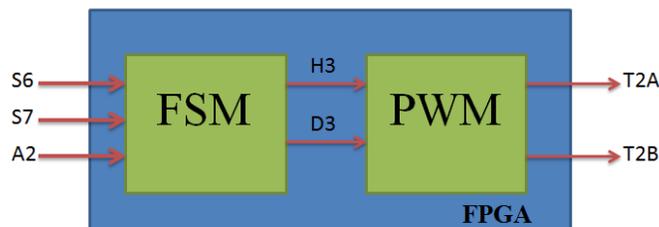


Figura 3.46. Diagrama a bloques del módulo de control de ventanilla superior y

mecanismo de malla sombra.

Para el control del sistema de riego fue necesario realizar un módulo de control en el cual se toma un periodo de riego PR y un tiempo de riego TR, esto para tener un control de la bomba de riego que se utiliza. La figura 3.47 muestra el diagrama a bloques del módulo de control del sistema de riego. Las entradas PR y TR son determinadas por los tiempos que el usuario necesite para activar el sistema de riego, la entrada STT es para que empiece a trabajar el sistema de riego y STO la señal de paro del sistema de riego estas dos señales son proporcionadas por el usuario, en la salida se tiene T3 que hace que active la bomba de riego mediante la PCB de potencia.

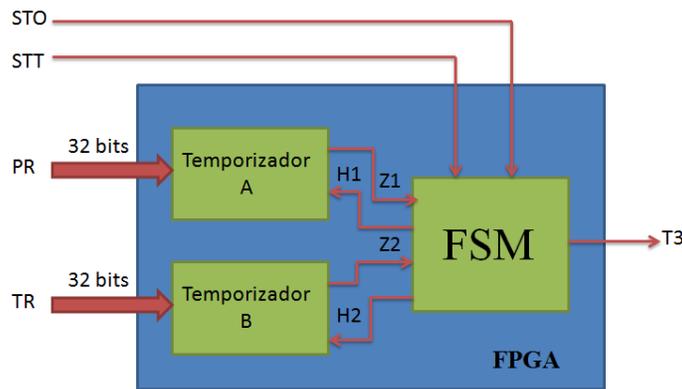


Figura 3.47. Diagrama a bloques de módulo de control de sistema de riego.

Para la activación de la resistencia de calefacción solo fue necesario el PWM como se muestra en la figura 3.48. Las entradas PRS y DIN se calculan por la formula siguiente:

$$PRS = \frac{F_o}{2^n} - 1 \quad y \quad DIN = n + 1$$

Donde PRS es la frecuencia de operación del PWM, F_o es la frecuencia de operación del FPGA, F_d es la frecuencia deseada, DIN es el ancho de pulso que va tener el PWM y n es el número de bits con los que se PWM trabajará.

Como salida se obtiene la señal T5, que es la señal del PWM la cual hace activar la resistencia de calefacción por medio de la tarjeta de potencia.



Figura 3.48. Módulo de control de PWM para el control de resistencia de calefacción.

Para realizar el control de los ventiladores simplemente se utilizó un módulo de control como el que se muestra en la figura 3.49. Con la entrada STT se controla el encendido y apagado de los ventiladores la cual es dada por el usuario y genera una señal T6 de salida para la activación de la tarjeta PCB, la cual hace que los ventiladores se activen o desactiven dependiendo de lo que el usuario quiera.



Figura 3.49. Módulo de control de ventiladores.

Los módulos de control anteriores simplemente utilizan ya sea entradas o salidas digitales, pero para tener lectura de los sensores de temperatura, iluminación y humedad es necesario utilizar las entradas analógicas del PLC basado en FPGA para eso se realizó un módulo de control el cual se muestra en la figura 3.50. Las señales BUSY, DOUT, DCLK y DIN son señales con las cuales el ADC7841 trabaja para tener una sincronía con los datos, la señal ACT_ADC proporciona el inicio para empezar a tomar lectura, las salidas CH0, CH1, CH2 y CH3 son los canales del ADC7841 en los cuales la señal de los sensores provenientes de las tarjetas de acondicionamiento de señal entran.

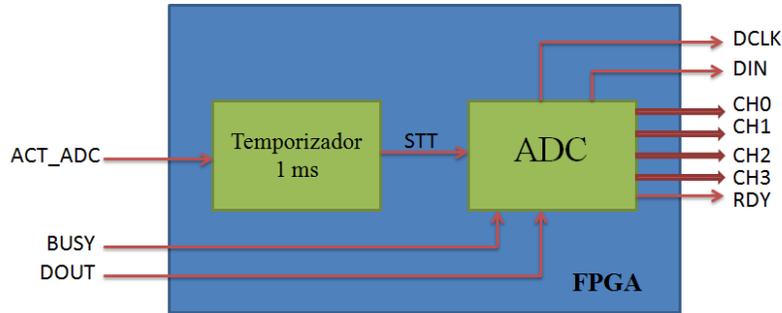


Figura 3.50. Diagrama a bloques de módulo de lectura de ADC.

Se unieron los módulos de control para solamente tener uno solo y poder manejarlo con una interfaz de comunicación desde la computadora, así como se muestra en la figura 3.51, se pueden observar solamente las entradas y salidas que el PLC tiene para probar cada una de las etapas de control con las que el prototipo de invernadero cuenta.

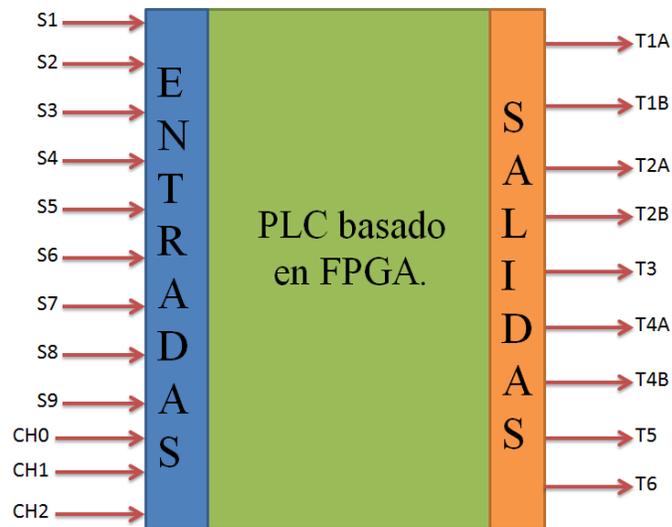


Figura 3.51. Entradas y salidas del PLC basado en FPGA para el control de prototipo de invernadero.

3.7. Interfaz de comunicación en C++.

Se utilizó C++ Builder 6.0 ya que se contaba con el programa de comunicación en USB probado correctamente con este compilador, para que simplemente generara un menú de opciones las cuales permitían controlar los módulos desarrollados en VHDL y probar su funcionamiento. El menú consta de 8 opciones, la opción uno es para poder ver la lectura que los sensores tienen, la segunda opción permite tener el control de la ventanilla lateral, indicando desde la computadora la posición que se quiere tener, la tercera y cuarta opción simplemente es para el control de ventanilla superior y la malla sombra igual desde la computadora teniendo las opciones de abrir y cerrar. La quinta opción es para el control de riego, donde uno como usuario define el periodo de riego y el tiempo de riego desde la misma interfaz, la sexta opción activa la resistencia de calefacción, la séptima opción prende y apaga los ventiladores y una octava opción la cual solo hace salir de la interfaz de comunicación. La figura 3.52 muestra el menú en la pantalla negra de C++ la cual permite interactuar al usuario con las funciones que el prototipo de invernadero tiene.

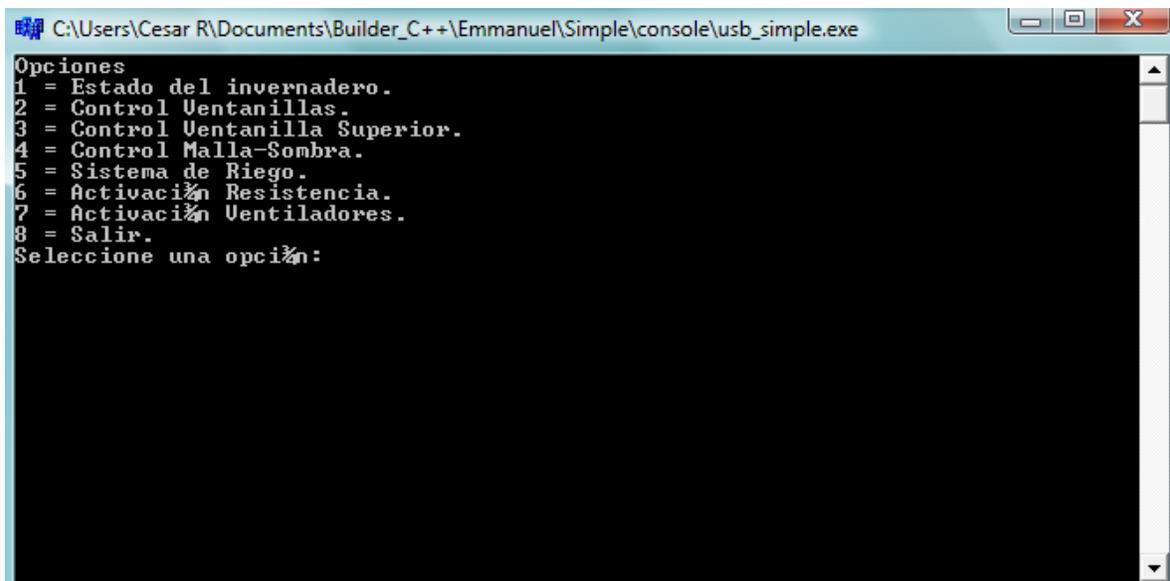


Figura 3.52. Menú principal de la interfaz de comunicación para el control del invernadero.

