

Diseño y construcción de un invernadero con sistema de control de temperatura y humedad del suelo, para un cultivo de lechuga

(Lactuca Sativa)



**Universidad
del Cauca**

Jessica Alejandra Bermeo Melo

Universidad Del Cauca

**Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y de La
Educación Programa de Ingeniería Física**

Popayán

2019

Diseño y construcción de un invernadero con sistema de control de temperatura y humedad del suelo, para un cultivo de lechuga (Lactuca Sativa).

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniera Física

Jessica Alejandra Bermeo Melo

Director:

Mg Mario Milver Patiño

Universidad Del Cauca

Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y de la Educación

Programa de Ingeniería Física

Popayán

2019

AGRADECIMIENTOS

Es muy importante para mí este espacio, porque en el puedo mostrar la gratitud que tengo con cada una de las personas que participaron e hicieron posible convertir este sueño en realidad. Primero que todo quiero agradecer a mi familia, su apoyo y comprensión, por ser el motor de mi vida y por acompañarme en este largo viaje.

A Julián Aguilar por su cariño, paciencia y apoyo en los momentos difíciles.

A mi director Mario Milver Patiño y al Grupo de Óptica y Láser, por acogerme y guiarme en cada una de las etapas de este proyecto.

A mis amigos, con todos los que compartí dentro y fuera de las aulas.

A mis compañeros David Rodríguez, Juan Felipe Gómez, Julián Medina, Sebastián Penagos y a todas las personas que me dieron un pequeño empujón y me brindaron un poco de su tiempo para ayudarme a superar obstáculos en este proceso.

Y finalmente al docente Willfrand Pérez, que más que un profesor ha sido un gran amigo para mí, gracias por confiar en mí cuando ni yo misma lo hacía, por guiarme y apoyarme en el transcurso de esta linda carrera.

TABLA DE CONTENIDO

Introducción	08
Justificación	09
Objetivos.	10
1. Seguridad alimentaria y Cambio climático.	11
1.1. Seguridad alimentaria	11
1.2. Cambio climático	12
1.3. El cultivo de lechuga	14
1.3.1 Conceptualización de la Lechuga	15
1.3.2 Parámetros para el desarrollo fisiológico del cultivo de lechuga.	16
2. Invernaderos	17
<hr/>	
2.1 Variables climáticas	17
2.1.1 Temperatura	17
2.1.2 Humedad relativa	17
2.1.3 Radiación solar	18
2.1.4	18
	Ventilación
	18
2.1.5 Humedad del suelo	18
2.1.6 Concentración de CO ₂	18
2.2 Tipos de Invernaderos	19
2.2.1 Invernadero tipo capilla	19
2.2.2 Invernadero diente de sierra	19
2.2.3 Invernadero asimétrico	20
2.2.4 Invernadero de doble capilla	20
2.2.5 Invernaderos góticos	20
2.2.6 Invernadero tipo túnel	20
3. Sistema implementado.	22
3.1. Requerimientos.	22
3.1.1 Variables termodinámicas a controlar	22
3.2. Implementación	23
3.2.1 Estructura	23

3.2.1.1	Tipo de invernadero	_____	
		23	
3.2.1.2	Orientación	_____	23
3.2.1.3	Dimensiones del invernadero	_____	24
3.2.1.3.1	Ancho del invernadero	_____	
		24	
3.2.1.3.2	Largo del invernadero	_____	
		24	
3.2.1.3.3	Altura del invernadero	_____	
		24	
3.2.1.3.4	Tamaño de las ventanas del invernadero	_____	
		25	
3.2.1.4	Materiales	_____	26
3.2.1.4.1	Estructura metálica	_____	26
3.2.1.4.2	Superficie	_____	plástica
		27	
3.2.1.4.1	Malla	_____	mosquitera
		27	
3.2.1.4.1	Soporte del cultivo	_____	
		28	
3.2.2	Sensores	_____	
		28	
3.2.2.1	Calibración, caracterización o verificación de sensores	_____	30
3.2.2.1.1	Sensor de humedad de suelo	_____	
		30	
3.2.2.1.2	Sensor de temperatura y humedad	_____	34
3.2.2.2	Posición de los sensores	_____	
		35	
3.2.2.2.1	Posición de sensores de temperatura	_____	35
3.2.2.2.2	Posición de los sensores de humedad de suelo	_____	
		37	
3.2.3	Actuadores	_____	38
3.2.3.1	Ventanas Laterales	_____	38
3.2.3.1.1	Sistema de posicionamiento de ventana	_____	38
3.2.3.1.2	Sistema mecánico de la ventana lateral	_____	
		40	
3.2.3.1.3	Motor Eléctrico	_____	
		41	
3.2.3.2	Ventana Cenital	_____	
		42	
3.2.3.2.1	Sistema de posicionamiento	_____	
		42	
3.2.3.2.2	Sistema mecánico y eléctrico	_____	
		42	
3.2.3.3	Ventiladores	_____	
		43	
3.2.3.3.1	Circuito detector de cruce por cero	_____	
		44	
3.2.3.3.2	Circuito Dimmer	_____	45
3.2.3.4	Sistemas de Calefacción	_____	
		46	
3.2.3.5	Sistema de Riego	_____	
		47	

3.2.3.6 Sistema de Nebulización	50
---------------------------------	----

4. Estrategia de control.	51
4.1. Diseño del controlador	52
4.1.1 Fuzzificación	53
4.1.1.1 Función de membresía para la temperatura	53
4.1.1.2 Función de membresía para la humedad	54
4.1.1.3 Función de membresía para la humedad del suelo	54
4.1.1.4 Funciones de membresía para la ventana cenital	55
4.1.1.5 Funciones de membresía para las ventanas laterales	55
4.1.1.6 Funciones de membresía para la resistencia de calefacción	56
4.1.1.7 Funciones de membresía para el ventilador	56
4.1.1.8 Funciones de membresía para el sistema de riego	57
4.1.1.9 Funciones de membresía para el sistema de nebulización	57
4.1.2 Reglas difusas	58
4.1.3 Superficies de Control	58
4.1.3.1 Superficies de control para la ventana cenital	58
4.1.3.2 Superficies de control para la ventana lateral	59
4.1.3.3 Superficies de control para la resistencia	59
4.1.3.4 Superficies de control para el ventilador	60
4.1.3.5 Superficies de control para el sistema de riego	61
4.1.3.6 Superficies de control para el sistema de nebulización	62
5. Resultados y discusión.	63
6. Conclusiones.	74
7. Referencias	75
8. Anexos	

LISTA DE TABLA

Tabla 1. Tipos de lechuga. _____	16
Tabla 2. Características de cultivo de lechuga. _____	16
Tabla 3. Características de los sensores. _____	29
Tabla 4. Método 1 para caracterización de sensores de humedad de suelo. _____	31 - 32
Tabla 5. Método 2 para caracterización de sensores de humedad de suelo. _____	33
Tabla 6. Esquema de inferencia del Dimmer. _____	47
Tabla 7. Evaluación del cultivo a la intemper. _____	69 - 70
Tabla 8. Evaluación del cultivo interior _____	70 - 71
Tabla 9. Parámetros del cultivo exterior (C.E) y del cultivo interior (C.I) _____	77
Tabla 10. Rentabilidad del cultivo interior respecto a la intemperie _____	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Tipos de invernaderos. Fuente: (https://agroinvernaderos.webnode.es , 2012)	21
Figura 2.	Tamaño del Invernadero (Solid Edge).	25
Figura 3.	Tamaño de la ventana lateral (Solid Edge).	26
Figura 4.	Estructura metálica.	26
Figura 5.	Superficie plástica.	27
Figura 6.	Soporte del cultivo.	28
Figura 7.	Estructura de verificación del sensor temperatura y humedad.	34
Figura 8.	Soporte de sensor de temperatura y humedad.	35
Figura 9.	Posibles posiciones de sensor de temperatura.	36
Figura 10.	Montaje móvil de medición de temperatura.	37
Figura 11.	Posición de sensores de efecto Hall.	39
Figura 12.	Algoritmo de posición.	39
Figura 13.	Engranajes ventana lateral.	40
Figura 14.	Motor ventana lateral.	40
Figura 15.	Diagrama del circuito para el motor de ventana lateral.	41
Figura 16.	Ubicación motora de ventana lateral.	41
Figura 17.	Soporte del motor de la ventana cenital.	43
Figura 18.	Ventiladores.	44
Figura 19.	Circuito detector de cruce por cero.	45
Figura 20.	Circuito Dimmer.	45
Figura 21.	Relés para el controlador dimmer.	46
Figura 22.	Sistema de riego.	48
Figura 23.	Montaje electroválvula.	49
Figura 24.	Circuito de acople Relé.	49
Figura 25.	Sistema de nebulización.	50
Figura 26.	Bucle de control general.	51
Figura 27.	Sistema de control de lazo cerrado.	52
Figura 28.	Interfaz gráfica de software de Fuzzy Logic Toolbox (Matlab).	53
Figura 29.	Fuzzificación Temperatura.	54

Figura 30. Fuzzificación Humedad. _____	54
Figura 31. Fuzzificación Humedad de suelo. _____	55
Figura 32. Fuzzificación Ventana Cenital. _____	55
Figura 33. Fuzzificación Ventana Lateral. _____	56
Figura 34. Fuzzificación Resistencia. _____	56
Figura 35. Fuzzificación Vntilador. _____	57
Figura 36. Fuzzificación Sistema Riego. _____	57
Figura 37. Fuzzificación de Nebulización. _____	58
Figura 38. Superficie de control de temperatura, humedad y ventana cenital. _____	59
Figura 39. Superficie de control de temperatura, humedad de suelo y ventana cenital. _____	59
Figura 40. Superficie de control de temperatura, humedad y ventana lateral. _____	59
Figura 41. Superficie de control de temperatura, humedad de suelo y ventana lateral. _____	59
Figura 42. Superficie de control de temperatura, humedad y resistencia calefactora. _____	60
Figura 43. Superficie de control de temperatura, humedad de suelo y resistencia calefactora. ____	60
Figura 44. Superficie de control de temperatura, humedad y ventilador. _____	60
Figura 45. Superficie de control de temperatura, humedad de suelo y ventilador. _____	60
Figura 46. Superficie de control de temperatura, humedad y sistema de riego. _____	61
Figura 47. Superficie de control de temperatura, humedad de suelo y sistema de riego. _____	61
Figura 48. Superficie de control de humedad, humedad de suelo y sistema de riego. _____	61
Figura 49. Superficie de control de temperatura, humedad y sistema nebulizador. _____	62
Figura 50. Superficie de control de temperatura, humedad de suelo y sistema nebulizador. ____	62
Figura 51. Aumento de la Temperatura de forma forzada. _____	64
Figura 52. Estabilización de la temperatura sin controlador _____	65
Figura 53. Placa del circuito impreso _____	66
Figura 54. Respuesta del controlador a la temperatura _____	67
Figura 55. Respuesta del controlador a la Humedad de Suelo _____	68

INTRODUCCIÓN

La agricultura es uno de los grandes motores de la economía a nivel mundial, por lo cual, 40% de las tierras del planeta se emplean para esta labor. Sin embargo, el creciente cambio climático al que está siendo sometido el planeta ha afectado la producción y el rendimiento de los cultivos. Entre las soluciones agrícolas más estudiadas para estos casos se encuentran los invernaderos, pues permiten establecer condiciones climáticas adecuadas y que los cultivos fuera de época se mantengan durante más tiempo y además, dentro de estos se puede controlar variables como temperatura y humedad que permiten que los cultivos se mantengan sanos. No obstante, la automatización de invernaderos desde la primera etapa de diseño no está muy desarrollada en Colombia y es por eso que la estructura tradicional que se estableció hace más de 50 años se sigue usando (Bojacá et al., 2011). En el país se empezaron a replicar modelos de invernaderos que fueron diseñados para cultivos de flores en la sabana de Bogotá y que no contaban con sistemas de ventilación adecuados para cada región (Newman,1999).

El proceso adecuado de diseño de invernaderos debe enfocarse en dos aspectos relevantes. El primero, las condiciones climáticas locales de la región donde se van a construir y el segundo, a aspectos relevantes de la ecofisiología de los cultivos a establecer como lo son rangos de temperatura y humedad relativa. De acuerdo con lo anterior mencionado, se decidió generar una solución tecnológica por medio del diseño y la construcción de un invernadero automatizado a través de dispositivos sensóricos y actuadores controlados por un sistema difuso embebido en un microcontrolador “Arduino Mega 2560” , el cual puede ser adaptado a diferentes regiones y/o cultivos con un pequeño cambio en las reglas de control. Para evaluar la viabilidad del invernadero, se sembró un cultivo de lechuga como cultivo de control en el interior del invernadero y un cultivo a la intemperie, para finalmente hacer la comparación del rendimiento del cultivo interior respecto al otro.

JUSTIFICACIÓN

En la actualidad en Colombia se maneja principalmente un sistema de agricultura bajo cubierta o de techos, implementado en gran mayoría por medianos y pequeños productores, en donde no se hace uso de un control y un registro de la mayoría de las variables climáticas que intervienen en el desarrollo de los cultivos. La ausencia de tecnologías o paquetes tecnológicos que sean de fácil acceso económico, aplicados a la agricultura bajo cubierta, representa un problema para los productores que se dedican a este tipo de producción, ya que se está perdiendo la oportunidad de brindar las condiciones óptimas y explotar al máximo la genética de su cultivo.

Los productores utilizan diferentes opciones que les permiten afrontar condiciones climáticas adversas enfocadas principalmente a la protección, aplicación de productos preventivos ante plagas y enfermedades. En el mercado actual, la demanda de alimentos está exigiendo productos inocuos, libres de agentes contaminantes nocivos para la salud. El uso de invernaderos tradicionales como protección, son una de las opciones más implementadas para los cultivadores de hortalizas, frutales, aromáticas entre otros.

El presente trabajo contribuirá a implementar una tecnología de ambiente controlado, llevando registro de las variables, siendo preciso al momento de brindar las condiciones apropiadas para el desarrollo del cultivo, disminuyendo la incidencia de plagas y enfermedades e implementando una buena fertilización, obteniendo como resultado, un cultivo que podrá presentar baja incidencia y severidad de problemas fitosanitarios, gracias a la condiciones adecuadas para el mismo, dando como resultado, un producto de buena calidad. Además de brindar la posibilidad de producir todo el año. La implementación del uso de estas técnicas, contribuye al desarrollo de la agricultura en nuestro país, brindando grandes oportunidades de entrar al mercado nacional e internacional, gracias a la posible obtención de productos inocuos, con trazabilidad, siendo eficientes y sostenibles en el tiempo.

OBJETIVOS

Objetivo General

Diseñar y construir un invernadero con sistema de control de temperatura y humedad del suelo, para un cultivo de lechuga (*Lactuca Sativa*).

Objetivos Específicos

- Determinar las condiciones de producción del cultivo de lechuga
- Establecer la instrumentación necesaria y la estrategia adecuada para el control climático en el invernadero.
- Diseñar la estructura del invernadero de acuerdo a los requerimientos del cultivo y a la instrumentación seleccionada.
- Evaluar el efecto del invernadero sobre el cultivo realizado.

1. SEGURIDAD ALIMENTARIA Y CAMBIO CLIMÁTICO.

1.1 Seguridad alimentaria.

El término de seguridad alimentaria nace en la década de los 70, basado en la disponibilidad y producción de alimentos a nivel global y nacional. En un inicio el término de seguridad alimentaria se enfoca solo en el término productividad, luego se introdujo el término de inocuidad de los mismos y hoy la actualidad se han incluido más términos los cuales engloban, sostenibilidad y acceso a los alimentos, ratificando la seguridad alimentaria como un derecho humano.

En el ámbito nacional, la situación agraria según el informe, elaborado por la Misión para la Transformación del Campo Colombiano, coordinada por el DNP, señala que las principales problemáticas son el bajo rendimiento y los altos costos de producción, la escasez de bienes y servicios para el desarrollo del sector, las limitaciones en la comercialización y acceso a mercados y la falta de financiación. Además "la población rural sigue siendo más pobre que la urbana y tiene menos acceso a los servicios del Estado", y plantea que el campo en Colombia se caracteriza por una población que está envejeciendo y tiene una alta dependencia económica (DNP, 2014).

La seguridad alimentaria se basa en tres pilares, primero disponibilidad de los alimentos, segundo acceso a estos y tercero sustentabilidad de los mismos, teniendo en cuenta estos aspectos se puede resumir la importancia de inferir desde un aspecto de desarrollo investigativo, la posibilidad de poder generar un método de control medio ambiental, que aporte una mayor eficiencia al momento de iniciar un proyecto productivo y potencializar de tal forma que sea sustentable en el tiempo, asequible a las personas y además de ser un producto libre de trazas perjudiciales para el consumidor final, por su tratamiento orgánico desde el inicio del ciclo.

El cambio climático es un factor que influye directamente en la disponibilidad de los alimentos e incremento de los precios convirtiéndose en un limitante importante en especial por situaciones extremas por ejemplo sequías, heladas, inundaciones, etc.

Dada la problemática del sector, se crea la necesidad de incentivar una opción de trabajo con énfasis en una agricultura de precisión, sostenibilidad y seguridad alimentaria incentivando una producción controlada bajo invernadero.

1.2 Cambio climático.

El cambio climático en la actualidad es un problema real que viene afectando a la humanidad desde hace varios años; fue necesario que se activaran las alarmas observando los cambios bruscos que estaban ocurriendo en el planeta, según la estación meteorológica mundial 15 de los 16 años más calurosos se presentaron en este siglo, siguiendo con la tendencia de un aumento de temperatura desde el inicio de la era industrial. La vida humana, vegetal y animal se ven influenciados directamente por estos factores tanto a nivel de desarrollo demográfico, problemas de inseguridad alimentaria y sobre la salud misma. La definición exacta para este problema, según la Convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático la define como “Un cambio del clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempos comparables”.

Es un problema que afecta a todos, tanto a países desarrollados como a países en vía de desarrollo, y la preocupación aumenta ya que cada vez se intensifican los fenómenos medioambientales al pasar del tiempo, la creación de entes gubernamentales como el panel intergubernamental de expertos de las naciones unidas sobre el cambio climático (IPCC), son necesarios para llevar un control de datos, de cómo está avanzando la problemática y las posibles soluciones y metas para poder contener y disminuir los factores negativos que amplifican el problema.

El incremento de la temperatura media a nivel global, generada por la acumulación de gases de efecto invernadero (GEI), es uno de los primeros temas tratados alrededor de esta problemática, cuyos factores causales incluyen el humano, donde día a día se observa mayor cantidad de bosques talados, el uso indiscriminado de combustibles fósiles no renovables como el petróleo y carbón generando aumento de dióxido de carbono y metano en el ambiente.

Efectos visibles como el deshielo, que aproximadamente se ha perdido las tres cuartas partes en los últimos treinta años, es un problema que desencadena una serie acciones donde los rayos del sol ya no se reflejan en el hielo y penetran directamente sobre el agua generando mayor evaporación, dando como resultado una mayor precipitación, un ejemplo claro en donde un problema que se tiene conocimiento años atrás genera una problemática que afecta varios tipos de ecosistemas generando desequilibrios irreparables.

En Colombia el cambio climático está afectando de la misma forma que al resto del planeta, donde es el ente encargado del registro de datos medioambientales el Instituto de Hidrología, Meteorología y estudios ambientales (IDEAM), afirma que los glaciares en el país disminuyen su grosor al paso de los años, los niveles de agua en las costas han aumentado y la temperatura media viene en aumento desde décadas atrás.

Colombia un país favorecido por sus costas y océanos, teniendo un alto grado de riesgo por el aumento del nivel del mar que podría afectar la población civil y al sector agropecuario que habita en la zona costera por riesgos de inundaciones u otros factores. El recurso hídrico en el país se verá afectado drásticamente con el cambio climático, en zonas donde el nivel de pluviosidad es alto, se corre el riesgo que se presenten con mayor frecuencia catástrofes medioambientales como desbordamiento de ríos, deslizamientos de montañas, inundaciones y en zonas cálidas desabastecimiento del recurso por largas sequías. La salud humana en Colombia según estudios realizados por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y el IDEAM aseguran que el cambio climático interviene directamente con

el desarrollo de algunas patologías en donde el ambiente se establece propicio para el desarrollo de algunas enfermedades.

En lo referente al tema de productividad agropecuaria, en el ámbito pecuario la ganadería toma un papel muy importante como antagonista medioambiental ya que Colombia se encuentra entre los tres países latinoamericanos con mayor aporte de gas metano proveniente de la ganadería , situación preocupante ya que estas cifras tienden a aumentar gracias a la ampliación de la frontera agrícola, traducida en el incremento de la deforestación para la explotación ganadera y agrícola; el cambio climático ha generado grandes problemáticas impactando negativamente variedad de cultivos, producciones pecuarias entre otros.

La cultura del agricultor colombiano en su saber ancestral se ha visto modificada por los cambios bruscos de climas, en donde en meses que históricamente las lluvias llegaban los campesinos alistaban las tierras y semillas para la siembra, este fenómeno altera completamente y en estos meses de lluvia se están prestando sequías prolongadas, heladas, fuertes vientos, altas temperaturas, etc. Nuevas técnicas aplicadas a una agricultura de precisión, son las nuevas opciones para la producción agropecuaria en donde los cultivos se desarrollen bajo un ambiente controlado, haciendo un mayor aprovechamiento de los recursos del planeta, agua, luz, suelo y de esta forma contrarrestar de forma efectiva estos cambios súbitos que genera el efecto invernadero. Propuestas que ayuden a mitigar el cambio climático como el mecanismo de desarrollo limpio (MDL) cuyo objetivo implementar tecnologías de producción amigable con el medio ambiente como la implementación de cultivos bajo invernaderos y libres de agroquímicos, programas de reforestación en zonas de ganaderías extensivas o en zonas extensivas de monocultivos, son algunos ejemplos de cómo las organizaciones que encabezan y están en total compromiso con este fenómeno buscan las mejores opciones para poder mitigar, contener y adaptarse al cambio climático buscando una colaboración mutua entre empresas y gobiernos y que este no se convierta en un problema mayor para las siguientes generaciones.

1.3 El cultivo de lechuga

En Colombia, el tema de seguridad alimentaria tiene como una de sus definiciones, obtener un fácil acceso en cantidad, calidad y disponibilidad de alimentos en donde estos no afecten la salud de los consumidores, que se traduce en la inocuidad del producto final, el cual empieza desde la finca donde se realiza el manejo del cultivo, aplicación de enmiendas, fertilización y control fitosanitario para posteriormente ser recolectado, almacenado y distribuido. Productos vegetales dentro de la dieta de los consumidores juegan un papel importante dentro de la nutrición. Productos como la lechuga hoy en día han tenido un crecimiento importante, desde el año 2007 donde el área sembrada era de 2.273(ha) y cosechada de 1.601(ha) al 2016 donde se sembraron 4.469 (ha) y cosechada 4.154 (ha) con una producción aproximada para el último reporte de 87.140 (ton) (minagricultura). La lechuga posee usos culinarios como consumo en ensaladas y acompañaste fresco de otros platos proporcionando alto contenido vitamínicos, además posee diversos usos medicinales como tratamientos para el insomnio (por su efecto sedativo), enfermedades cutáneas, obesidad, cálculos renales y enfermedades del aparato respiratorio, actúa como analgésico entre otros, e industriales para la elaboración de conservas y cremas cosméticas. Por tal motivo la implementación de buenas prácticas agrícolas, la no aplicación de pesticidas, un manejo eficiente de los recursos medioambientales (ambiente controlado), manejo de cultivos bajo cubiertas optimiza al máximo la productividad, al evitar factores externos que pueden alterar el desarrollo fisiológico normal de las plantas, llevando a este cultivo a generar una mayor demanda de la que hoy existe potencializando aún más y generando mayor rentabilidad al productor y seguridad al consumidor.

1.3.1 Conceptualización de la Lechuga

La lechuga es una planta herbácea anual, dicotiledónea, autógama, perteneciente a la familia Compositae, cuyo nombre botánico es *Lactuca sativa* (Osorio & Lobo, 1983; Díaz *et al.*, 1995; Valadez, 1997). Hay tres familias de lechugas con diferentes tipos enumeradas en la tabla 1.

Tabla 1. Tipos de lechuga.

Familias	Tipos
Lechugas de cabeza, arrepollada o Crisp Head (<i>L. sativa</i> var. <i>capitata</i> (L.)).	Icevic, Coolguard, Arizona, Grandes Lagos 118, Winter Haven, Luana, Salinas 88 Supreme, Alpha, Badger, Lechugas mantequilla o Butter Head
Lechugas cos o romanas. <i>Lactuca sativa</i> var. <i>Longifolia</i>	Parris island cos, Green Forest, Mirella, Cogollos de Tudela Rose Gem, Cogollos de Tudela verde,
Lechugas sin cabeza, de hojas sueltas (<i>L. Sativa</i> var. <i>Intybacea</i> (Hort))	Red salad bowl improved, Verde Crespa Casabella, Verónica, Bérghamo, Vera, Vanda, Grega, Lollo Rosa, Veneza Roxa, Sanguine, Falbala,

El cultivo se va a realizar con el tipo de lechuga crespa (Veronica) verde claro, planta de porte grande, vigorosa, de alta uniformidad y rendimiento. Se cosecha a los 56 días después de trasplante.

1.3.2 Parámetros para el desarrollo fisiológico del cultivo de lechuga.

Todos los cultivos requieren de ciertas condiciones específicas para alcanzar el mejor rendimiento, dichas condiciones dependen del tipo de cultivo, calidad de semilla, en donde sobresale la semilla certificada, libres de patógenos y con altos porcentajes de pureza y germinación. En la tabla 2 se encuentran los parámetros óptimos para el desarrollo fisiológico del cultivo de lechuga.

Tabla 2. Características de cultivo de lechuga.

Nombre	Características
<i>Suelos</i>	<i>Arenosos – limosos</i>
<i>Temperatura</i>	<i>18 – 20 °C</i>
<i>Humedad relativa</i>	<i>60 – 80 %</i>

2. INVERNADEROS

Un invernadero es una estructura liviana y cerrada, cubierta con materiales transparentes (generalmente polietilenos), con la capacidad de alterar las condiciones naturales ambientales que cubren el cultivo, para asegurar un óptimo desarrollo, la máxima productividad y el aislamiento de plagas y enfermedades. Los invernaderos pueden ser clasificados por el tipo de control que ejercen sobre las variables meteorológicas en automatizados, semiautomatizados y no automatizados; Los automatizados son aquellos que realizan un amplio control de las variables climáticas, los semiautomatizados brindan una limitada intervención en el control del microclima y los no automatizados se exponen directamente a los factores físicos de la naturaleza.

2.1 VARIABLES CLIMÁTICAS

2.1.1 Temperatura

Es el parámetro más importante a considerar en un invernadero, influye en el crecimiento, el desarrollo vegetal, el control morfológico y la actividad metabólica de la planta. Para garantizar el desarrollo idóneo de cada cultivo, es necesario conocer su temperatura biológica máxima y mínima y la temperatura óptima de desarrollo. Las temperaturas biológicas máxima y mínima establecen un rango en el cual la planta puede sobrevivir; fuera de estos límites morirá rápidamente a causa de una destrucción celular. En el caso de que la temperatura sea inferior a la mínima o de deshidratación en el caso de sobrepasar la temperatura máxima establecida. La temperatura ideal es aquella en la que la planta va a tener un desarrollo fisiológico óptimo y varía con la edad del cultivo.

2.1.2 Humedad relativa

Se refiere al porcentaje de vapor de agua contenido en el aire a una temperatura dada. Sirve como indicador de evaporación, transpiración y probabilidad de lluvia convectiva. Al igual que la temperatura, es muy importante que permanezca de un rango específico de acuerdo al cultivo, ya que, al no estar dentro de los límites adecuados, surgen problemas de desarrollo fisiológico y se aumenta la proliferación de enfermedades.

2.1.3 Radiación solar

Altera directamente el microclima dentro del invernadero debido a procesos de transferencia de calor por convección y conducción. Es muy importante para el desarrollo fotosintético y el metabolismo en la planta e incide principalmente en el rendimiento de los cultivos.

2.1.4 Ventilación

La ventilación es un aspecto de mucha importancia en los invernaderos y su función principal es la de regular la temperatura y la humedad relativa dentro de la estructura. Existen dos tipos: natural donde se hace uso de aperturas estratégicamente ubicadas, y forzada, donde se hace uso de ventiladores y extractores de aire. Con un diseño adecuado del sistema de ventilación se logra que al presentarse excesos de temperatura y/o humedad, estos sigan su curso de forma lenta y controlada, evitando la condensación dentro del invernadero y variaciones indeseadas de temperatura.

2.1.5 Humedad del suelo

Es la cantidad de agua por volumen de tierra de un terreno y es esencial para cualquier tipo de manejo que se le quiera dar a un cultivo, ya sea intensivo, extensivo, o huerto ecológico. La humedad del suelo juega un papel muy

importante al momento del establecimiento de un cultivo, ya que se necesita que el agua esté disponible y constante el mayor tiempo posible en el suelo y no se drene de forma rápida como ocurre en el caso de suelos arenosos; sin embargo, un exceso de humedad predispone al cultivo a la aparición de enfermedades y plaga.

2.1.6 Concentración de CO₂

El dióxido de carbono es uno de los gases más abundantes que se encuentra en el medio ambiente y cumple parte fundamental en el ciclo de plantas y animales. En la agricultura cumple el papel esencial en la fotosíntesis. El ritmo relativo de la fotosíntesis es directamente proporcional a la concentración del CO₂, por lo tanto, si este gas se encuentra en una proporción óptima, se verá reflejado en una buena condición fisiológica de las plantas.

2.2 Tipos de invernaderos

En general la construcción de un invernadero va a depender de diferentes factores en donde los principales se encuentran tipo de cultivo a establecer y características agroclimáticas de la zona. Una vez identificado los factores determinantes de cada región se procede a realizar el diseño estructural teniendo en cuenta número de plantas a establecer, altura, tipo de ventilación, etc. Para cubrir este tipo de necesidades existen diferentes tipos de diseños.

2.2.1 Invernadero tipo capilla

El invernadero tipo capilla posee un techo que puede variar según el desagüe que se desee implementar, ya sea de doble o simple. La ventilación de igual forma dependerá de las condiciones de la zona, podrán estar ubicadas en los laterales o en la parte frontal de la estructura, además de las ventanas cenitales la cual es una buena opción para mejorar la aireación de la estructura en caso de ser necesaria (véase Figura 1.a).

2.2.2 Invernadero diente de sierra

Es la variación del diseño en capilla, cuentan con un techo unido por varias naves dando a esta estructura una excelente ventilación. El nombre de diente de sierra proviene de la forma en que las naves están unidas de forma lateral (véase Figura 1.b).