Es así como simplemente se desarrollo una interfaz de comunicación para probar los controles individualmente de las funciones que el prototipo de invernadero tiene.

3.8. Control en el prototipo de invernadero.

La mayoría de funcionalidades que en el invernadero se realizan tienen que ver con control discreto (on-off), es por eso que se pueden comprender de mejor forma los resultados con una rutina utilizando PLC basado en FPGA. Como la estructura del invernadero solo tiene la función para controlar la temperatura, se hizo una prueba de control de temperatura y al mismo tiempo ver los efectos que suceden con la iluminación y la humedad dentro del invernadero.

Para poder llevar a cabo el control de temperatura dentro del prototipo de invernadero es necesario conocer cómo es que se comporta la temperatura dentro del invernadero, para esto es necesario activar la resistencia hasta que alcance una temperatura de estabilidad y monitorear la lectura con el sensor de temperatura, una vez que la temperatura se estabiliza a su máxima capacidad de calentamiento se grafican las lecturas obtenidas con ayuda de MATLAB, como se muestra en la figura 3.53.

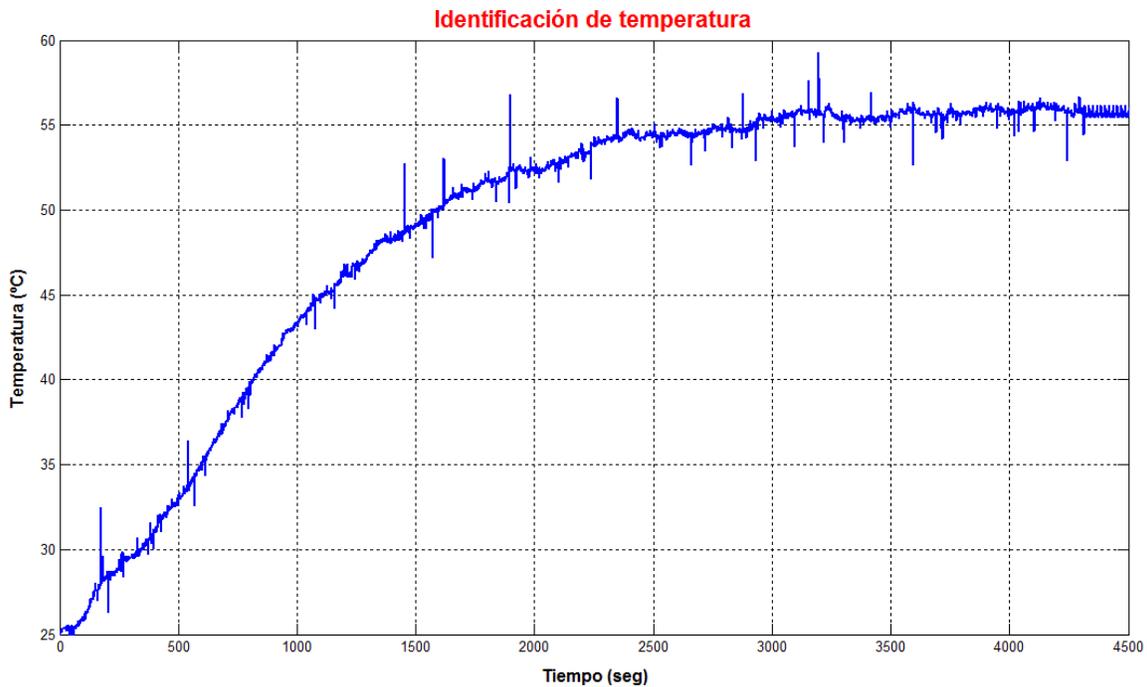


Figura 3.53. Identificación de temperatura en el prototipo de invernadero.

Como se observa en la gráfica la temperatura solo varia de temperatura ambiente 25 °C a 56.2 °C, se debe a que la resistencia de calefacción no alcanza a radiar toda la temperatura de alcance que tiene, ya que la estructura del invernadero está un poco grande para ser calentada con la resistencia utilizada y otra cosa fue que el sensor de temperatura se encuentra ligeramente alejado de la zona de calefacción y es otro factor que se tiene.

Después de que se obtuvo la identificación del comportamiento de la temperatura dentro del invernadero, se utilizó las herramientas de MATLAB para que presentara matemáticamente la identificación de la planta obtenida. Con el comando *<<ident* MATLAB se encarga de proporcionar la planta que describe matemáticamente al sistema. Es así como en la ecuación 3.1 representa matemáticamente el comportamiento del sistema de temperatura.

$$G(s) = \frac{0.12703}{943.69s + 1} \quad (3.1)$$

Una vez determinada la planta de la temperatura, se utilizó otra de las funciones que MATLAB tiene que es Simulink para ver la simulación de la planta obtenida con una entrada escalón y compararla con el comportamiento de la temperatura que se obtuvo, figura 3.54.

En la figura se observan dos gráficas, la gráfica color amarillo representa a los datos que se monitorearon durante la identificación del comportamiento de la temperatura dentro del prototipo de invernadero, y la gráfica color fucsia que representa a la simulación de la planta que se obtuvo con *<<ident* la cual está representada en la ecuación 3.1 con una entrada escalón y se observa que la temperatura va de 0 °C a 30.2 °C, esto se debe que se le resto los 25.2 °C de temperatura ambiente, para obtener una temperatura real de la gráfica se toma el valor deseado y se le suman los 25.2 °C.

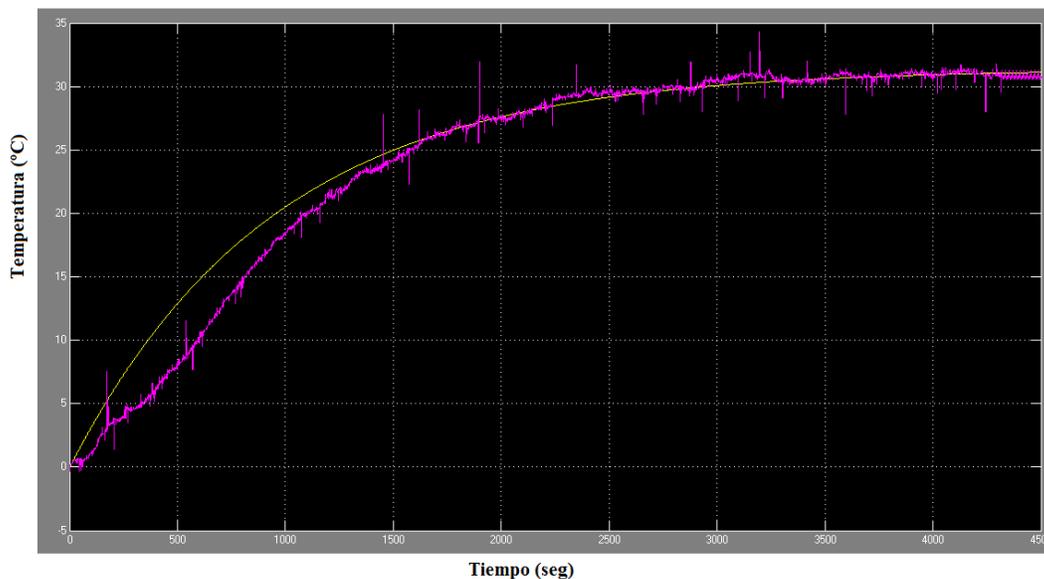


Figura 3.54. Simulación y comparación de la planta ante una entrada escalón.

Una vez identificado el sistema de temperatura se seleccionó el control a utilizar. Para ver qué tipo de controlador es el que mejor estabiliza y tiene mejor respuesta al sistema se utilizó un sintonizador que se programó en C++ para la materia de control II de la licenciatura de ingeniería electromecánica, funciona mediante la sintonización en frecuencia, se ingresan el margen de fase con el cual se quiere sintonizar, el tiempo de respuesta y la planta en factores y se elige el tipo de controlador con el cual se va a sintonizar el sistema, para obtener las ganancias del controlador.

Primero se eligió el controlador PD pero el sintonizador proporcionó la información de que no se podía controlar ya que brindaba ganancias negativas y eso hace que el sistema no se pueda sintonizar.

Se eligió una segunda opción utilizando un controlador PI, con un margen de fase de 45, un tiempo de respuesta de 45 seg y con la planta de temperatura proporcionó las siguientes ganancias: $K_p = 111.167$ y $K_i = 2.71778$.

Una vez que se eligió el controlador a utilizar, se procedió a la etapa de control para una mejor explicación del tipo de control se muestra la figura 3.55 un diagrama a bloques, se observa que el control va hacer a lazo cerrado.

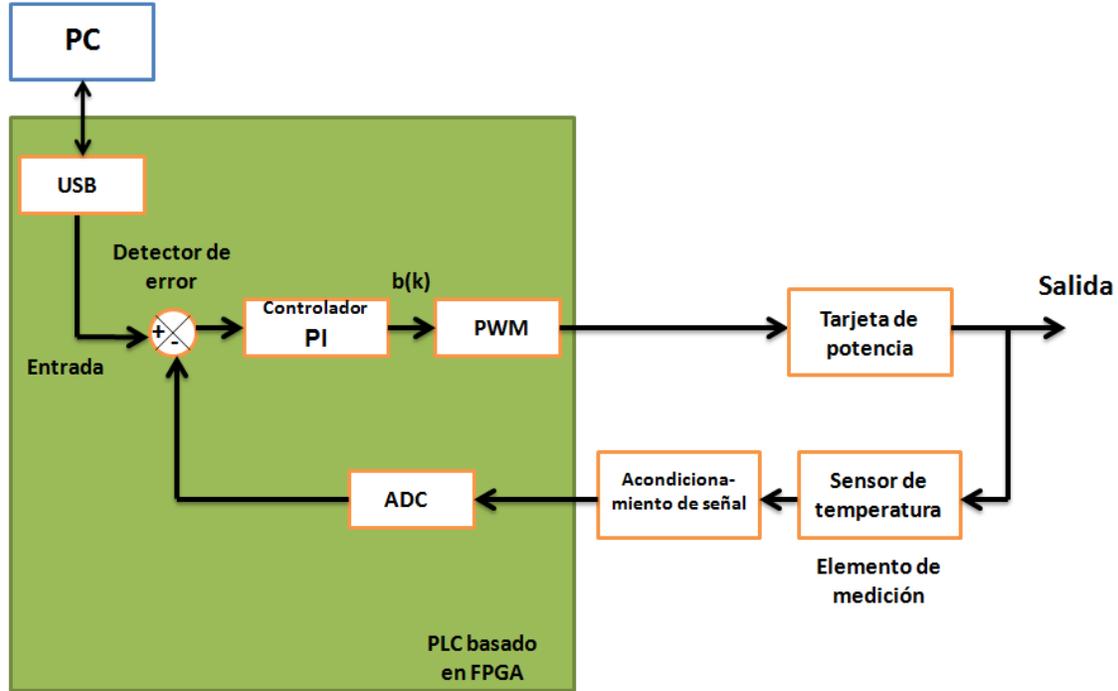


Figura 3.55. Control lazo cerrado.

Con las ganancias obtenidas de la sintonización, se procede a discretizar el controlador, la ecuación 3.2 muestra la forma de discretización del controlador PI.

$$b(k) = \left(K_p + \frac{K_i}{2}T\right)e(k) + \left(\frac{K_i}{2}T - K_p\right)e(k-1) + b_1(k-1) \quad (3.2)$$

Se tiene que K_p y K_i son las ganancias del controlador, $b(k)$ es la señal discretizada del controlador, T es el periodo de muestreo el cual es de 1 seg, $e(k)$ es el error presente y $e(k-1)$ es el error anterior. Después de tener la ecuación de discretización del controlador PI, se implementó el controlador PID generado en VHDL el cual fue realizado en la universidad. El diagrama a bloques del controlador PID se muestra en la figura 3.56, se observa las

entradas necesarias para llevar a cabo el control y la ecuación que caracteriza al sensor de temperatura. Donde REF es la temperatura que el usuario quiere tener, $a = 6.8666$, CHO es la lectura del convertidor ADC que toma del sensor de temperatura, $b = 69.864$, a_0 , a_1 , a_2 , b_1 y b_2 se toman de la ecuación de discretización del controlador PID, para este caso los valores de a_0 , a_1 , a_2 , b_1 y b_2 son:

$$a_0 = \left(K_p + \frac{K_i}{2} T \right) = \left(111.167 + \frac{2.71778}{2} * 1 \right) = 112.525$$

$$a_1 = \left(\frac{K_i}{2} T - K_p \right) = \left(\frac{2.71778}{2} * 1 - 111.167 \right) = -109.808$$

$$a_2 = 0$$

$$b_1 = 1$$

$$b_2 = 0$$

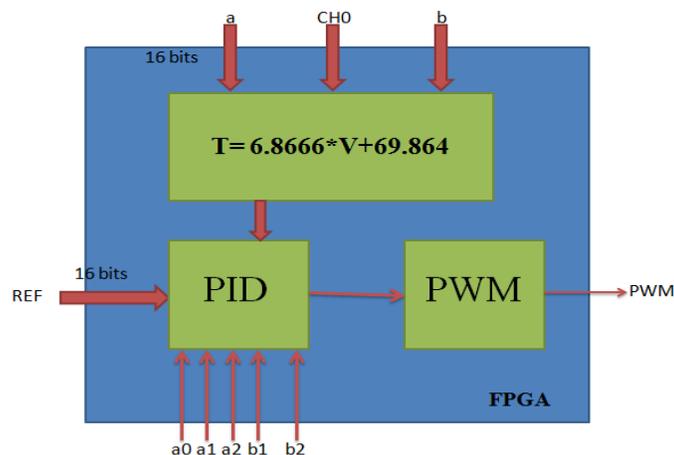


Figura 3.56. Diagrama a bloques del controlador PID.

Como salida del controlador se tiene una señal PWM la cual controla el ancho de pulso de la alimentación de activación de la tarjeta de potencia de la resistencia de calefacción, para obtener un control de temperatura adecuada.

3.9. Rutina con el PLC basado en FPGA.

Para tener una perspectiva clara del funcionamiento del prototipo de invernadero, se generó una rutina con el PLC basado en FPGA como se muestra en el diagrama escalera de la figura 3.57. Aquí la automatización se hace presente ya que se sincronizan cada uno de los sensores, los cuales son las entradas del sistema de prototipo de invernadero, para que paralelamente los actuadores se activen, utilizando una lógica programada en el PLC basado en FPGA.

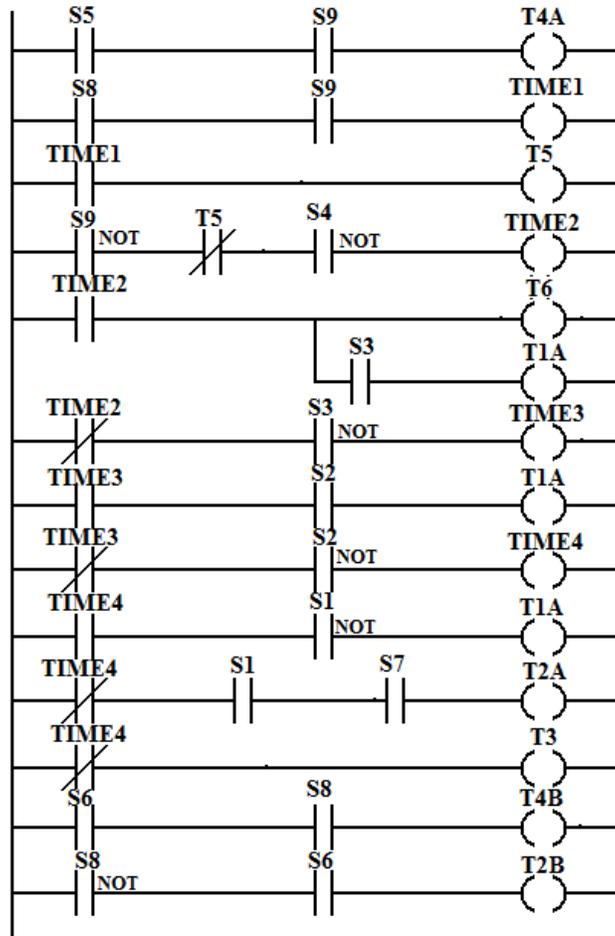


Figura 3.57. Diagrama escalera de rutina del prototipo de invernadero.

Explicando a detalle el diagrama escalera de la figura 3.57, cuenta con 13 líneas y la nomenclatura es tomada de las tablas 3.1 y 3.2, el primer escalón es para la activación de abertura de malla sombra, el escalón dos activa un TIMER1 para darle paso al escalón 3 y

active la resistencia, el cuarto escalón activa un TIMER2 y a su vez activa dos contactos los cuales están ubicados en los escalones cinco y seis y hace que se active los ventiladores y que la ventanilla lateral abra un tercio, el escalón siete activa un TIMER3 para que el escalón ocho abra la ventanilla a 2/3 de su posición después el escalón siguiente activa otro TIMER4 para pasar al escalón diez y abrir la ventanilla lateral completamente, el escalón once abre la ventanilla superior y con el escalón doce se activa el sistema de riego con el TIMER4, el penúltimo escalón cierra la malla sombra y el último escalón hace que cierre la ventanilla superior y ventanilla lateral.

Es así como se planteo una rutina para ver el funcionamiento del prototipo de invernadero.

Capítulo IV

Resultados

En este capítulo se plantea los resultados obtenidos de cada uno de las actividades realizadas durante el proyecto, tomando las actividades del capítulo anterior se describen los resultados que se obtuvieron al finalizar cada una de ellas.

4.1. Diseño de la estructura del invernadero didáctico.

Como resultado del diseño con el software de AUTOCAD y sus herramientas que éste proporciona, se obtuvo lo mostrado en la figura 4.1, para que de esta manera se procediera el desarrollo físico del invernadero de este trabajo.