2.2.3 Invernadero asimétrico

Este tipo de invernadero tiene como objetivo adicional captar la mayor cantidad de radiación solar ubicado de tal forma que una de sus caras que expuesta de forma paralela a la salida del sol, una de las desventajas de la estructura es la inestabilidad de esta frente a los fuertes vientos (véase Figura 1.c).

2.2.4 Invernadero de doble capilla

Este tipo de capilla está formado por dos o más naves, cuyo techo está ubicado de forma yuxtapuesta. Este invernadero facilita la ventilación gracias a sus ventanas cenitales ubicadas en la yuxtaposición de las naves, que generalmente se encuentran abiertas, facilitando la circulación del aire. La implementación de malla mosquitera es importante para evitar entrada de vectores que transmiten patologías al cultivo (véase Figura 1.d).

2.2.5 Invernaderos góticos.

El invernadero tipo gótico, gracias a su diseño en la parte superior, permite una mayor entrada de aire y a su vez un mayor almacenamiento. Es una estructura que tiene varios beneficios, por ejemplo, un mayor aprovechamiento de la luminosidad, radiación solar y flujo de aire constante ya que consta de ventanas laterales que permiten un mayor control de la humedad en su interior (véase Figura 1.e).

2.2.6 Invernadero tipo túnel

El invernadero tipo túnel o semicilíndrico actualmente está tomado mucho auge, gracias a sus diferentes bondades tanto en fabricación y funcionalidad, su estructura facilita el movimiento del agua sobre ella, y la ventilación no choca de forma abrupta sobre la construcción; además de tener ventanas laterales, frontales y cenitales, facilita

la circulación del aire de adentro hacia afuera de la estructura cuando se necesite, adicionalmente permite una buena luminosidad (véase Figura 1.f).



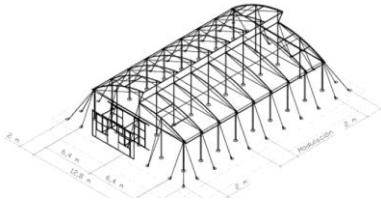



<p>A: <i>Invernadero tipo capilla</i></p>	<p>B: <i>Invernadero diente de sierra.</i></p>	<p>C: <i>Asimétrico.</i></p>
		
<p>D: <i>Invernadero de doble capilla.</i></p>	<p>E: <i>Invernadero gótico.</i></p>	<p>F: <i>Invernadero tipo túnel</i></p>
		

Figura 1. Tipos de invernaderos. Fuente: (<https://agroinvernaderos.webnode.es>, 2012)

3. SISTEMA IMPLEMENTADO

3.1 Requerimientos.

Los invernaderos, como cualquier tipo de construcción, requieren de factores claves para su implementación, los cuales pueden definirse como los aspectos que son indispensables para brindar el impacto que finalmente se desea dar con el proyecto.

Los factores más importantes a considerar para este proyecto se basan en la determinación de las variables climáticas que más incidencia tienen en cualquier tipo de cultivo y más específicamente en el cultivo de lechuga. También en la determinación del software, la estructura y la instrumentación necesaria según el caso en cuestión.

3.1.1 Variables termodinámicas a controlar

Dentro de las variables termodinámicas que inciden en el desarrollo del cultivo de lechuga se encuentran la temperatura, la humedad relativa, la humedad de suelo, la radiación solar, la concentración de CO₂ y la cantidad de luz.

Como se mencionó en el capítulo 2, la temperatura influye en el crecimiento, el desarrollo vegetal, el control morfológico y la actividad metabólica de la planta, así como también influye directamente con la percepción que tiene el cultivo respecto a las otras variables climáticas, es decir que fuera de los rangos de temperatura vitales, el cultivo puede producir detección errónea sobre las otras variables o no asimilar de forma correcta los aportes que estas brindan a la planta. La temperatura no solo es las variables más importantes para el cultivo, también se puede modificar a través dispositivos actuadores, que a diferencia de los equipos para concentración de CO₂, son más económicos y de mayor acceso.

Por otra parte, se debe asegurar que los cultivos puedan absorber los nutrientes del suelo necesarios para su adecuado desarrollo y para ello es importante realizar un

control de humedad de suelo que permita que esto ocurra. Las anteriores razones permiten establecer la temperatura y la humedad de suelo como variables de control.

3.2 IMPLEMENTACIÓN.

3.2.1 Estructura del invernadero

En países tropicales como Colombia, los invernaderos son usados para aislar el cultivo de fuertes lluvias o ventiscas, incidencia de plagas y enfermedades y de la excesiva radiación solar. Es por eso que, para la elección del modelo del invernadero, la forma y los materiales apropiados se debe tener en cuenta que estos sean funcionales y de fácil operación, permitan la siembra de otras especies, proporcione las condiciones adecuadas para el desarrollo del cultivo y resistan las condiciones climáticas externas al invernadero. Los principales parámetros a considerar a la hora de realizar el diseño de un invernadero son: el tipo de invernadero que se desea implementar, la orientación que debe tener, el tamaño y los materiales de fabricación.

3.2.1.1 Tipo de invernadero

Existe una gran variedad de tipo de estructuras para la fabricación de invernaderos, sin embargo, se ha elegido el invernadero tipo Túnel o Semicilíndrico por su capacidad para el control de los efectos climáticos, ya que su forma curva y su estructura metálica brindan la estabilidad necesaria para soportar fuertes ventiscas, permite la instalación de ventanas cenitales que se pueden mecanizar fácilmente, además de que su techo arqueado posibilita una distribución homogénea de la luz y evita la acumulación de aguas residuales.

3.2.1.2 Orientación

Normalmente los invernaderos se ubican de norte a sur para facilitar la absorción de la luz y que esta se disperse de forma más uniforme. Sin embargo, la dirección y la intensidad del viento y la topografía del terreno se deben tener en cuenta.

En este caso en especial se pudo ubicar el invernadero con dirección norte-sur puesto que las corrientes de aire están dirigidas de igual manera, la topografía del terreno es estable y la absorción de la luz se da de forma más homogénea.

3.2.1.3 Dimensiones del invernadero

Las dimensiones del invernadero no se pueden escoger arbitrariamente, de la correcta elección de estas depende la estabilidad física de la estructura y la estabilidad termodinámica del sistema. En la literatura se encontró que el parámetro más relevante que se debe tener en cuenta es conservar una relación de equivalencia de 3:1 entre el volumen interior y el área de la base del invernadero respectivamente, es decir que se debe obtener 3 m³ por cada 1 m². También hay unas relaciones importantes como lo son el ancho, el largo, el radio del arco del techo, el alto y el tamaño de las ventanas laterales, a continuación, se describirán los criterios de selección del tamaño y las medidas implementadas para el invernadero.

3.2.1.3.1 Ancho del invernadero

En la literatura se encontró que el ancho del invernadero debe ser múltiplo de 2,5 o 3 metros, sin exceder los 9 metros en total. Teniendo en cuenta el anterior requisito y el tamaño disponible para la construcción del invernadero, se decidió asignarle 2,5 metros de ancho a la construcción.

3.2.1.3.2 Largo del invernadero

El criterio más relevante corresponde a no sobrepasar los 30 metros de largo, lo que deja una amplia lista de posibilidades para este parámetro, no obstante, se encontró una gran cantidad de invernaderos con estructuras tipo Túnel que tenían soportes estructurales ubicados cada 3 metros de largo, por consiguiente, se determinó esta longitud para la implementación del invernadero.

3.2.1.3.3 Altura del invernadero

La altura es el criterio más importante a considerar en el diseño de un invernadero, ya que la estabilidad termodinámica y la inercia del sistema dependen de este. Las estructuras con techos altos poseen una mayor inercia, lo que produce que sean menos afectados por perturbaciones del exterior y que los cambios en el interior se den de forma lenta y estable. La altura recomendada para invernaderos es de 2 a 2.5 metros en los laterales y de 3 a 4 metros en el centro.

Los valores de altura del invernadero se obtuvieron a través del uso del programa Solid Edge, en el cual se simuló diferentes alturas para los laterales y para la zona central, en las que se tuvo en consideración los parámetros recomendados y principalmente la equivalencia entre el volumen del invernadero y el área de su base. Finalmente, la altura elegida para los laterales fue de 2,42 metros y la de la zona central fue de 3 metros (Fig. 2).

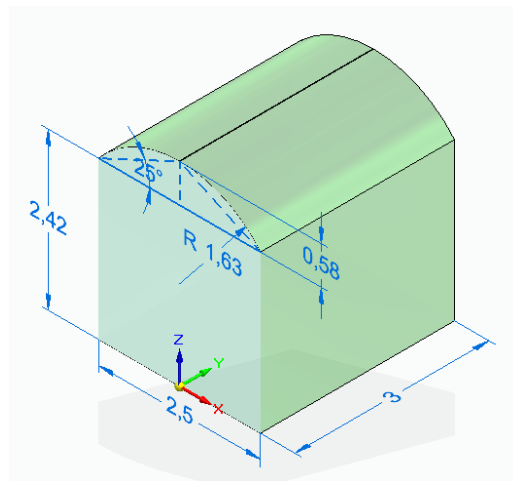


Figura 2. Tamaño del Invernadero (Solid Edge).

3.2.1.3.4 Tamaño de las ventanas laterales del invernadero

Según la literatura, para garantizar la tasa correcta de renovaciones de aire en el interior del invernadero se debe proporcionar un área de ventana lateral superior al

25% del total del área de la base. Por facilidad en el diseño se decidió hacer una abertura desde la base de la cama de plantación que está instalada a 0,7 metros respecto al suelo, hasta una altura de 2 metros respecto al mismo lugar. El ancho de la ventana corresponde al largo del invernadero (3 metros). Las dimensiones de la ventana lateral se pueden apreciar mejor en la figura 3.

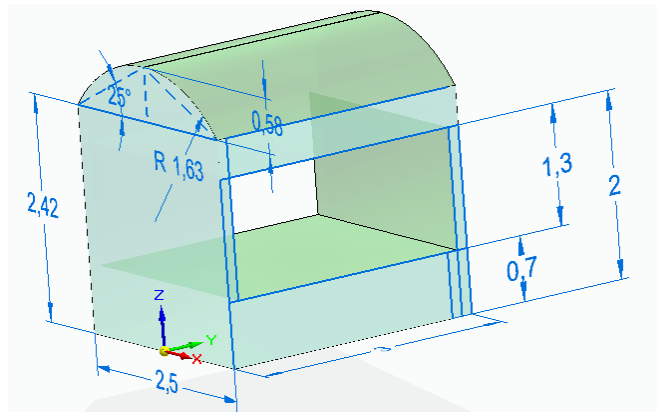


Figura 3. Tamaño de la ventana lateral (Solid Edge).

3.2.1.4 Materiales

Los materiales elegidos para la fabricación del invernadero han sido seleccionados según criterios de resistencia y durabilidad pertenecientes al caso. El invernadero ha sido dividido en 4 partes fundamentales, las cuales son: estructura metálica, superficie plástica, malla mosquitera y soporte del cultivo.

3.2.1.4.1 Estructura metálica

Es la encargada de dar el soporte estructural a todo el invernadero. Se compone de piezas metálicas, que unidas brindan la resistencia necesaria para mantener la forma, la posición y la estabilidad de toda la estructura. Fue construida con tubos y ángulos de acero galvanizado. La estructura metálica puede verse en la figura 4.



Figura 4. Estructura metálica.

3.2.1.4.2 Superficie plástica

La cubierta plástica al igual que la estructura metálica contribuye a mantener la forma y da soporte al invernadero. Su principal objetivo es brindar protección contra agentes externos, como posibles plagas y precipitaciones, ventiscas, ráfagas, en fin, cualquier clase de cambio brusco del clima.

El tipo de plástico elegido debe cumplir con propiedades ópticas que permitan una alta transmitancia del visible para optimizar la fotosíntesis y una baja transmitancia de la radiación IR larga, que permite mantener cálido el interior del invernadero. Otras propiedades físicas como peso, densidad, espesor, resistencia y envejecimiento también deben ser evaluadas; En este caso en específico se eligió el plástico de una lista de materiales que con frecuencia se usan en esta región.



Figura 5. Superficie plástica.

3.2.1.4.3 Malla mosquitera

Las mallas mosquiteras son esenciales en los invernaderos para proteger al cultivo de insectos y pequeños agentes externos, además sirven como refuerzo para la estructura en el caso de que se presenten ráfagas de viento. La malla seleccionada para el invernadero cuenta con una densidad por centímetro cuadrado de 6 hilos en una dirección y 6 hilos en otra. Fue ubicada en cada una de las ventanas que posee el invernadero.

3.2.1.4.4 Soporte del cultivo

El invernadero se edificó en una zona urbana pavimentada, lo que hizo necesario construir dos camas de cultivo flotantes que fueran lo suficientemente fuertes para soportar el peso de la tierra, por esta razón se decidió agregar ángulos de hierro galvanizado a la estructura metálica e incorporarles un tendido de madera con una cobertura de estopa para impedir que se dañase fácilmente. La estructura del soporte se muestra en la figura 6.

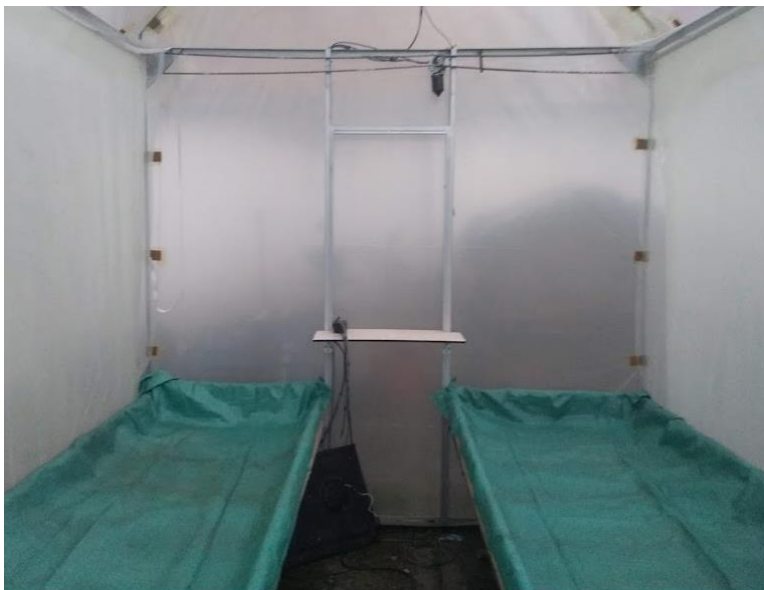





Figura 6. Soporte del cultivo.

3.2.2 Sensores

Los sensores son dispositivos capaces de convertir una señal física de un tipo en una señal de otra naturaleza (generalmente eléctrica). Existe gran variedad de sensores en el mercado con diferentes mecanismos de respuesta, entre los cuales se encuentran de tipo inductivos, capacitivos, ultrasónicos, magnéticos, fotoeléctricos, resistivos, entre otros. Además, estos pueden ser utilizados en diferentes aplicativos como detección de objetos, detección de nivel y los pequeños o grandes cambios en las variables físicas ambientales. En el caso del invernadero fueron utilizados con el objetivo de la recolección y muestreo de las variables físicas más relevantes involucradas en el desarrollo fisiológico del cultivo de lechuga. En la siguiente tabla se presentan los sensores seleccionados para el sensado, monitoreo y control de dichas variables y sus características más relevantes.

Tabla 3. Características de los sensores.