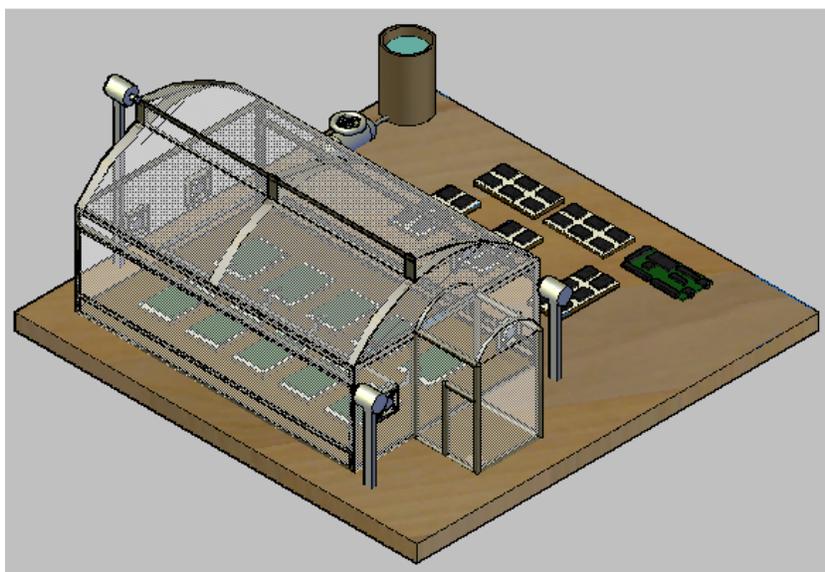


Figura 4.1. Diseño del prototipo del invernadero.

4.2. Construcción y forrado del invernadero didáctico.

El resultado de la construcción del invernadero es mostrada en la figura 4.2, se observa cómo es que la estructura fue armada y asimilando el diseño del invernadero tipo raspa y amagado. Así como se le colocó el forro para que proporcionara las condiciones dentro del invernadero. Y como fue montada en la tabla para llevar a cabo la instrumentación del invernadero para realizar las pruebas y obtener el prototipo de invernadero didáctico que se realiza en este trabajo.



Figura 4.2. Estructura final del invernadero.

4.3. Pruebas de funcionamiento de tarjetas PCBs.

Todas las tarjetas PCBs fueron probadas para comprobar que en verdad funcionan adecuadamente y así poder integrarlas al prototipo de invernadero, pero con pruebas eléctricas simples se pudo obtener el resultado. Pero las tarjetas de acondicionamiento del sensor de temperatura e iluminación deben ser caracterizadas, es por eso que se hicieron pruebas diferentes descritas a continuación.

Acondicionamiento de señal del sensor de temperatura.

Se realizó una prueba para caracterizar el sensor de temperatura, el cual consiste en calentar aceite en un recipiente y obtener el voltaje que entrega la tarjeta de acondicionamiento de señal y medir la temperatura con un termopar he ir tomando los datos hasta alcanzar la estabilidad de la temperatura del aceite. Una vez llegando a la estabilidad se tomaron los datos y mediante MATLAB los graficamos como se puede ver en la figura 4.3 para obtener una ecuación lineal que caracteriza al sensor de temperatura.

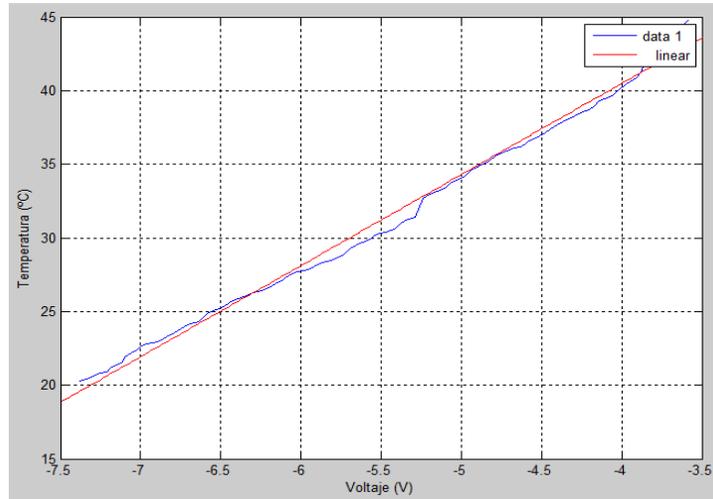


Figura 4.3. Grafica de los datos obtenidos en la prueba del sensor de temperatura.

Con las herramientas de MATLAB se obtuvo la ecuación que caracteriza al sensor de temperatura.

$$T = 6.8666 * V + 69.864$$

Donde T es la temperatura en $^{\circ}\text{C}$ y V es el voltaje que entrega la tarjeta de acondicionamiento de señal del sensor de temperatura.

Acondicionamiento de señal del sensor de iluminación.

Para probar el funcionamiento de la tarjeta de acondicionador de señal del sensor de iluminación se llevo a cabo la caracterización para obtener una fórmula que represente de mejor forma el comportamiento del sensor.

Para llevar a cabo la caracterización se tomó una caja completamente cerrada en donde dentro de la caja se colocó un foco, el sensor que se utiliza en el proyecto y un luxómetro, se vario la intensidad luminosa del foco con el PWM, desde el estado apagado hasta llegar a la máxima intensidad luminosa del foco, cada que se variaba el ancho de pulso del PWM entregaba una medición el luxómetro la cual se registraba y se tomaba el valor del voltaje que la tarjeta de acondicionamiento de señal entregaba. Es así como se obtuvieron los datos necesarios para graficar en MATLAB, como se muestra en la figura 4.4 y con las

herramientas que cuenta MATLAB obtener una ecuación lineal que caracteriza de mejor forma al sensor de iluminación.

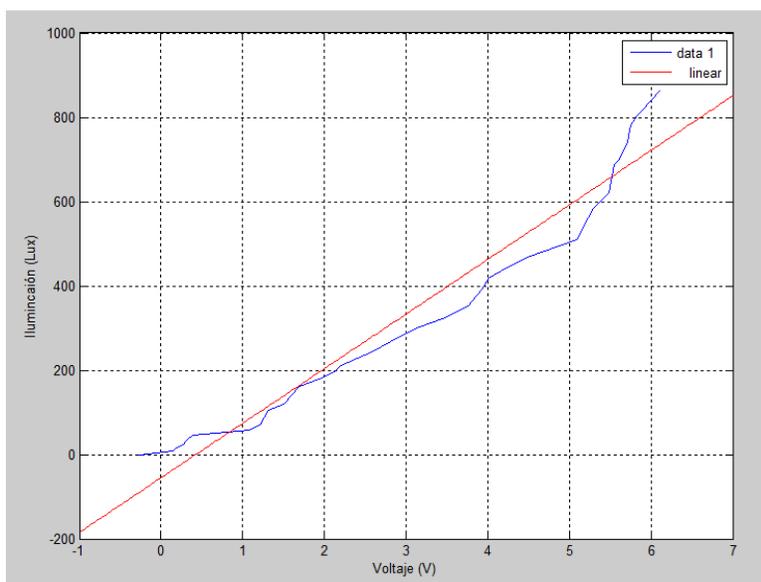


Figura 4.4. Gráfica de los datos obtenidos en la prueba del sensor de iluminación.

Con los comandos de MATLAB se obtuvo la ecuación que caracteriza al sensor de iluminación:

$$I = 129.46 * V - 55.483$$

Donde I es la iluminación en Lux y V es el voltaje que entrega la tarjeta de acondicionamiento de señal.

Con estos resultados se puede dar lectura a las variables de temperatura e iluminación y obtenerlas en unidades correctas.

4.4. Pruebas de control del prototipo de invernadero.

Ya que se generó el controlador para el sistema de temperatura, se utilizó el PLC basado en FPGA para llevar a cabo el control.

Como se recuerda del capítulo 3 solamente se puede controlar de temperatura ambiente que fue de 25 °C a 56.2 °C, es un rango de temperatura buena ya que en invernaderos reales la temperatura depende del tipo de plantío y para hacer pruebas de control el rango de temperatura es bueno.

Se tomó la temperatura ambiente la cual se encontraba a 25.3 °C y se envió una referencia de temperatura de 40 °C. En la figura 4.5 se observa la respuesta que género el controlador y la planta, se puede ver que el sistema alcanza la referencia a los 430 segundos aproximadamente que equivale a más de 7 minutos, recordamos que el sistema a controlar es lento por la radiación de temperatura que la resistencia de calefacción tiene y la ubicación del sensor de temperatura.