TIPO	TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA	HUMEDAD DE SUELO	EFECTO HALL

REFERENCIA	DHT22	SEN0193	SS411P
RANGO	-40-80°C 0-99.9% HR	0-100%	140G (Operate Point)
VOLTAJE DE ALIMENTACIÓN	3.3V-5.5VDC	3.3V – 5.5VDC	2.7 V - 7V DC
TASA DE MUESTREO	0,5 hz (una cada 2 s)	No aplica	No aplica
USO	Variable a Controlar	Variable a Controlar	Identificación de posición (ventana lateral)
IMAGEN			

3.2.2.1 Calibración, caracterización o verificación de sensores

La calibración es el proceso mediante el cual, bajo ciertas condiciones específicas, se puede establecer la paridad entre los valores que indica un equipo, sistema de medida o un instrumento y los valores correspondientes a una magnitud de medida o patrón. La caracterización es la respuesta que presenta un sensor a cierto estímulo, representado a través de una ecuación de transferencia, mientras que la verificación consiste en la comparación entre las medidas del instrumento y las obtenidas por medio de un equipo

calibrado. Para garantizar que los datos obtenidos mediante los sensores corresponden a valores verídicos del sistema, es conveniente realizar una adecuada adquisición de estos, para ello es preciso llevar a cabo alguno de los procesos anteriormente mencionados.




Dependiendo del tipo de sensor (sea de tipo analógico o digital) se elige el proceso por el cual se examina la respuesta del sensor a cierto estímulo físico. En el caso del dispositivo analógico (sensor de humedad de suelo) se le ha realizado una caracterización del porcentaje de humedad del suelo para la obtención de los valores más aproximados, por ser un sensor de tipo analógico se requiere una adaptación y un filtrado para eliminar el ruido eléctrico inherente en señales tipo analógicas. El sensor de temperatura, al ser de tipo digital, fue verificado con un dispositivo patrón llamado "Fluke 971" el cual se encontraba calibrado. En tanto al sensor de efecto Hall, simplemente se corroboró su funcionamiento y se estableció la distancia desde la cual el campo magnético del imán a utilizarse hacía efecto en dicho sensor.

3.2.2.1.1 Sensor de humedad de suelo

La caracterización del sensor se realizó a través del diseño de dos métodos, con los cuales se pudo establecer la relación que existe entre la respuesta del sensor y el nivel de humedad del suelo. Dichos métodos se describirán a continuación:

Tabla 4. Método 1 para caracterización de sensores de humedad de suelo.

Método 1		
Paso	Descripción	Imagen

<p>1</p>	<p>Calentar una muestra de 1000 gramos de tierra aproximada, hasta extraerle el agua totalmente.</p>	 A white ceramic pot filled with a grey, powdery soil sample is placed on a black gas stove burner. The stove is set on a dark surface, and the brand name 'abba' is visible on the white control panel above the burner.
<p>2</p>	<p>Sacar muestras de tierra en recipientes separados, no menores a 8 cm de alto, con 100 gr tierra en cada una.</p>	 A laboratory setup on a white table. A blue digital scale is in the center, with a blue bowl on its weighing pan. To the left, several green plastic cups are arranged. A white syringe is also visible on the table.
<p>3</p>	<p>Introducir el sensor en la muestra con tierra y tomar el dato de respuesta a esta (respuesta a humedad de suelo con 0% de agua)</p>	 A sensor with two red LEDs is connected to a laptop. The sensor is placed in a green cup containing soil. The laptop screen is open, and the sensor's lights are illuminated.



<p>4</p>	<p>Agregar 5ml de agua a la muestra y tomar el dato de respuesta del sensor</p>	
<p>5</p>	<p>Repetir el paso anterior hasta que el sensor se sature. (El sustrato alcance su capacidad de campo)</p>	
<p>6</p>	<p>Graficar los datos del porcentaje de agua en la tierra vs la respuesta del sensor a la misma.</p>	
<p>7</p>	<p>Extraer función de transferencia</p>	

Tabla 5. Método 2 para caracterización de sensores de humedad de suelo.

Método 2	
Paso	Descripción
1	Registrar la respuesta cuando el sensor se exponga al aire (humedad de suelo 0%)
2	Llenar un vaso con agua a una altura máxima de 7 cm e introducir el sensor. Registrar el dato de la respuesta (humedad 100%)
3	<p>Los números encontrados en los pasos anteriores corresponden a los los valores máximo y mínimo respectivamente. Se deberá encontrar las diferencia entre dichos valores, la cual corresponde al rango de trabajo del sensor. Ejemplificados en la siguiente ecuación :</p> <ul style="list-style-type: none"> - $VM = Humedad\ 100\%$ - $Vm = Humedad\ 0\%$ $R = VM - Vm$
4	<p>Determinar tres niveles de humedad: Seco, húmedo y mojado. Para esto se debe dividir el rango R entre 3</p> <ul style="list-style-type: none"> - $SECO \leq Vm + R/3$ - $Vm + R/3 < HÚMEDO < VM + R/3$ - $MOJADO \geq VM + R/3$

3.2.2.1.2 Sensor de temperatura y humedad

Para la verificación del sensor de temperatura se realizó el diseño de un sistema compuesto por una estufa controlada mediante un dispositivo dimmer, un soporte metálico fijo, el instrumento patrón Fluke 971 y el sensor de temperatura y humedad DTH22.

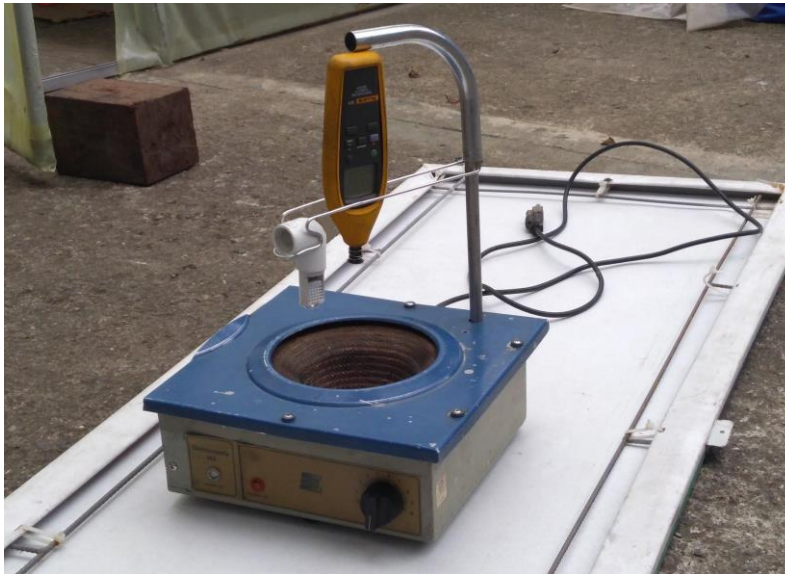


Figura 7. Estructura de verificación del sensor temperatura y humedad.

El método consistió en colocar el instrumento patrón y el sensor a la misma altura por medio del soporte metálico y hacer pequeñas variaciones de la temperatura, dejando un tiempo de estabilización entre tramos.

Durante las pruebas se pudo observar que el instrumento patrón presentaba una respuesta que ante los ojos humanos parecía inmediata, mientras que el sensor tardaba solo un poco más, ya que hacía una transición entre grado y grado hasta por fin llegar a la temperatura final, la misma obtenida con el instrumento patrón. Esto lejos de ser un problema es una ventaja, ya que permite que no se detecten cambios bruscos en el sistema y en el controlador, así que alarga la vida útil de los dispositivos actuadores implementados en el sistema de control.

3.2.2.2 Posición de los sensores

Los sensores son un elemento fundamental en los sistemas de lazo cerrado, pues brindan la información necesaria al controlador para que este pueda mantener las condiciones adecuadas del cultivo (en el caso del invernadero), es por eso que requieren de ciertas condiciones mínimas de operación, entre las cuales una apropiada posición dentro del sistema. La posición de los sensores se debe elegir garantizando que el sensor o grupo de sensores de cada tipo de variable suministre toda la información relevante dentro del sistema.

3.2.2.2.1 Posición de sensores de temperatura

La temperatura, al ser la variable física más relevante del proceso y la principal a controlar, requiere un mecanismo metódico a la hora de posicionar los dispositivos sensóricos. Para ello se eligió la altura en primera medida, teniendo en cuenta la elevación y el espesor de las camas de siembra, la longitud máxima que puede alcanzar una planta de lechuga y la posición del sistema de riego. Es importante ubicar el sensor lo más cerca posible al cultivo, sin arriesgar la integridad del mismo. Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado, el sensor quedó posicionado a una altura de 1,1m respecto al suelo, como se ilustra en la figura 8.



Figura 8. Soporte de sensor de temperatura y humedad.

En segunda instancia se ha trazado un plano horizontal imaginario a través del invernadero, en el que se ha dibujado dos rectángulos que simbolizan las camas de siembra, los cuales se han denotado para medidas prácticas con las letras A y B. En el interior de los rectángulos, una serie de puntos se han graficado y marcado con la letra y número perteneciente al rectángulo y la posición representativa de cada uno. Lo anteriormente mencionado es ilustrado con más claridad en la figura 9.

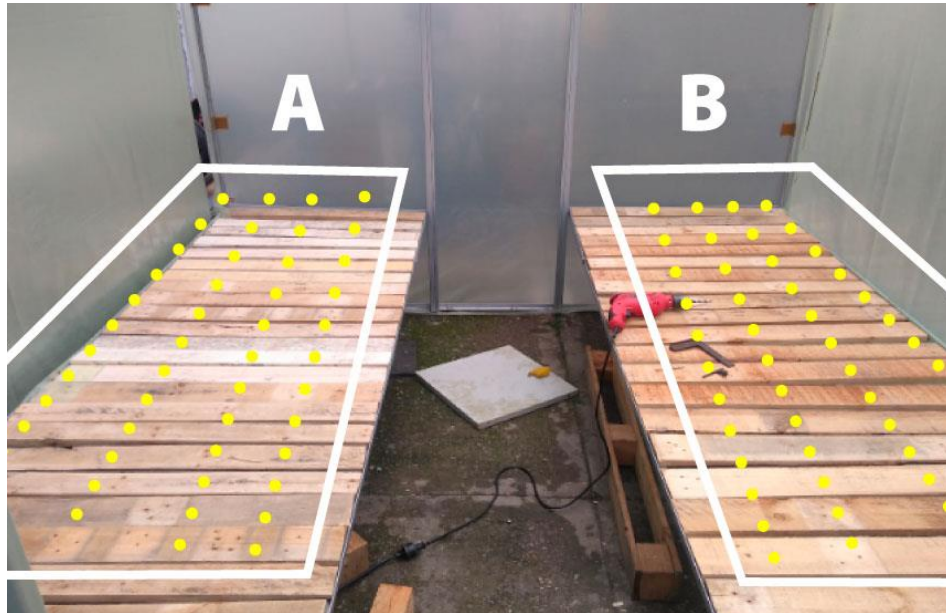


Figura 9. Posibles posiciones de sensor de Temperatura.

Después de haber elegido las posibles posiciones del sensor, se procedió a tomar datos simultáneos de la temperatura en el interior (en cada uno de los puntos) y en el exterior del invernadero, a diferentes horas y en diferentes días. Para garantizar que la altura a la cual se hizo la medición fuera siempre la misma se realizó un montaje móvil que se colocó en cada punto a considerar, el cual logró que los sensores se mantuvieran en una posición estable y con una altura invariable. Como se puede observar en la Figura 10.



Figura 10. Montaje móvil de medición de temperatura.

Los datos recolectados el día con la temperatura ambiente más alta, entre el horario de 10:00am a 4:00pm presentaron cambios más significativos entre punto y punto, es por esto que se eligieron para evaluar la diferencia entre la temperatura interior y la exterior y así determinar cuál de todos los puntos se considera más estable y representa mejor la temperatura interior global del invernadero.

3.2.2.2.2 Posición de los sensores de humedad de suelo

Los sensores de humedad de suelo, a diferencia de los sensores de temperatura, fueron posicionados después de haberse incorporado la tierra e instalado el sistema de riego (sistema por microaspersión). Una vez instalado dicho sistema se procedió a evaluar los puntos donde había más y menos incidencia de agua. Cabe aclarar que dicha diferencia se trató de hacer lo más pequeña posible y así proporcionar un riego lo más homogéneo factible para este sistema. En base a lo anteriormente mencionado se eligió colocar un sensor en el lugar con máxima incidencia de agua y el otro donde menos incidencia había, pero estando dentro del rango de crecimiento de la planta más cercana.

3.2.3 Actuadores

Los dispositivos actuadores son instrumentos mecánicos encargados de actuar o realizar las acciones necesarias para cambiar las condiciones físicas dentro de un sistema. Dependiendo de la naturaleza de la fuerza que acciona el actuador se pueden clasificar en neumáticos, eléctricos, mecánicos o hidráulicos. En este caso en cuestión, se desea acondicionar el espacio interior del invernadero de manera favorable para el desarrollo fisiológico del cultivo de lechuga. Sin embargo, algunos de los sistemas actuadores implementados en este proyecto han sido diseñados y/o adecuados para este invernadero en específico, es decir, no poseen instrucciones o funciones de transferencia predeterminadas que faciliten su implementación, así que se ha realizado una adaptación en los sistemas de ventilación natural (ventanas laterales y ventana cenital), sistema de calefacción y sistema de microaspersión. A continuación, se describe la función, el tipo y las características de cada uno de los actuadores implementados.

3.2.3.1 Ventanas Laterales

Estos elementos son muy importantes para proporcionar una eficiente tasa de renovación del aire, despojar la humedad interior acumulada y suministrar una adecuada ventilación natural dentro del invernadero. Las ventanas laterales de este sistema fueron ubicadas desde una altura de 70 cm hasta una altura de 270 cm respecto al suelo, permitiendo que el aire fresco (más denso) circule desde la parte inferior hacia la superior (ventana cenital) a medida que se calentaba.

El mecanismo implementado para desplazar las ventanas laterales en relación al requerimiento del cultivo consta de tres partes, la detección de la posición actual de la ventana, el sistema mecánico que permite su desplazamiento y el motor eléctrico que brinda la energía para que se desplace.

3.2.3.1.1 Sistema de posicionamiento de ventana

La detección de la posición de la ventana se logró por medio de la implementación de 6 sensores de efecto Hall ubicados a lo largo de una de las cuatro varillas verticales que soportan la estructura y un imán localizado en la barra de contrapeso de la ventana que queda perpendicular a la varilla y a los sensores anteriormente mencionados. El montaje se puede apreciar en la figura 11.



Figura 11. Posición de sensores de efecto Hall.

La respuesta suministrada por los sensores de efecto hall hacia el campo magnético del imán en la barra de la ventana, es leída por el Arduino Mega y traducida en una posición que depende de exactamente cuál de dichos sensores esté detectando el campo magnético. El algoritmo de respuesta al estímulo obtenido por los sensores de efecto Hall se puede ver en la Figura 12.

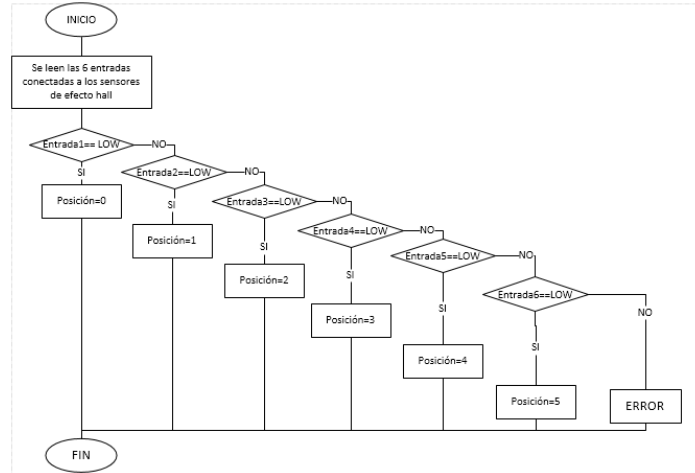


Figura 12. Algoritmo de posición.

3.2.3.1.2 Sistema mecánico de la ventana lateral

El mecanismo implementado para desplazar las ventanas laterales de un punto a otro fue realizado con un sistema de transmisión por cadena, el cual consta de dos ejes dentados unidos por medio de un miembro deformable (cadena) que permiten la transmisión de potencia entre ejes a una distancia considerable. En el caso en cuestión se hizo la adaptación de los engranajes en cada una de las barras de donde se despliega el plástico de la ventana (figura 13) y en la salida del motor eléctrico se adaptó dos ejes dentados (uno por cada ventana a desplazar (figura 14)), ambos unidos por una cadena dentada de rodillos. Por motivos de estabilidad de la posición del motor, este se ubicó 10 cm a la derecha del centro del invernadero, posición que no afectó el desplazamiento de las ventanas.



Figura 13. Engranajes ventana lateral.

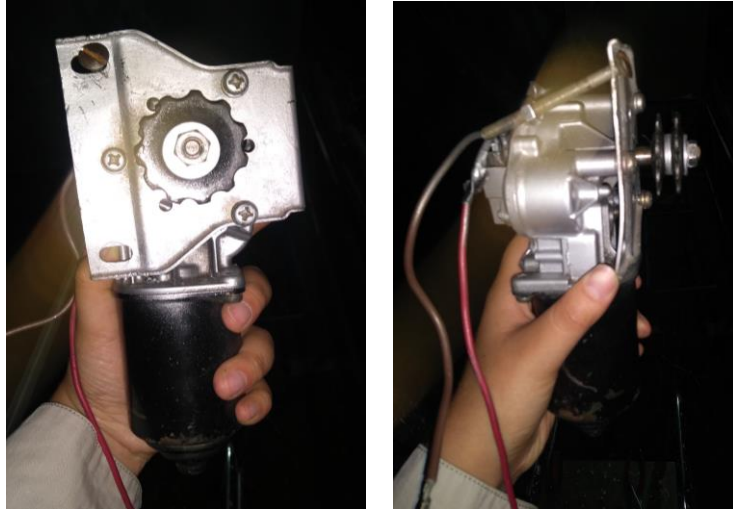


Figura 14. Motor ventana lateral.

3.2.3.1.3 Motor Eléctrico

El motor eléctrico seleccionado para generar la energía que permite desplazar las ventanas debe cumplir con ciertas características específicas como poseer una alta razón de torque para soportar el peso y una baja inercia que impide que el motor se demore en detenerse y pueda sobrepasar los límites del alcance del sensor de efecto Hall. Es por esto que se utilizó un motor de escobilla de corriente continua de 12v y 24W accionado por el Arduino Mega 2560 a través de una conexión con dispositivos relé, que permiten controlar la dirección de giro del mismo. El diagrama del circuito llevado a cabo se puede ver en la figura 15.

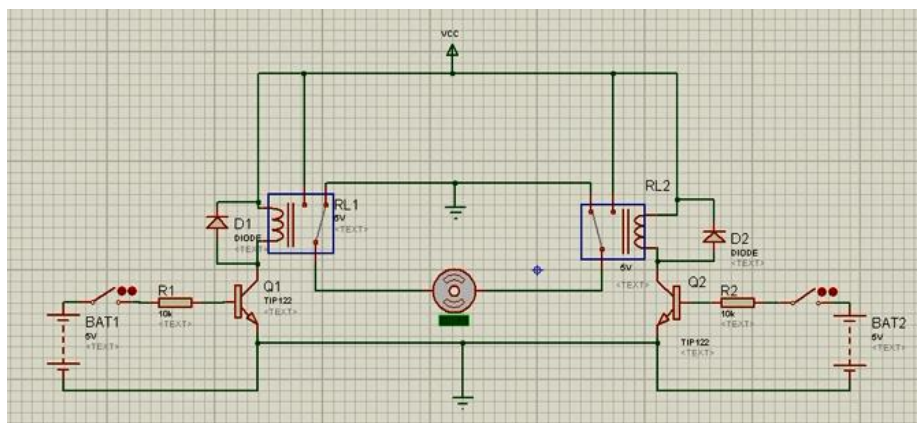


Figura 15. Diagrama del circuito para el motor de ventana lateral.

El montaje comprendido por las etapas de detección de posición, sistema mecánico y motor eléctrico anteriormente descritas, constituyen al mecanismo completo de las ventanas laterales y puede verse en su totalidad en la figura 16.



Figura 16. Ubicación motora de ventana lateral.

3.2.3.2 Ventana Cenital

Cumple la función de desplazar el aire caliente acumulado en el interior del invernadero, proveniente del aumento paulatino de la temperatura interna a causa del efecto invernadero o del incremento drástico de la temperatura externa o ambiente. El montaje elaborado para la construcción de la ventana consta de dos partes; sistema de posicionamiento y sistema mecánico y eléctrico.

3.2.3.2.1 Sistema de posicionamiento

Este sistema es muy sencillo, consta de un potenciómetro fijado al eje de rotación de la ventana, el cual gira cuando la ventana lo hace. Fue caracterizado para establecer su salida en términos de la posición o ángulo de apertura de la ventana.

3.2.3.2.2 Sistema mecánico y eléctrico

Hay una cantidad considerable de motores eléctricos con los que se podría hacer un montaje para el desplazamiento de la ventana cenital, así que se consideró ciertas características en el momento de hacer la elección. La primera fue que conservara su posición después de que se le haya retirado el

suministro de energía, así no se malgastaba energía en mantener una posición; Al igual que el motor usado en la ventana lateral, este debía poseer una alta razón de torque para soportar el peso y una baja inercia que permitiera detenerse rápidamente. Por las anteriores razones se eligió implementar un sistema mecánico que ya se encuentra comercialmente y es usado como un sistema eleva vidrios para un automóvil, sin embargo, a la parte móvil se le hizo la adaptación de un soporte con una pieza que se adecua a la ventana cenital y permite su fácil desplazamiento (Fig. 17). El motor de este mecanismo también es controlado a través del Arduino Mega con un circuito igual al mostrado en la figura 15.

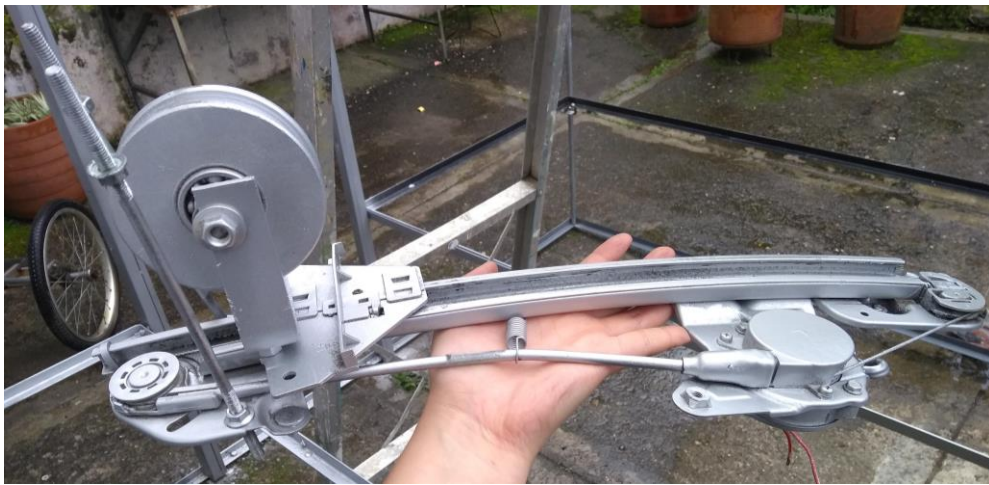


Figura 17. Soporte del motor de la ventana cenital.

3.2.3.3 Ventilador

Cuando el flujo de aire fresco proveniente del exterior no es suficiente para la adecuada ventilación del invernadero, se requiere de un elemento activo que cumpla con la función de extraer el exceso de calor y de renovar constantemente el aire interior. El ventilador es el encargado de suministrar el impulso necesario para desplazar el aire caliente proveniente de la resistencia y así poder calentar el interior del invernadero cuando la temperatura haya descendido a valores menores de los permitidos.

Se instalaron dos ventiladores, uno en la parte central e inferior del invernadero, justo en frente de la puerta, con el objetivo de proveer aire fresco desde el exterior y hacerlo

circular a través de todo el invernadero. El segundo se encuentra instalado arriba de la puerta y cumple la función de redirigir el aire caliente acumulado que ha sido desplazado hasta ahí por el aire fresco que se encuentra ocupando la posición más baja y enviarlo hacia el exterior a través de la ventana cenital (Fig.18), además, permite distribuir el agua proveniente del micro aspersor ubicado en la parte superior de forma equánime en todo el invernadero.



Figura 18. Ventiladores

Los ventiladores que han sido puestos en funcionamiento para este sistema trabajan con motores que se alimentan con 120VAC, por esta razón requieren de una etapa de potencia que permita la conexión con el Arduino Mega, este enlace entre las dos etapas se realiza a través de un circuito detector de cruce por cero y un circuito dimmer.

3.2.3.3.1 Circuito detector de cruce por cero

El circuito detector de cruce por cero identifica cuando la señal de entrada cruza por GND para poder realizar ajustes de poder en la fuente eléctrica, ya que estos puntos no poseen voltaje. La interrupción de la corriente en cualquier otro punto del circuito eléctrico crea un pico de poder potencialmente dañino. El circuito anteriormente descrito se puede apreciar en la figura 19.

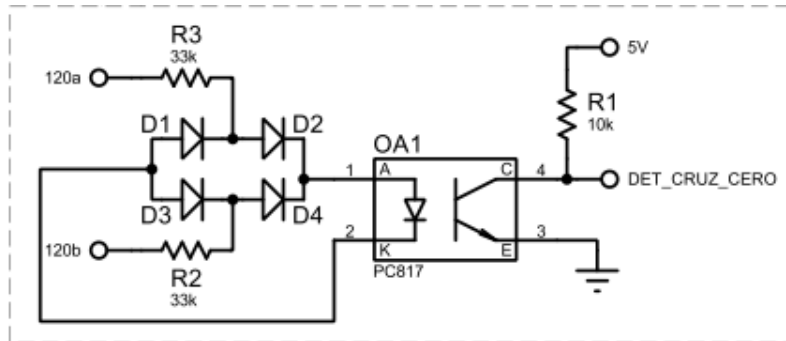


Figura 19. Circuito detector de cruce por cero.

Este circuito es muy importante para controlar la fase de la señal AC. En el caso de América Latina, la corriente alterna es de 120V y 60Hz, para lo que es necesario determinar cuánto se demora cada ciclo.

$$t = 1/f = 1/60 = 16,67 \text{ ms}$$

Como cada ciclo tarda 16,67 ms entonces la detección de cruce por cero se da cada 8,33 ms. Una vez se detecta el cruce, la señal es ingresada al Arduino y se procede a controlar la fase y el tiempo de duración para así poder controlar la potencia.

3.2.3.3.2 Circuito Dimmer:

Los dispositivos dimmer son los encargados de regular y manipular la intensidad de los instrumentos eléctricos que funcionan con corriente alterna (AC), a diferencia de los dimmer analógicos que desvían la energía a una resistencia por medio de un potenciómetro, los dispositivos dimmer digitales (modernos) prenden y apagan rápidamente el circuito para disminuir la cantidad total de energía que fluye por medio del circuito.

La onda de tensión con la que se alimenta el sistema eléctrico corresponde a una onda tipo senoidal, en la cual el dispositivo dimmer corta la onda cierto tiempo después de que el circuito detector de cruce por cero envíe la señal. El tiempo que tarda en cortar la onda depende del porcentaje de esta que se desee que pase, es decir, de la potencia que se quiera suministrar. El circuito implementado se puede ver en la figura 20.

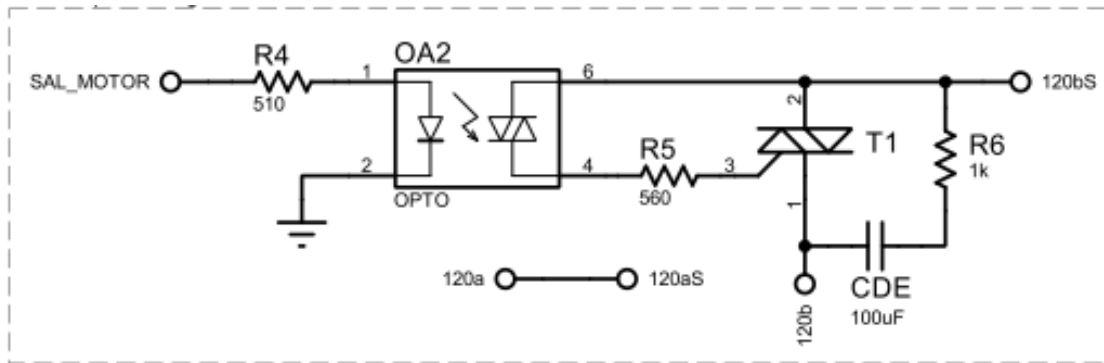


Figura 20. Circuito Dimmer.

3.2.3.4 Sistemas de Calefacción

El aumento excesivo de la temperatura, al igual que la disminución drástica de la misma, es uno de los principales problemas a considerar en cuanto al control climático en invernaderos se refiere; Con el fin de solventar la segunda dificultad se ha incrementado un sistema de calefacción compuesto por una resistencia calentadora y el ventilador anteriormente mencionado.

La resistencia calentadora funciona con corriente alterna, así que al igual que el ventilador debe ser controlada con los circuitos de cruce por cero (Fig.19) y dimmer (Fig.20). Como cada uno de los componentes se encuentra conectado al mismo suministro de energía eléctrica solo requieren de un circuito de cruce por cero.

En el caso tal en el que se requiera aumentar la temperatura, la resistencia calentadora será controlada por medio del dispositivo dimmer que le suministrará la potencia requerida según la temperatura a la que se encuentre el invernadero, mientras que la resistencia será alimentada con 100% de la potencia, esto con el objetivo de distribuir el aire caliente lo más rápido posible (Caso 5 de la tabla 6). Por los casos anteriormente mencionados se hace evidente la necesidad de implementar un solo circuito dimmer y es por esto que se ha agregado una serie de dispositivos relé (figura 21), encargados de establecer las condiciones de uso de dicho circuito. La tabla 6 enseña los casos a considerar y los sucesos desencadenados dependiendo de cuáles de los relés se encuentran activos.

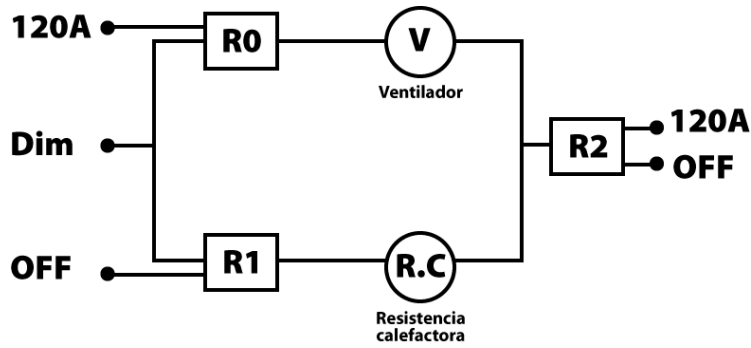


Figura 21. Relés para el controlador dimmer

Tabla 6. Esquema de inferencia del Dimmer.