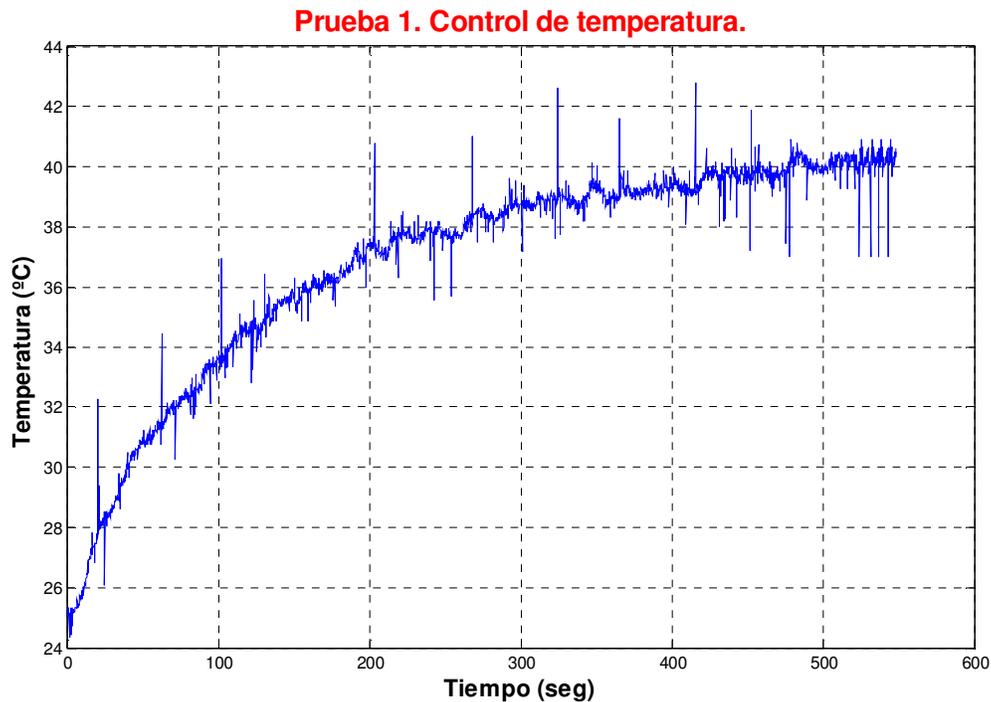


Figura 4.5. Control de temperatura a una entrada de referencia de 40 °C.

Como no se llevó a cabo el control de iluminación, se toma la lectura del comportamiento que la iluminación tiene en cuanto se realiza el control de temperatura, la figura 4.6 muestra la gráfica del comportamiento. Se puede ver que se presentan picos en la gráfica, esto se

debe al tipo de sensor que se utilizó ya que luego tomaba otros valores a los que no correspondían, pero se observa que la iluminación permanece entre 60 y 70 luxes.

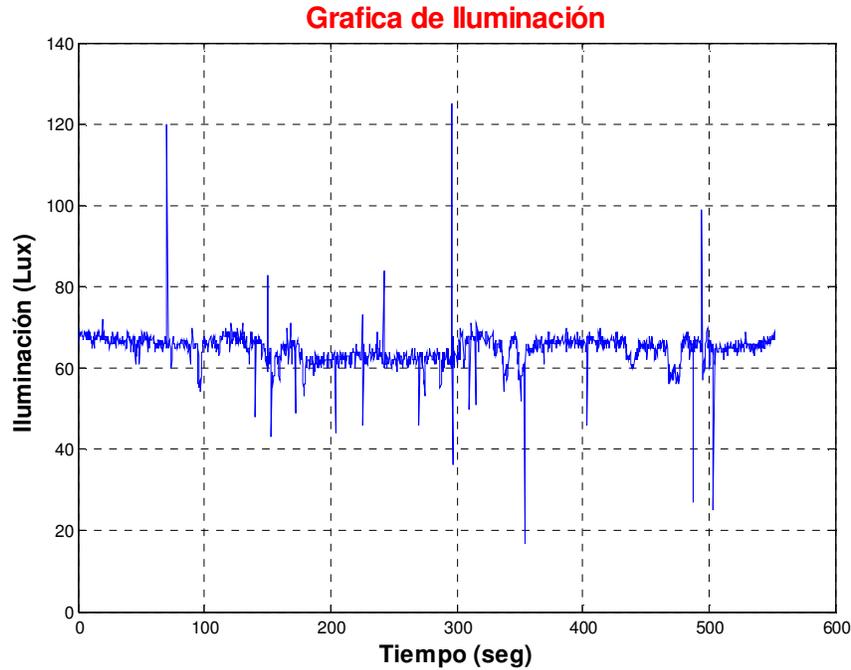


Figura 4.6. Lectura del sensor de iluminación.

También se monitoreo la humedad para ver como el control de temperatura le afectaba, la figura 4.7 muestra la gráfica de los datos obtenidos, se puede observar como el sensor es muy sensible ya que en la gráfica se ve como la humedad relativa oscila entre 35 y 65 %RH haciendo que no haya una buena medición ya que el sensor tiene mucha sensibilidad a la hora de hacer la lectura y la señal detecta ruido haciendo que no se mantenga una estabilidad de la medición de la humedad.

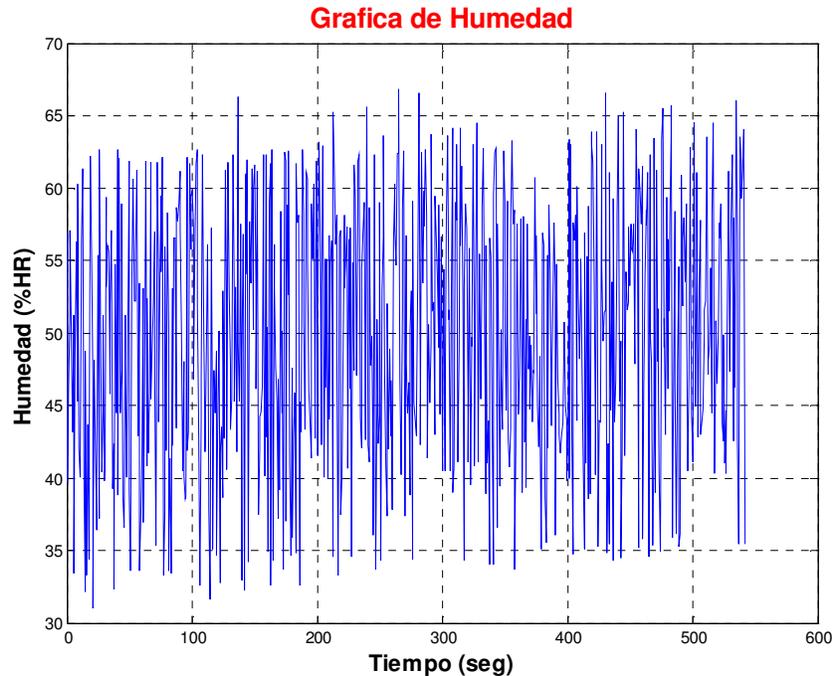


Figura 4.7. Lectura del sensor de humedad.

De esta forma fue como se hizo el control de temperatura y ver qué efectos tenía las lecturas de iluminación y humedad.

4.5. Rutina con el PLC basado en FPGA.

Para generar el código de control de eventos para el pequeño invernadero construido se siguieron una serie de pasos, primero se debe enlistar todas las entradas que deberá tomar en cuenta el procesador para poder generar un cierto número de salidas que activarán y desactivarán los actuadores y demás elementos a controlar, esta información la podemos ver en la tabla 3.1, 3.2 y 3.3, posteriormente se debe diseñar un diagrama escalera el cual ayudará a interpretar una serie de instrucciones, del diagrama escalera generado se obtendrán ecuaciones en notación polaca y finalmente se hará la descripción del código en tipo ensamblador para con ayuda del programa en C, que paralelamente con este proyecto realizó el compañero Juan José Saucedo Dorantes (Expediente 171384), elaborado para

generar el código de programa a cargar en la memoria de programa. La figura 4.8 muestra el prototipo de invernadero a controlar con el PLC basado en FPGA.



Figura 4.8. Prototipo de invernadero.

Las señales B1 a B15 son banderas internas que almacenan el resultado de operaciones, las señales L0 a L4 provienen de un registro para obtener la posición de la ventanilla, IN4 es un paro de emergencia, S1 a S8 son entradas digitales y de OUT0 a OUT8 son salidas digitales.

Lo primero que se realizó fue el diagrama escalera para abrir la ventana lateral, se dividió en tres partes, 1/3 de ventanilla abierta, 2/3 de ventanilla abierta y totalmente abierta.

El primer diagrama escalera se presenta en la figura 4.9 y sirve para abrir 1/3 de la ventanilla lateral, recordar que cada diagrama escalera que se realiza se programa en lenguaje ensamblador para después con la ayuda del programa en C realizado por el compañero Juan José Saucedo Dorantes genere el código de programa para cargarlo en la memoria.

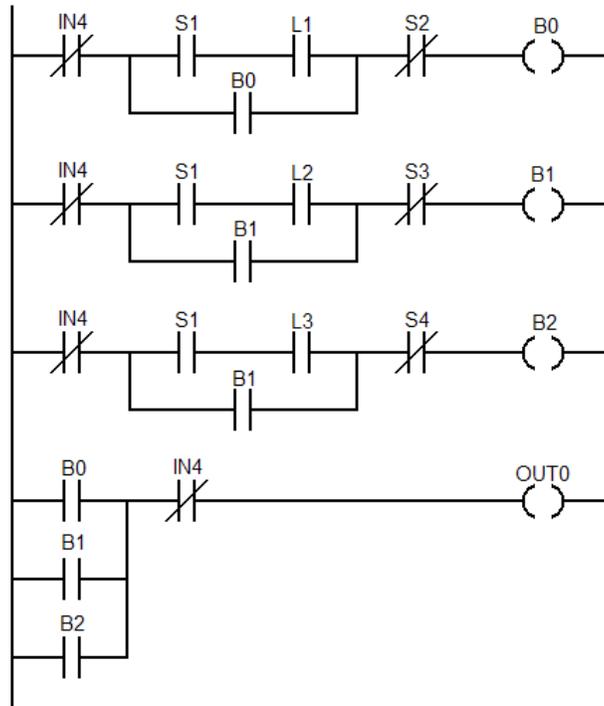


Figura 4.9. Diagrama escalera para ubicar la ventanilla lateral a 1/3 de su posición.

La obtención de las ecuaciones en notación polaca para describir la lógica del proceso cuando la ventana se encuentra en la posición 1/3 son las siguientes:

$$B0 = \text{NOT} (IN4) \text{ AND } ((S1 \text{ AND } L1) \text{ OR } B0) \text{ AND } (\text{NOT } S2)$$

$$B1 = \text{NOT} (IN4) \text{ AND } ((S1 \text{ AND } L2) \text{ OR } B1) \text{ AND } (\text{NOT } S3)$$

$$B2 = \text{NOT} (IN4) \text{ AND } ((S1 \text{ AND } L3) \text{ OR } B2) \text{ AND } (\text{NOT } S4)$$

$$OUT0 = (B0 \text{ OR } B1 \text{ OR } B2) \text{ AND } \text{NOT} (IN4)$$

En la figura 4.10 se muestra cómo es que la ventanilla lateral pasa del estado inicial que es totalmente cerrado a abrirse 1/3 de su ubicación total.



Figura 4.10. Ventanilla lateral ubicada en 1/3 de su posición.

Ahora para abrir 2/3 la ventanilla lateral se muestra el diagrama escalera en la figura 4.11.

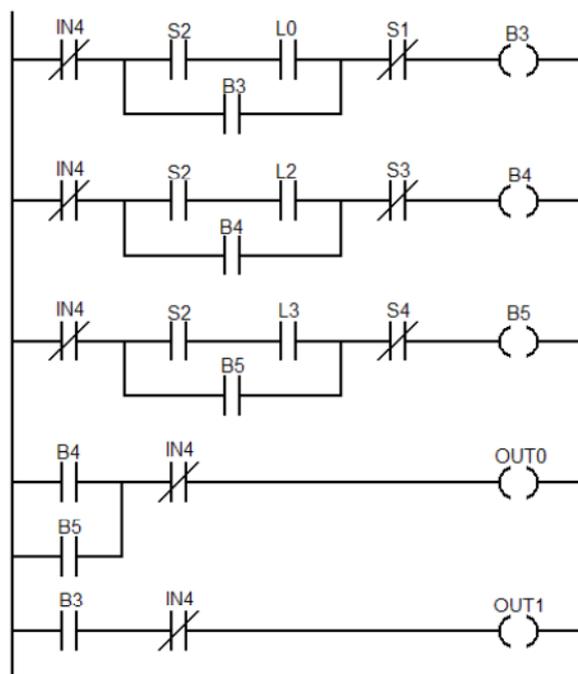


Figura 4.11. Diagrama escalera para ubicar la ventanilla lateral a 2/3 de su posición.

La obtención de las ecuaciones en notación polaca para describir la lógica del proceso cuando la ventanilla se encuentra en la posición 2/3 son las siguientes:

$B3 = \text{NOT}(\text{IN4}) \text{ AND } ((\text{S2 AND L0}) \text{ OR } B3) \text{ AND } (\text{NOT S1})$

$B4 = \text{NOT}(\text{IN4}) \text{ AND } ((\text{S2 AND L2}) \text{ OR } B4) \text{ AND } (\text{NOT S3})$

$B5 = \text{NOT}(\text{IN4}) \text{ AND } ((\text{S2 AND L3}) \text{ OR } B5) \text{ AND } (\text{NOT S4})$

$\text{OUT0} = (B4 \text{ OR } B5) \text{ AND NOT}(\text{IN4})$

$\text{OUT1} = B3 \text{ AND NOT}(\text{IN4})$

En la figura 4.12 se muestra cómo es que la ventanilla lateral pasa de la posición 1 que es 1/3 abierto a la posición 2 que es 2/3 de ventanilla abierta.



Figura 4.12. Ventanilla lateral ubicada en 2/3 de su posición.

Ahora para abrir totalmente la ventanilla lateral se muestra el diagrama escalera en la figura 4.13.

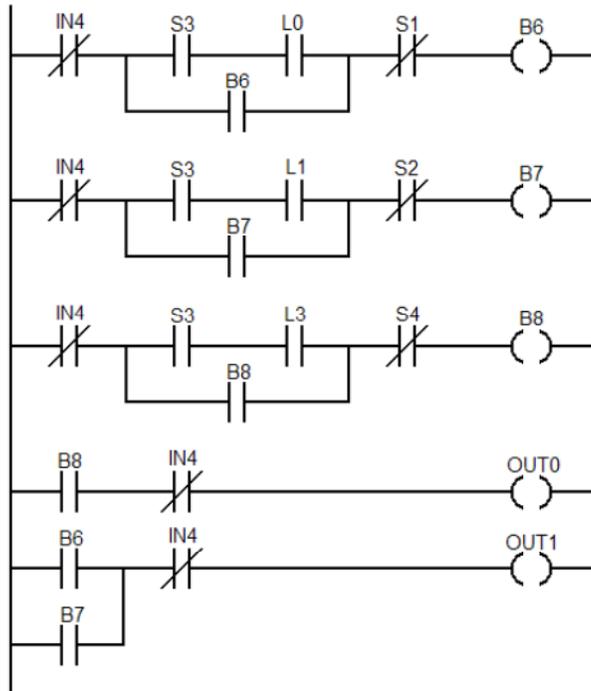


Figura 4.13. Diagrama escalera para abrir la ventanilla totalmente abierta.

La obtención de las ecuaciones en notación polaca para describir la lógica del proceso cuando la ventana se encuentra en la posición totalmente abierta son las siguientes:

$$B6 = \text{NOT} (IN4) \text{ AND } ((S3 \text{ AND } L0) \text{ OR } B6) \text{ AND } (\text{NOT } S1)$$

$$B7 = \text{NOT} (IN4) \text{ AND } ((S3 \text{ AND } L1) \text{ OR } B7) \text{ AND } (\text{NOT } S2)$$

$$B8 = \text{NOT} (IN4) \text{ AND } ((S3 \text{ AND } L3) \text{ OR } B8) \text{ AND } (\text{NOT } S4)$$

$$\text{OUT0} = B8 \text{ AND } \text{NOT} (IN4)$$

$$\text{OUT1} = (B6 \text{ OR } B7) \text{ AND } \text{NOT} (IN4)$$

La figura 4.14 muestra cómo es que la ventanilla lateral se encuentra totalmente abierta.



Figura 4.14. Ventanilla lateral ubicada totalmente abierta.

Ahora para llevar el control de la ventanilla superior se observa el diagrama escalera en la figura 4.15, sólo abre y cierra totalmente.

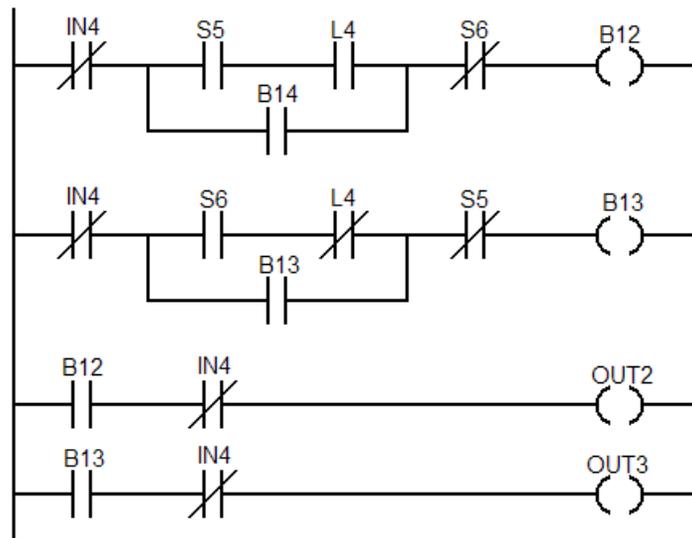


Figura 4.15. Diagrama escalera para la ventanilla superior.

La obtención de las ecuaciones en notación polaca para describir la lógica de la apertura o cierre de la ventanilla superior es la siguiente:

$$B12 = \text{NOT} (IN4) \text{ AND } ((S5 \text{ AND } L5) \text{ OR } B12) \text{ AND } (\text{NOT } S6)$$

$$B13 = \text{NOT} (IN4) \text{ AND } ((S6 \text{ AND } (\text{NOT } L5)) \text{ OR } B13) \text{ AND } (\text{NOT } S7)$$

$$OUT2 = B12 \text{ AND } \text{NOT} (IN4)$$

$$OUT3 = B13 \text{ AND } \text{NOT} (IN4)$$

En la figura 4.16 se muestra cómo es que la ventanilla superior se encuentra abierta.



Figura 4.16. Ventanilla superior en estado abierto.

Para el control de la malla sombra se observa el diagrama escalera en la figura 4.17, que igual que la ventanilla lateral sólo abre y cierra totalmente.