Caso	R0	R1	R2	T	R
1	0	0	0	Off	Off
2	0	1	0	Off	Off
3	1	0	0	Off	Off
4	0	0	1	100% potencia	Off
5	0	1	1	100% potencia	Dim
6	1	0	1	Dim	Off
7	1	1	1	Dim	Dim

En la tabla anterior se puede apreciar 7 casos, sin embargo, los casos 2 y 3 se pueden desechar, ya que no tiene sentido activar alguno de los relés si el R2 no se encuentra activo. Los casos 4 y 7 también son discriminados pues no cumplen con las necesidades del sistema. El caso 4 se presenta cuando el ventilador se comporta como un actuador independiente.

3.2.3.5 Sistema de Riego

Los cultivos al igual que cualquier otro sistema vivo, necesitan de agua, para desarrollarse, cumplir sus funciones vitales y para ayudar en su capacidad de absorción de los nutrientes presentes en el suelo. Con base en lo anteriormente mencionado surge la necesidad de instalar un sistema de riego que suple el requerimiento de mantener las plantas hidratadas y la humedad adecuada de acuerdo al cultivo. Hay diferentes clases de sistemas de riego, entre los cuales se encuentran por gravedad, por inundación, por surcos, por goteo, aspersión o microaspersión.

En el caso de este proyecto se consideraron dos de la opciones anteriores, por goteo puesto que representa un ahorro considerable del recurso hídrico, aunque requiere de una inversión inicial importante, y por microaspersión porque simula el agua lluvia, supone un ahorro de agua en comparación con la aspersión normal, brinda un riego homogéneo (más que por goteo, ya que posee una mayor velocidad del agua y es menos probable que se obstruyan los emisores) y porque arroja cortinas de gotas muy pequeñas, las cuales ayudan a bajar la temperatura interior del invernadero. Evaluando las ventajas y desventajas de los dos sistemas de riego preseleccionados se decidió implementar la microaspersión ya que se encuentra más afín con las condiciones y las necesidades de este invernadero.

Una vez seleccionado el sistema de irrigación se eligió la ubicación a fin de ofrecer un riego homogéneo entre el cultivo, por esta razón se instaló una manguera centrada a lo largo de cada una las camas y se procedió a incorporales los microaspersores, los cuales se encuentran a una distancia de 80 cm entre ellos, pues se calculó un radio de cobertura de más o menos 40 cm y se pretende no saturar ningún punto. La instalación del sistema de riego se puede observar en la figura 22.



Figura 22. Sistema de riego.

El sistema de riego se automatizó empleando una electroválvula que está conectada al suministro local de agua y es accionada por una señal proveniente del Arduino Mega. Como la electroválvula requiere una alimentación de 12V y el arduino solo proporciona una señal de 5V es necesario incrementar un circuito de acople entre el Arduino y la electroválvula. Dicho circuito se puede ver en la figura 24.

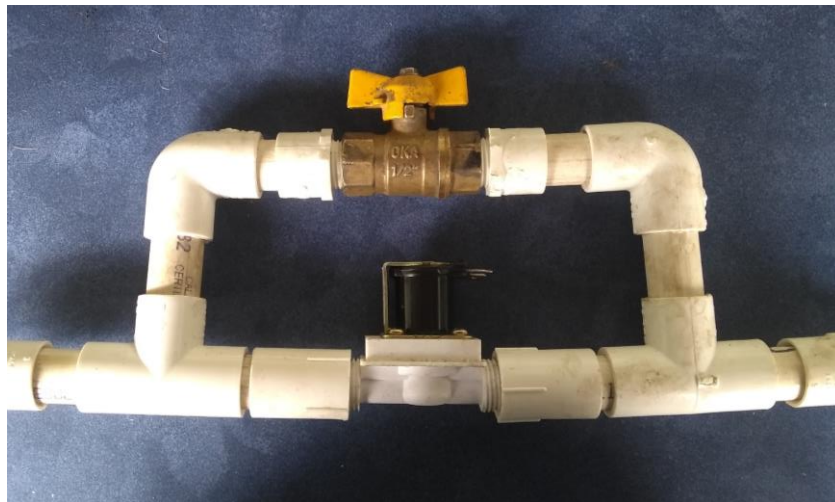


Figura 23. Montaje electroválvula.

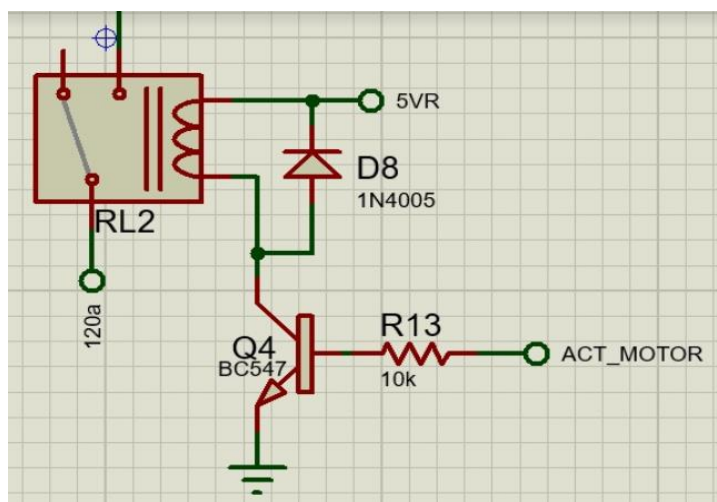


Figura 24. Circuito de acople Relé.

3.2.3.6 Sistema de Nebulización

La tasa de crecimiento y desarrollo de la planta depende de la temperatura que rodea al cultivo y cada especie tiene un rango de temperatura específico representado por un mínimo, máximo y óptimo. Las temperaturas que se consideran extremas por debajo o por encima de umbrales específicos en momentos críticos durante el desarrollo pueden afectar significativamente la productividad.

Considerando lo anteriormente mencionado y que en esta época del año se registró altas temperaturas en la ciudad de Popayán (entre los meses de julio a octubre) se instaló un sistema de nebulización que consta de un ventilador que distribuye de forma homogénea la niebla fina que sale de un microaspersor, ubicado en frente de la boquilla del ventilador (Fig.25). La nebulización acompañada de ventilación forzada permite refrigerar rápidamente los espacios donde se encuentran instalados; Al igual que el sistema de riego, es controlado por el Arduino Mega por medio de una electroválvula (Fig.23) y un circuito de acople (Fig.24).

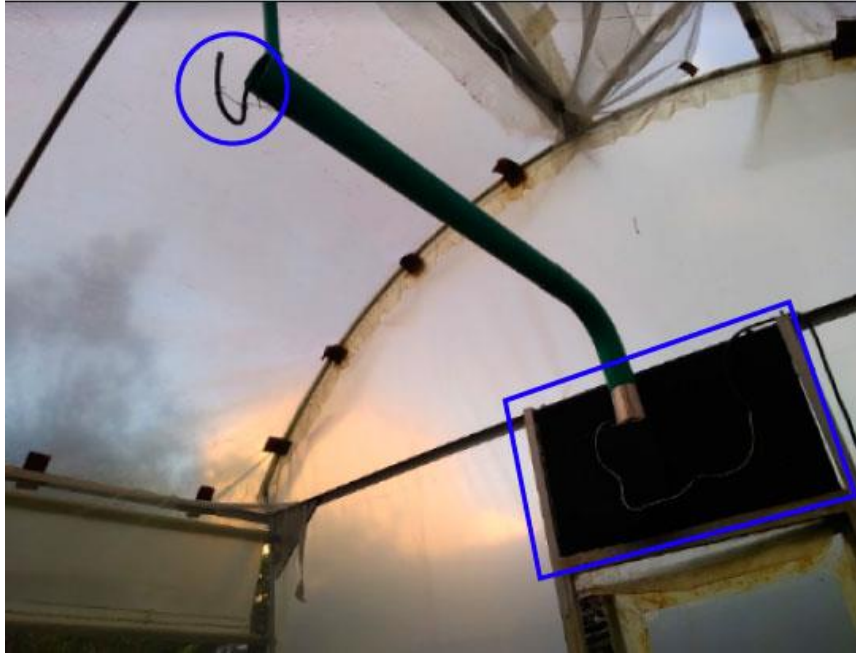


Figura 25. Sistema de nebulización.

4. ESTRATEGIA DE CONTROL

Un sistema de control es un grupo de componentes capaces de regular su propia conducta o la de otro sistema con el objetivo de obtener un funcionamiento predeterminado. Todos los procesos se pueden expresar a través de un bucle genérico con un número determinado de entradas y salidas (Fig.26). Las entradas y salidas se consideran como variables y se pueden clasificar en manipuladas, controladas y no controladas o perturbaciones. Las manipuladas son aquellas que se pueden modificar de forma manual, automática o por el controlador, algunos ejemplos de estos son los actuadores y los puntos de consigna para los controladores, las variables controladas son aquellas que salen del proceso, pueden ser variables físicas o índices de proceso, las no controladas son producto del proceso, pero no son de fácil acceso y las perturbaciones que son variables que no se pueden alterar o manipular y actúan con carácter aleatorio.

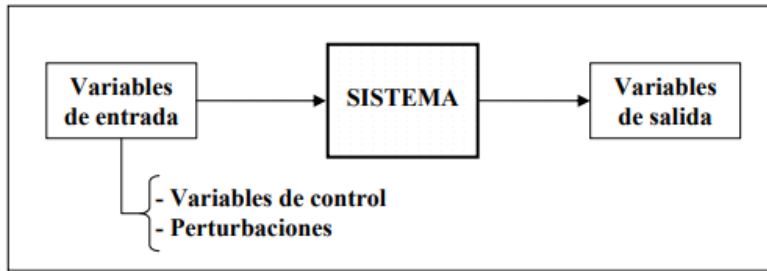


Figura 26. Bucle de control general.

Los sistemas de control se pueden clasificar en sistemas de lazo abierto los cuales reciben una señal de entrada y generan una señal de salida independiente, es decir, que no requieren retroalimentación y los sistemas de lazo cerrado que sí necesitan retroalimentación para hacer una acción de ajuste en respuesta del controlador. Al ser el invernadero el sistema al que se le requiere implementar el control, se debe tener en cuenta que posee unos puntos de consigna específicos que mantienen al cultivo en las condiciones adecuadas para su desarrollo. Por esta razón se evidencia la necesidad de implementar un controlador de lazo cerrado (Fig.27), pues al recibir la señal de retroalimentación puede mantener las variables de control (Temperatura y Humedad de Suelo) en los rangos estimados.

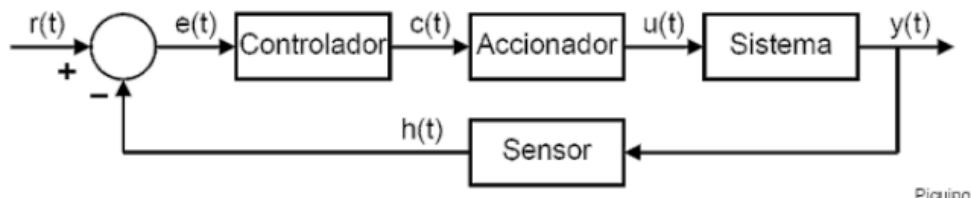


Figura 27. Sistema de control de lazo cerrado.

Existen diferentes tipos de controladores que se clasifican dependiendo del número de entradas y salidas que tenga el sistema, en el caso en el que solo tiene una entrada y una salida es llamado **SISO** (single input, single output), los sistemas de una entrada y múltiples salidas se llaman **SIMO** (single input, múltiple output), los sistemas con múltiples entradas y una única salida se denominan **MISO** (múltiple input, single output) y finalmente los sistemas con múltiples entradas y múltiples salidas son llamados como **MIMO** (múltiple input, múltiple output). Las variables a controlar en el invernadero son temperatura y humedad de suelo y los actuadores necesarios para producir cambios en

esas variables son las ventanas laterales, ventana cenital, ventilador, sistema de calefacción, sistema de riego y sistema de nebulización. Así que posee múltiples entradas y múltiples salidas, es decir, se necesita implementar un sistema MIMO.

Dentro de la variedad de controladores multivariables existentes se encontró que el Controlador Difuso (Fuzzy Controller) es el más adecuado para el sistema que se desea implementar, principalmente porque puede evaluar mayor cantidad de variables, no necesita un modelo matemático del sistema a controlar, sirve para tratar de modelar sistemas complejos y no lineales, posee alta tolerancia al ruido porque depende de varias reglas de control, tiene una gran estabilidad y alta velocidad de respuesta.

4.1 Diseño del controlador

Para la implementación del sistema del controlador difuso se utilizó el toolbox de lógica difusa (Fuzzy logic toolbox) de Matlab (Fig.28), el cual permite realizar fácilmente ajustes en la cantidad de variables ya sean de entradas o salidas, la cantidad de grupos y funciones de membresía que tiene cada variable y las reglas de control, así como también la visualización de las reglas y las superficies de control. Posteriormente se descargó el programa en código de matlab y se convirtió a la sintaxis de arduino para poder migrar el controlador al microcontrolador Arduino Mega 2560 donde finalmente se encontrada el código de la planta.

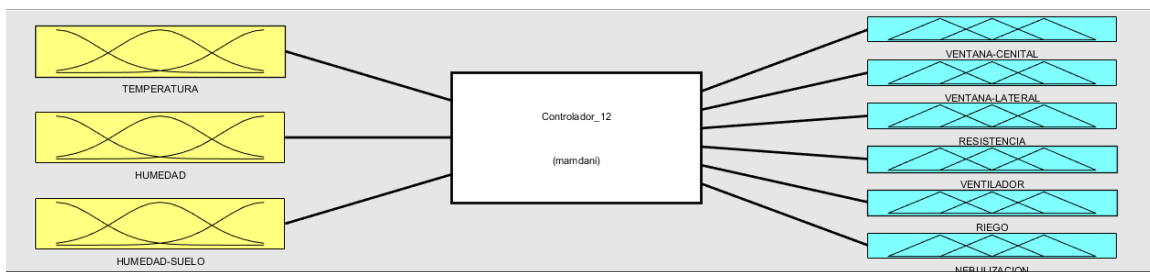


Figura 28. Interfaz gráfica de software de Fuzzy Logic Toolbox (Matlab).

4.1.1 Fuzzificación

Después de establecer las respectivas entradas (variables a controlar) y salidas (señales que manejan el comportamiento de los actuadores) del sistema, es fundamental proporcionarle a cada variable unos respectivos grupos con etiquetas lingüísticas y funciones de membresía que brindan un fácil entendimiento del comportamiento del mismo y permiten realizar las acciones de control. Es esencial comprender el funcionamiento de los mecanismos que se encuentran presentes, ya que no todas las señales que salen del controlador representan el mismo tipo de variable física, dependiendo del actuador a la que vaya dirigida la señal puede cambiar el tipo de variable, es decir, que para algunos actuadores la señal puede interpretarse como una posición, el valor de potencia o el tiempo en el que se mantendrá encendido el actuador.

4.1.1.1 Función de membresía para la temperatura

El universo de discusión para la temperatura está dado por un rango de 5 a 35°C en el que se decidió asignar cinco funciones de membresía tipo triangular y tres tipos trapezoidales. La distribución de cada una de las funciones se puede apreciar en la figura 29. En el caso de la etiqueta lingüística “Ideal” se decidió asignarle una función con una base mayor a las otras funciones pues se pretende establecer que en ese intervalo, los actuadores se encuentren en estado de reposo.

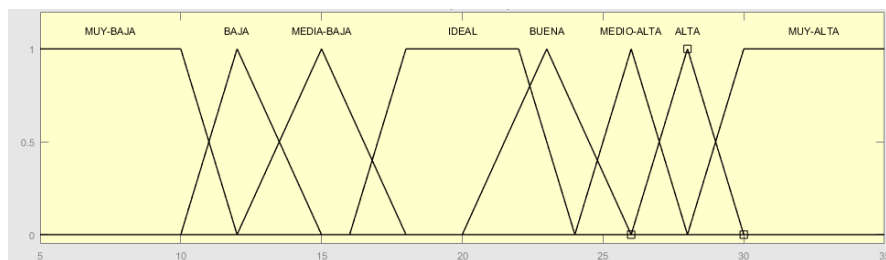


Figura 29. Fuzzificación Temperatura.

4.1.1.2 Función de membresía para la humedad

El universo de discusión para la humedad relativa se encuentra entre el rango de 0 a 100%, al cual se le ha asignado dos funciones de membresía tipo triangular y tres tipos trapezoidales. La distribución de cada una de las funciones se puede ver en la figura

30. El control de la variable de humedad no se encuentra dentro de los objetivos del proyecto, sin embargo, se ha decidido incorporarlo en el controlador con la finalidad de hacer una mejor integración entre las variables a controlar.

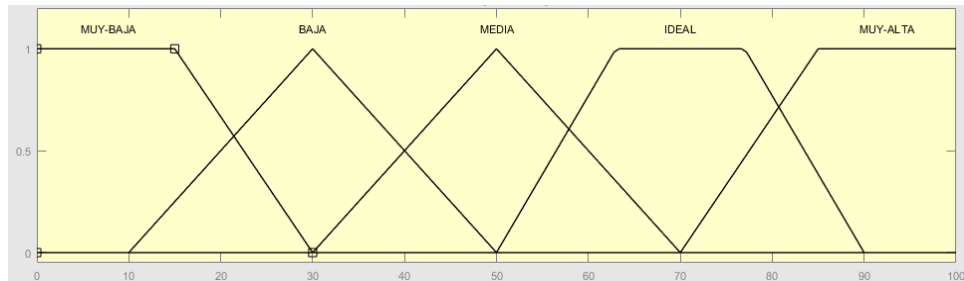


Figura 30. Fuzzificación Humedad.

4.1.1.3 Función de membresía para la humedad del suelo

Para esta variable el universo de discusión se encuentra entre el rango de 237 a 533. Estos valores se obtuvieron a través de la caracterización de los sensores de humedad de suelo, los cuales presentaban un comportamiento inversamente proporcional y es por eso que las distribuciones de sus funciones de membresía se manifiestan de una forma diferente al de las otras variables (Fig.31).

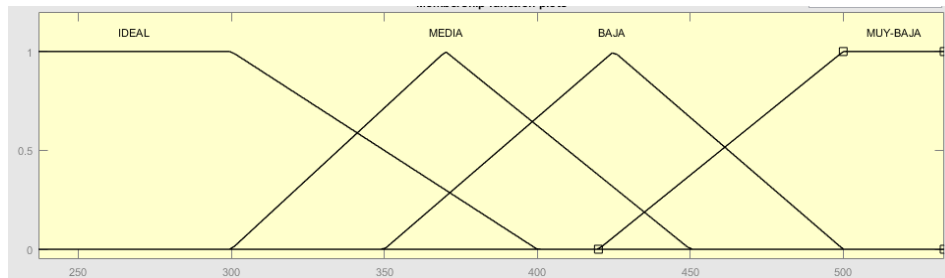


Figura 31. Fuzzificación Humedad de suelo.

4.1.1.4 Funciones de membresía para la ventana cenital

El universo de discusión está dado en términos de la posición a la que se desea llevar la ventana cenital. Dicha posición varía entre 441Ω (cuando se encuentra totalmente cerrada) y 877Ω (cuando está totalmente abierta). Estos valores fueron caracterizados manualmente y dependen de la lectura del potenciómetro que está ubicado en el eje de rotación de la ventana. Para esta variable se usaron dos funciones de membresía

triangulares y dos tipo trapezoidal, denominadas de la siguiente manera: “Poco-Abierta”, “Medio-Abierta”, “Cerrada” y “Abierta” respectivamente. En la figura 32 se puede ver la distribución de cada una.

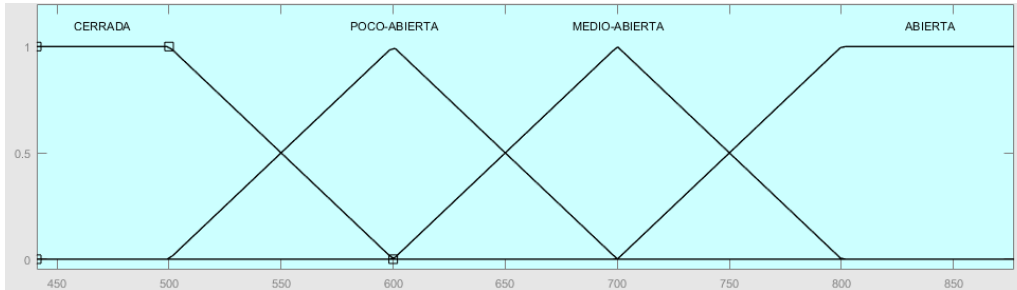


Figura 32. Fuzzificación Ventana Cenital.

4.1.1.5 Funciones de membresía para las ventanas laterales

Al igual que en la variable anterior, el universo de discusión se encuentra dado en términos de la posición, su rango está entre 0 a 5000 y se implementa dos funciones de membresía triangulares y dos tipos trapezoidales, denominadas: “Poco-Abierta”, “Medio-Abierta”, “Cerrada” y “Abierta” respectivamente. Finalmente, la distribución de cada una de las funciones se puede observar en la figura 33.

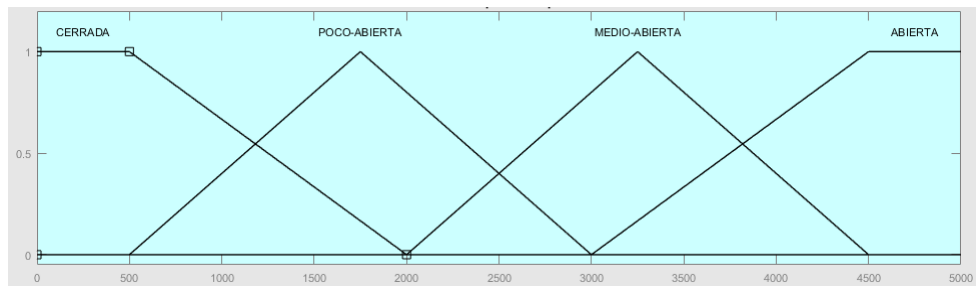


Figura 33. Fuzzificación Ventana Lateral.

4.1.1.6 Funciones de membresía para la resistencia de calefacción.

La señal proveniente del controlador brinda la información del valor de potencia que se le desea asignar a la resistencia. El universo de discusión está establecido entre 0 a 100% y las funciones de membresía elegidas para esta variable son de tipo triangular y tipo trapezoidal, se denominan: “Poca”, “Media”, “Apagada” y “Alta” respectivamente. La distribución de cada una de las funciones se observa en la figura 34.

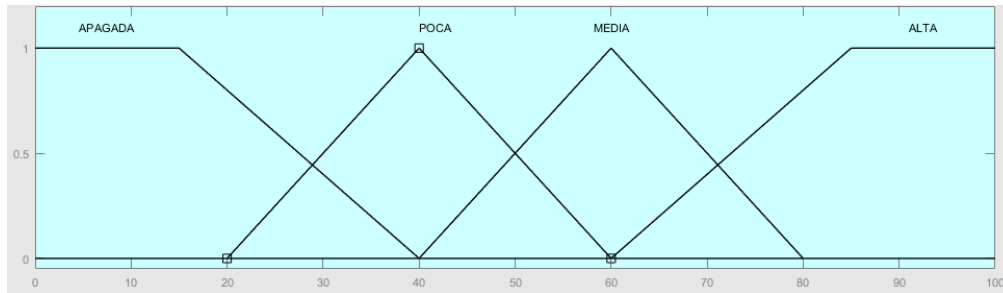


Figura 34. Fuzzificación Resistencia.

4.1.1.7 Funciones de membresía para el ventilador

El ventilador al igual que la resistencia recibe una señal en términos de potencia. Su universo de discusión está establecido entre 0 a 100 % y se le asignó cuatro funciones de membresía llamadas: “Apagada”, “Poca”, “Media” y “Alta”. La distribución de cada una de las funciones se observa en la figura 35.

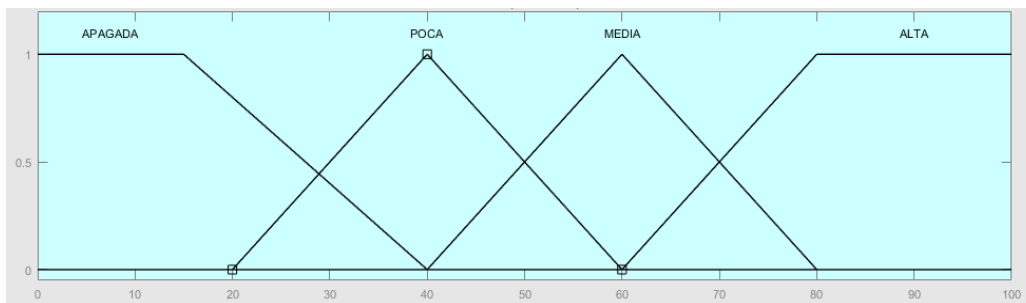


Figura 35. Fuzzificación Ventilador.

4.1.1.8 Funciones de membresía para el sistema de riego

El universo de discusión está dado en términos del tiempo (en segundos) que se desea activar la electroválvula, por ende, el tiempo en el que el sistema de riego está encendido. El sistema de riego tiene un rango entre 0 a 30 s y dos funciones de membresía tipo triangular y dos tipos trapezoidales, con los siguientes nombres: “Poco”, “Medio”, “Apagado” y “Mucho” respectivamente. La distribución de las funciones anteriormente mencionadas se ejemplifica en la figura 36.

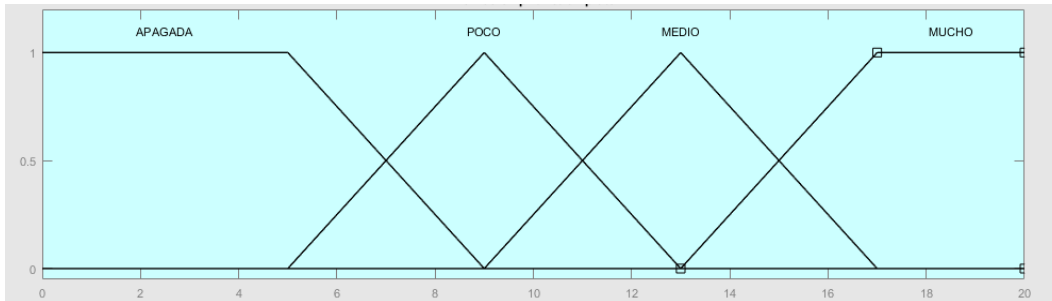


Figura 36. Fuzzificación Sistema Riego.

4.1.1.9 Funciones de membresía para el sistema de nebulización

El sistema de nebulización al igual que el sistema de riego tiene un universo de discusión en términos del tiempo (en segundos), y está establecido en un rango entre 0 a 30 s y se le asignaron dos funciones de membresía triangulares y dos tipos trapezoidales llamadas: “Poco”, “Medio”, “Apagado” y “Mucho”. En la figura 37 se puede ver la distribución de las funciones anteriormente mencionadas.

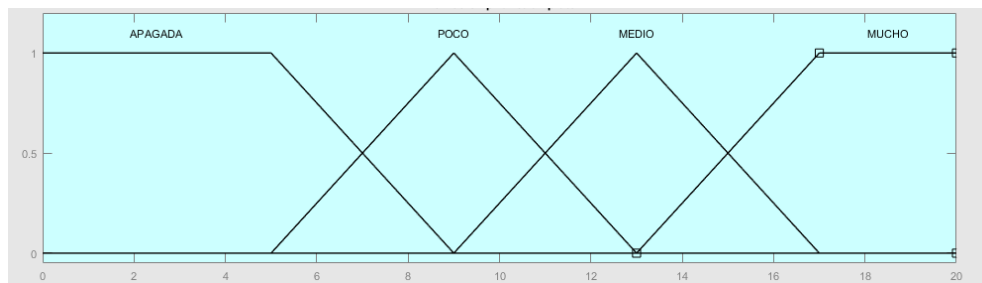


Figura 37. Fuzzificación de Nebulización.

4.1.2 Reglas difusas

Las reglas difusas son muy importantes para poder desarrollar un controlador Fuzzy porque proporcionan la experiencia del operador acerca del comportamiento del sistema a controlar. La relación entre cada una de las entradas y salidas se da a través de conectores lógicos como **IF**, **AND** y **THEN** como resultado se obtiene dichas reglas que describen al sistema. A continuación, se da como ejemplo detallado la primera de 160 reglas de control que se diseñaron para este proyecto.

IF { T (Temperatura) : Muy baja **AND** H (Humedad) : Muy baja **AND** HS (Humedad de Suelo) : Muy baja } **THEN** { VC (Ventana Cenital) : Cerrada **AND** VL(Ventana Lateral) : Cerrada **AND** R (Resistencia) : Alta **AND** V(Ventilador) : Alta **AND** SR (Sistema de Riego) : Mucho **AND** SN (Sistema de Nebulización) }

4.1.3 Superficies de Control

Las superficies de control son gráficas en 3D que muestran la relación existente entre dos de las entradas (variables a controlar) y una salida (actuador) del controlador difuso. En este caso se obtuvieron mediante simulación del sistema a través del software de MATLAB.

4.1.3.1 Superficies de control para la ventana cenital

Estas superficies muestran la relación entre las variables de entrada y la variable de salida llamada ventana cenital. En las figuras 38 y 39 se puede apreciar que dicho actuador es únicamente dependiente de la temperatura interior del invernadero, ya que las variables de humedad y humedad de suelo permanecen constantes para una temperatura determinada. También se logra identificar que la apertura de la ventana cenital incrementa a medida que la temperatura lo hace.

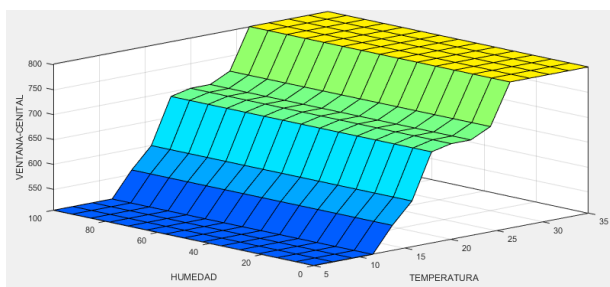


Figura 38. Superficie T, H y VC.