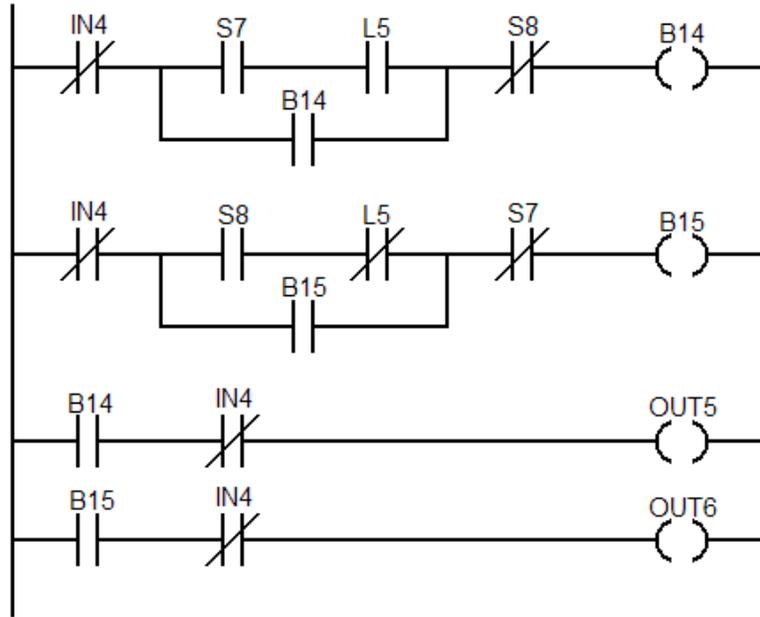


Figura 4.17. Diagrama escalera para la malla sombra.

La descripción de ecuaciones en notación polaca fue la siguiente:

$$B14 = \text{NOT} (IN4) \text{ AND } ((S7 \text{ AND } L5) \text{ OR } B14) \text{ AND } (\text{NOT } S8)$$

$$B15 = \text{NOT} (IN4) \text{ AND } ((S8 \text{ AND } (\text{NOT } L5)) \text{ OR } B15) \text{ AND } (\text{NOT } S7)$$

$$OUT5 = B12 \text{ AND } \text{NOT} (IN4)$$

$$OUT6 = B13 \text{ AND } \text{NOT} (IN4)$$

En la figura 4.18 se alcanza a observar como la malla se encuentra totalmente cerrada.



Figura 4.18. Malla sombra cerrada.

Para activar la resistencia, los ventiladores y el sistema de riego se describe el diagrama escalera en la figura 4.19.

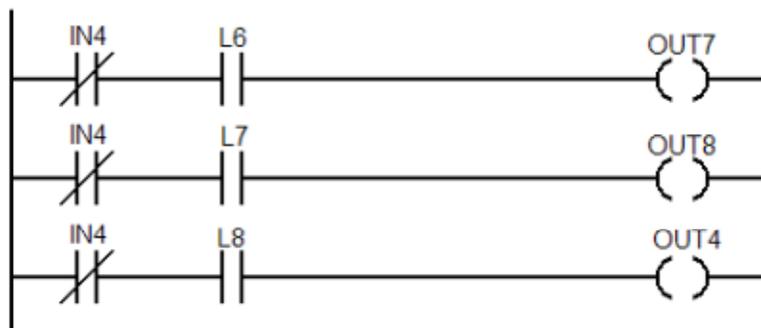


Figura 4.19. Diagrama escalera para activar resistencia de calefacción, ventiladores y sistema de riego.

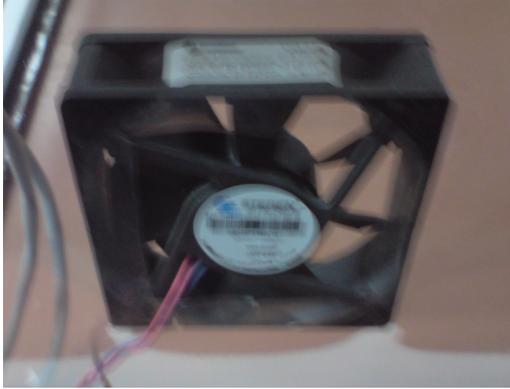
Su descripción de ecuaciones en notación polaca es la siguiente:

$$\text{OUT7} = \text{NOT (IN4) AND L6}$$

$$\text{B15} = \text{NOT (IN4) AND L7}$$

OUT5 = NOT (IN4) AND L8

En la figura 4.20 se muestra el ventilador y la resistencia de calefacción en funcionamiento.



(a)



(b)

Figura 4.20. (a) Ventilador en funcionamiento y (b) resistencia de calefacción activada.

Capítulo V

Conclusiones.

Con el desarrollo de nuevas tecnologías, se permite dar más opciones para la solución de problemas que se presentan en la industria. Uno de los trabajos que la universidad ha venido realizando es el diseño electrónico, ya que con un lenguaje de descripción hardware y tecnologías como un FPGA se desarrolló la arquitectura de un PLC, el cual es parte fundamental del proyecto realizado.

El prototipo de invernadero abre una opción al mercado dedicado a la tecnología de invernaderos en la automatización, ya que muestra la integración del PLC basado en FPGA, donde se observa el desempeño del funcionamiento, haciendo diferentes tareas que el prototipo de invernadero junto con las tarjetas PCBs desarrolladas llevan a cabo, mostrando la automatización del sistema.

Con el desarrollo de este proyecto se logró implementar el PLC basado en FPGA para la automatización y ver su funcionamiento y comportamiento, obteniendo un buen resultado, además de las tarjetas PCBs que fueron desarrolladas durante el proyecto para que de esta forma el proyecto este integrado con trabajo hecho en la universidad, también trajo un prototipo de invernadero en donde se puede emular las acciones que en un invernadero real se realizan para así poder mostrar a empresas interesadas la tecnología que se desarrollan en la universidad y poder tener una mejor visión del funcionamiento y por último el prototipo

de invernadero ha sido de gran ayuda para que el compañero Juan José Saucedo Dorantes (número de expediente 171384) que desarrolló una interfaz gráfica para monitoreo de un invernadero paralelo con este proyecto para llevar a cabo las pruebas de funcionamiento y obtener los resultados necesarios para la conclusión de su proyecto, es así como se concluyen los logros que el proyecto ha generado.

Como prospectivas futuras y con los resultados que se han obtenido hasta este momento, se piensa seguir mejorando para que en un futuro poder implementarlo en un invernadero real.

Finalmente con este trabajo se abre paso a la implementación del PLC basado en FPGA a una nueva área de aplicación y poder trascender en desarrollo de nuevas tecnologías, de tal forma que se obtengan resultados eficaces y rentables.

Referencias.

Colombini Carlos, Forgan Ernesto, Gonzáles Manuel, Ibañes Susana y Pellegrino Graciela. 2005. Invernadero Automatizado, Instituto Nacional de Educación Tecnológica, serie de recursos didácticos.

Coughlin F. Robert y Driscoll F. Frederick. 1993. Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales, primera edición, editorial Prentice-Hall Hispanoamerica.

García Escalante, Juan José. 2004. Control climático de invernaderos basado en el modelo del cultivo y procesamiento de imágenes. Tesis maestría. Universidad Autónoma de Querétaro. Facultad de ingeniería.

Gómez Meléndez, D.J. 2005. Control fuzzy-PID aplicado a un sistema de riego localizado para invernaderos. Tesis maestría. Universidad Autónoma de Querétaro. Facultad de ingeniería.

Gorini F. 1962. I requisiti contruttivi delle serre rispetto alla necessità di illuminazione, aereazione e di riscaldamento (La construcción de invernaderos con respecto a las necesidades de cualquier tipo de iluminación, ventilación y calefacción.), dell'Ortoflorofrutt, Italia.

Kucklick R Theodore. 2006. The Medical Device R & D Handbook.

Maruri Aguilar, Beatriz. 2009. Diseño y prueba de un prototipo de invernadero Nodriza para protección insitu de ejemplares jóvenes de Albizia occidentalis en temporada invernal. Tesis maestría. Universidad Autónoma de Querétaro. Facultad de ingeniería.

Muñoz Barrón, Benigno. 2009. Diseño de un procesador PLC basado en FPGA para aplicación en maquinaria CNC. Tesis licenciatura. Universidad Autónoma de Querétaro. Facultad de ingeniería.

Nila Olmedo, Natalia de Jesús. 2009. Sistema inalámbrico para monitoreo de variables climatológicas en un invernadero. Tesis maestría. Universidad Autónoma de Querétaro. Facultad de ingeniería.

Universidad Autónoma de Querétaro

Ogata Katsuhiko. 2000. Ingeniería de control moderna, tercera edición, Prentice Hall.

Palacios Municio Enrique, Remiro Domínguez Fernando, López Pérez Lucas J. (2004). Microcontrolador PIC16F84 Desarrollo de proyectos, primera edición, editorial Alfaomega.

Pallás Areny, Ramón. 2002. Sensores y acondicionadores de señal, tercera edición, editorial alfaomega-marcombo.

Pereira Santos Luis, De Juan Valero José Arturo, Picornell Buendía María Raquel. 2010. El riego y sus tecnologías, primera edición, Instituto Superior de Agronomía, Universidad Técnica de Lisboa.

Rojas Molina, Adriana. 2003. Control difuso para el sistema de riego en invernadero. Tesis maestría. Universidad Autónoma de Querétaro. Facultad de ingeniería.

Santillán Méndez, Israel Marcos. (2005). Sistema experto aplicado a un control automático de riego hidropónico. Tesis maestría. Universidad Autónoma de Querétaro. Facultad de ingeniería.

Spartacus Gomáriz, Castro Domingo Biel Solé, José Matas Alcalá, Miguel Reyes Moreno. 2001. Teoría de control Diseño electrónico.

Tognoni F. y Alpi A. 1999. Cultivo en invernadero, tercera edición, editorial grupo mundi-prensa libros.

Universidad Autónoma de Querétaro:

www.uaq.mx/ingenieria/posgrado/especialidades/invernaderos.

(Agosto 2011).

Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA):

www.sagarpa.gob.mx.

(Agosto 2011).

Apéndice.

Hoja de datos del sensor de Humedad (HIH-4000-002).

Honeywell

HIH-4000-002

HIH-4000 Series Integrated Circuitry Humidity Sensor, 1,27 mm (0.050 in) Lead Pitch SIP

Product Specifications	
Package Style	Solderable SIP
Termination Details	1,27 mm [0.050 in] Lead Pitch
Series Name	HIH-4000 Series
RH Accuracy	± 3.5% RH, 0-100 % RH non-condensing, 25 °C, 5 Vdc supply
RH Interchangeability	± 5% RH, 0-60% RH; ± 8% @ 60-100% RH Typical
RH Hysteresis	± 3% of RH Span Maximum
RH Repeatability	± 0.5% RH
RH response time, 1/e	15 s in slowly moving air @ 25 °C
RH Stability	± 0.2% RH Typical at 50% RH in 1 Year
Supply Voltage	4.0 Vdc to 5.8 Vdc
Supply Current	500 µA Max.
Operating Humidity Range	0 to 100% RH, non-condensing
Operating Temperature Range	-40 °C to 85 °C (-40 °F to 185 °F)
Temperature Compensation	True RH = Sensor RH/(1.0305+0.000044T-0.0000011T ²) T in °C (True RH = Sensor RH/(0.9237-0.0041T+0.000040T ²) T in °C)
Availability	Global
Comment	Light sensitive, shield from bright light.
UNSPSC Code	411121
UNSPSC Commodity	411121 Transducers

Honeywell

HIH-4000-002

HIH-4000 Series Integrated Circuitry Humidity Sensor, 1,27 mm (0.050 in) Lead Pitch SIP

Hoja de datos del sensor de Temperatura (HEL-700).

Temperature Sensors Platinum RTDs

HEL-700

FUNCTIONAL BEHAVIOR

$$R_T = R_0(1 + AT + BT^2 - 100CT^3 + CT^4)$$

RT = Resistance (Ω) at temperature T ($^{\circ}\text{C}$)

R₀ = Resistance (Ω) at 0 $^{\circ}\text{C}$

T = Temperature in $^{\circ}\text{C}$

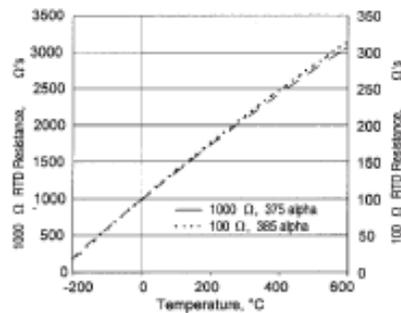
$$A = \alpha + \frac{\alpha \delta}{100} \quad B = \frac{-\alpha \delta}{100^2} \quad C_{100} = \frac{-\alpha \beta}{100^4}$$

CONSTANTS

Alpha, α ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	0.00375 ± 0.000029	0.003850 ± 0.000010
Delta, δ ($^{\circ}\text{C}$)	1.605 ± 0.009	1.4999 ± 0.007
Beta, β ($^{\circ}\text{C}$)	0.16	0.10693
A ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	3.81×10^{-4}	3.908×10^{-4}
B ($^{\circ}\text{C}^{-2}$)	-6.02×10^{-7}	-5.775×10^{-7}
C ($^{\circ}\text{C}^{-3}$)	-6.0×10^{-12}	-4.189×10^{-12}

Both $\beta = 0$ and $C = 0$ for $T > 0^{\circ}\text{C}$

RESISTANCE VS TEMPERATURE CURVE



ACCURACY VS TEMPERATURE

HEL-700 platinum RTDs are available in two base resistance trim tolerances: $\pm 0.2\%$ or $\pm 0.1\%$. The corresponding resistance interchangeability and temperature accuracy for these tolerances are:

Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Standard $\pm 0.2\%$		Optional $\pm 0.1\%$	
	$\pm \Delta R^*$ (Ω)	$\pm \Delta T$ ($^{\circ}\text{C}$)	$\pm \Delta R^*$ (Ω)	$\pm \Delta T$ ($^{\circ}\text{C}$)
-200	6.8	1.6	5.1	1.2
-100	2.9	0.8	2.4	0.6
0	2.0	0.5	1.0	0.3
100	2.9	0.8	2.2	0.6
200	5.6	1.6	4.3	1.2
300	8.2	2.4	6.2	1.8
400	11.0	3.2	8.3	2.5
500	12.5	4.0	9.6	3.0
600	15.1	4.8	10.4	3.3

*1000 Ω RTD. Divides ΔR by 10 for 1000 Ω RTD.

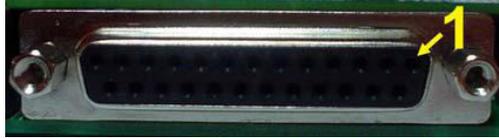
CAUTION

PRODUCT DAMAGE

The inherent design of this component causes it to be sensitive to electrostatic discharge (ESD). To prevent ESD-induced damage and/or degradation, take normal ESD precautions when handling this product.

SPECIFICATIONS

Sensor Type	Thin film platinum RTD; R ₀ = 1000 Ω @ 0 $^{\circ}\text{C}$; alpha = 0.00375 $\Omega/\Omega/^{\circ}\text{C}$ R ₀ = 100 Ω @ 0 $^{\circ}\text{C}$; alpha = 0.00385 $\Omega/\Omega/^{\circ}\text{C}$
Temperature Range	-200 to +540 $^{\circ}\text{C}$ (-300 to +1000 $^{\circ}\text{F}$)
Temperature Accuracy	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ or 0.8% of temperature, $^{\circ}\text{C}$ (R ₀ $\pm 0.2\%$ trim), whichever is greater $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ or 0.6% of temperature, $^{\circ}\text{C}$ (R ₀ $\pm 0.1\%$ trim), whichever is greater (optional)
Base Resistance and Interchangeability, R ₀ $\pm \Delta R_0$	1000 $\pm 2 \Omega$ ($\pm 0.2\%$) @ 0 $^{\circ}\text{C}$ 1000 $\pm 1 \Omega$ ($\pm 0.1\%$) @ 0 $^{\circ}\text{C}$ (optional)
Linearity	$\pm 0.1\%$ of full scale for temperatures spanning -40 $^{\circ}$ to +125 $^{\circ}\text{C}$ $\pm 2.0\%$ of full scale for temperatures spanning -200 $^{\circ}$ to +540 $^{\circ}\text{C}$
Time Constant	<0.15 seconds in water @ 3 ft./sec. <1 second on metal surfaces; <4 seconds in air @ 10 ft./sec.
Operating Current	2 mA max. For self-heating errors of 1 $^{\circ}\text{C}$ 1 mA recommended
Stability	Better than 0.25 $^{\circ}\text{C}/\text{year}$; 0.05 $^{\circ}\text{C}/5$ years for occupied environments
Self-Heating	0.3 mW/ $^{\circ}\text{C}$
Insulation Resistance	>50 M Ω @ 50 VDC @ 25 $^{\circ}\text{C}$
Case Material	99% alumina support, vapor deposited alumina passivated resistance portion, refractory glass passivated overall
Lead Material - Ribbon	Platinum ribbon, 0.002 \times 0.010 \times 0.16 in. long nominal
Lead Pull Strength - Ribbon	200 grams nominal pulling up from surface



Conector J1	
Entradas digitales	
Nombre	Pin
IN0	11
IN1	23
IN2	10
IN3	22
IN4	9
IN5	21
IN6	8
IN7	20
IN8	5
IN9	17
IN10	4
IN11	16
IN12	3
IN13	15
IN14	2
IN15	14
GND	1,13,18,19,25, Shield
VCC5	6,7,24,12

Conector J2	
Salidas digitales	
Nombre	Pin
OUT0	5
OUT1	18
OUT2	6
OUT3	19
OUT4	7
OUT5	20
OUT6	8
OUT7	21
OUT8	9
OUT9	22
OUT10	10
OUT11	23
OUT12	11
OUT13	24
OUT14	12
OUT15	25
GND	1,2,3,4,13, Shield
VCC5	14,15,16,17



Conector J3	
Salidas analógicas	
Nombre	Pin
DAC0	1
DAC1	6
DAC2	2
DAC3	7
DAC4	3
DAC5	8
DAC6	4
DAC7	9
GND	5,Shield

Conector J7	
Entradas analógicas	
Nombre	Pin
ADC0	3
ADC1	8
ADC2	4
ADC3	9
ADC4	6
ADC5	1
ADC6	2
ADC 7	7
GND	5,Shield