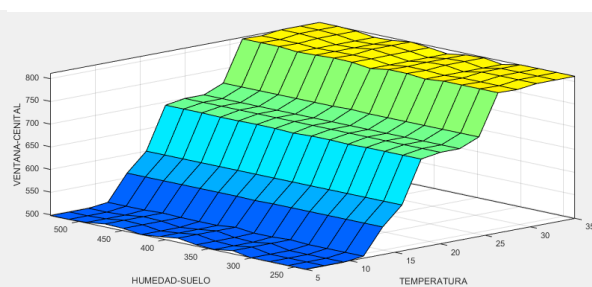


Figura 39. Superficie T, HS y VC

4.1.3.2 Superficies de control para la ventana lateral

En las figuras 40 y 41 se puede ver que la apertura de la ventana lateral al igual que la de la ventana cenital depende únicamente de la temperatura interior del invernadero, puesto que la humedad y humedad de suelo permanecen constantes para una temperatura determinada. A medida que la temperatura aumenta, la posición a la que se debe llevar la ventana tan incrementa.

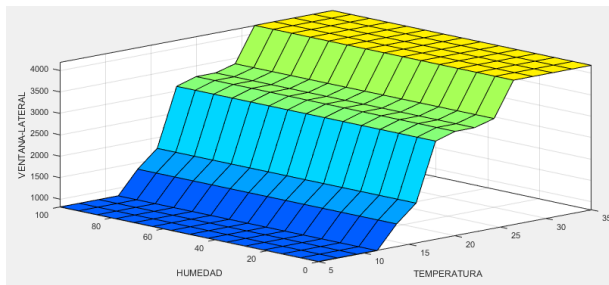


Figura 40. Superficie T, H y VL..

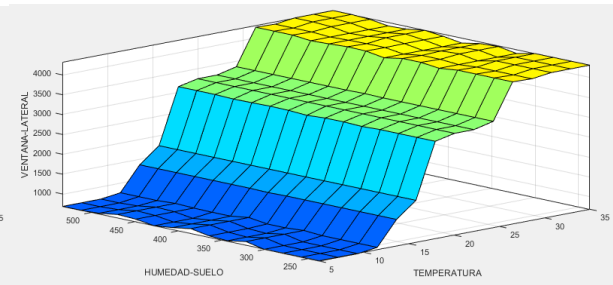


Figura 41. Superficie T, HS y VL.

4.1.3.3 Superficies de control para la resistencia

La resistencia como actuador se implementó para el caso en el que la temperatura interior disminuyera por debajo del valor ideal para el cultivo en cuestión, por esa razón las figuras 42 y 43 enseñan dicha relación inversamente proporcional entre la temperatura y resistencia, es decir que a medida en que la temperatura decrecimiento la potencia de la resistencia aumenta.

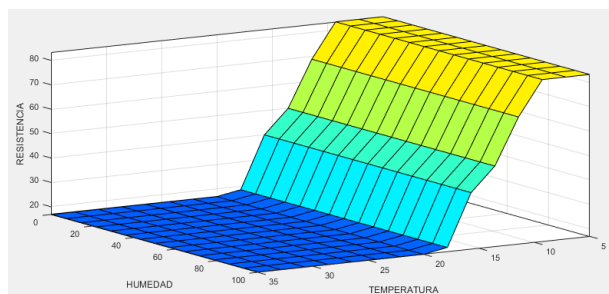


Figura 42. Superficie T, H y R.

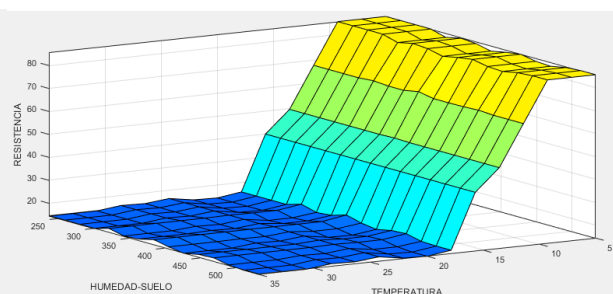


Figura 43. Superficie T, HS y R.

4.1.3.4 Superficies de control para el ventilador

El ventilador como ya se había mencionado anteriormente, cumple un papel muy importante en el control de temperatura de este invernadero, pues por valores inferiores

a la temperatura ideal se activa con su máxima potencia para distribuir lo más rápido posible el calor generado por la resistencia. En el caso en el que la temperatura es “ideal” el ventilador se desactiva ya que no se necesita de su funcionamiento y por último, en los casos en los que la temperatura son superiores a la temperatura ideal, la potencia incrementa del ventilador aumenta paulatinamente mientras que la temperatura interior también lo hace.

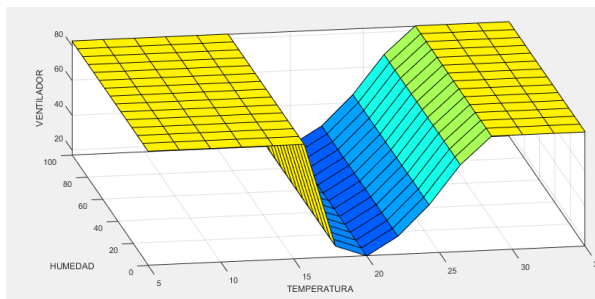


Figura 44. Superficie T, H y V.

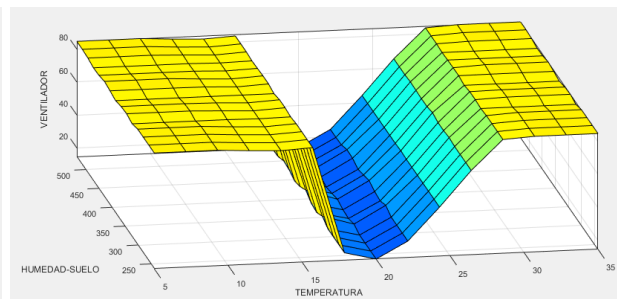


Figura 45. Superficie T, HS y V.

4.1.3.5 Superficies de control para el sistema de riego

El sistema de riego es el único actuador que relaciona su comportamiento con cada una de las variables de entrada del controlador, puesto que contribuye a disminuir la temperatura interna y a subir la humedad relativa y la humedad del suelo. En las figuras 46 y 47 se puede ver que el sistema de riego se conserva constante para valores de temperatura menores a los 27° y aumenta progresivamente para valores superiores a ese. Las figuras 46 y 48 muestran como la humedad permanece constante para valores menores al 35% y produce un aumento del tiempo de riego para valores superiores a ese porcentaje.

Finalmente, las figuras 47 y 48 denotan la relación más importante para el sistema de riego que se dan con la variable de humedad de suelo, ya que principalmente este actuador fue instalado para el aumento del porcentaje de agua en el suelo del invernadero. Es por eso, que el tiempo de riego tiene una relación inversamente

proporcional con la humedad de suelo, ya que a medida que la humedad descende, el tiempo de riego aumenta.

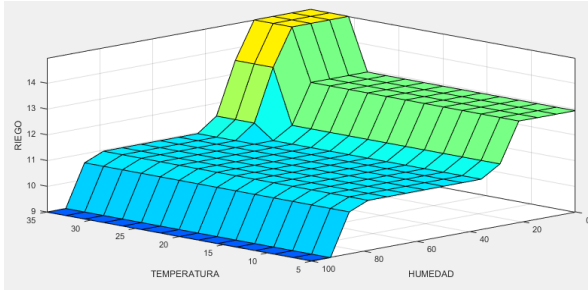


Figura 46. Superficie T, H y SR.

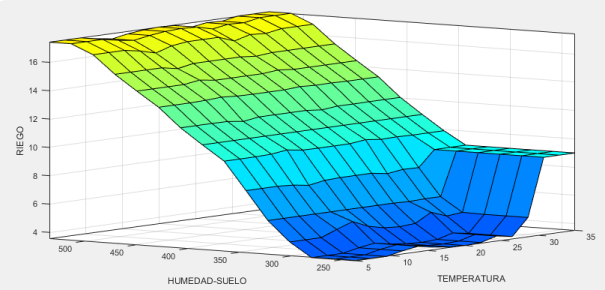


Figura 47. Superficie T, HS y SR.

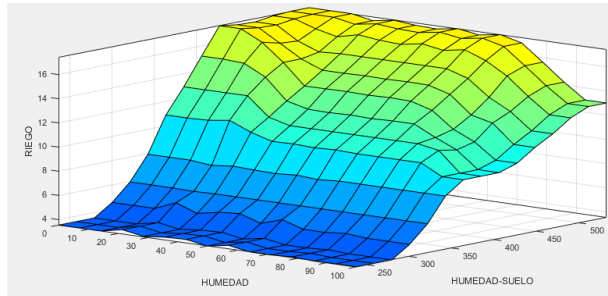


Figura 48. Superficie H, HS y SR.

4.1.3.6 Superficies de control para el sistema de nebulización

El sistema de nebulización se implementó como medida de apoyo en los meses de julio-septiembre en los cuales la temperatura de la ciudad de Popayán aumentó drásticamente. Las superficies de control de las figuras 49 y 50 manifiestan la dependencia de la salida del controlador con el aumento de la temperatura interior del invernadero y demuestra que se encuentra constante para las entradas de la humedad y la humedad de suelo.

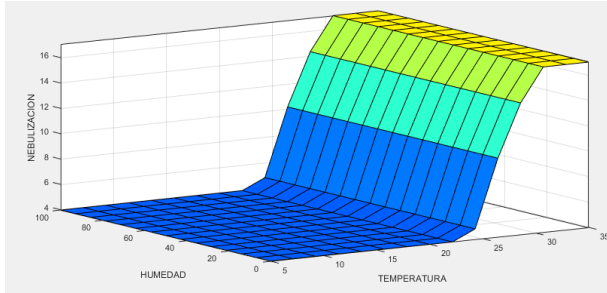


Figura 49. Superficie T, H y SN.

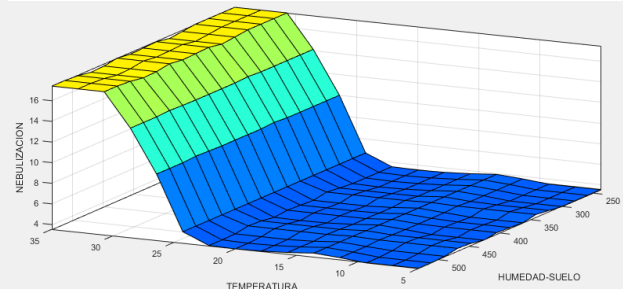


Figura 50. Superficie T, H y SN.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

Como se mencionó en la introducción, el objetivo del trabajo de grado fue diseñar y construir un invernadero con sistema de control de temperatura y humedad del suelo, para un cultivo de lechuga (*Lactuca Sativa*). A continuación, se describirán los resultados obtenidos por la implementación de la estructura diseñada en el capítulo 3, el circuito resultante de la instrumentación del sistema, la respuesta del controlador y la evaluación del rendimiento del invernadero a través de la comparación del cultivo sembrado en el interior con la del cultivo a la intemperie.

Estabilidad del sistema

El diseño de la estructura del invernadero proporcionó la estabilidad de las variables en el interior del sistema, puesto que sin importar el lugar donde se midiera la temperatura, se obtendría el mismo valor, además de contar con una alta inercia que impide cambios abruptos del sistema.

Prueba punto a punto

Para comprobar la estabilidad del sistema se realizó una serie de mediciones en el interior del invernadero que consistieron en hacer un barrido de la temperatura interna en diferentes puntos y en diferentes horas. Los valores de temperatura del sistema varían entre sí puesto que la temperatura exterior afecta al interior de forma directa, sin embargo, al estimar la diferencia entre la temperatura interna y la exterior se puede evidenciar la equivalencia entre cada punto dentro del invernadero.

Inercia del sistema

Para determinar la estabilidad e inercia del sistema fue fundamental realizar una prueba en la que el invernadero se sometió a un cambio de temperatura de forma forzada, es decir que, fue necesario encender un actuador (sistema de calefacción) para subir su temperatura interior y así poder determinar si el sistema presentaba cambios bruscos en la temperatura, también se calculó el tiempo en que el sistema tardó en estabilizarse. De igual manera se evaluó el tiempo que tardó en volver a su temperatura inicial, una vez se había desconectado la resistencia del sistema.

Incremento de temperatura de forma forzada

Los resultados de subir la temperatura de forma forzada demostraron que el sistema posee una alta inercia, pues los cambios de temperatura se presentan de forma suave, sin sobre picos o fluctuaciones y en un intervalo de tiempo considerable. Aproximadamente de 1 hora. Los datos obtenidos en la prueba se pueden ver con claridad en la figura 51.

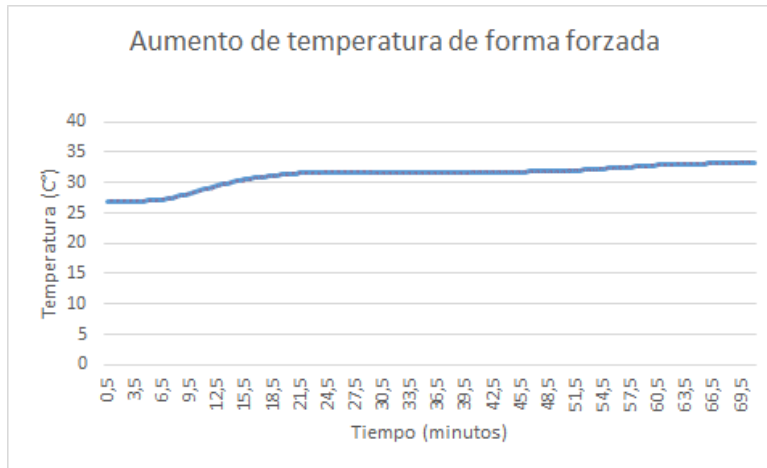


Figura 51. Aumento de la Temperatura de forma forzada.

Decremento de la temperatura

Una vez se hizo la prueba de incrementar la temperatura de forma forzada se procedió a desconectar la resistencia y a evaluar la respuesta de estabilización del sistema al nuevo cambio. En la figura 52 al igual que en la figura 51 se puede verificar que el sistema es estable y no reacciona de forma abrupta a los cambios de temperatura presentados en el sistema. El tiempo de estabilización del sistema también fue de 1 hora aproximadamente.

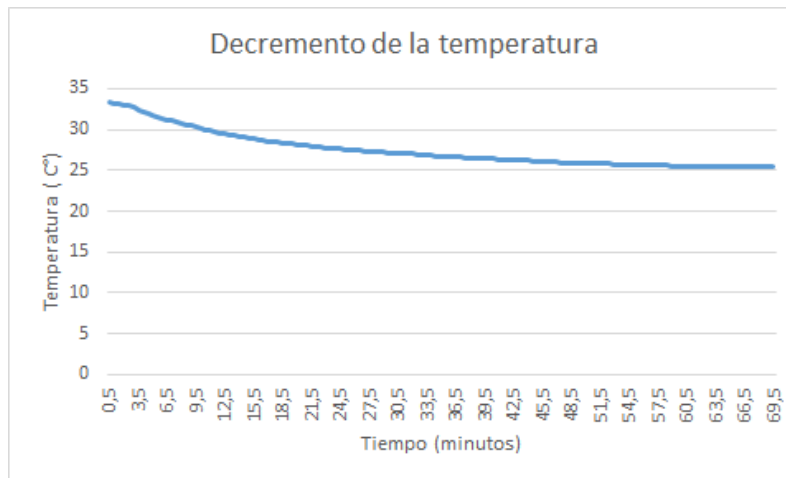


Figura 52. Estabilización de la temperatura sin controlador

Efecto invernadero

El aumento considerable de la temperatura interior del invernadero corresponde principalmente al efecto invernadero que se produce en este tipo de edificaciones. Es por eso que, es importante determinar el incremento que se genera para determinadas temperaturas exteriores y de acuerdo a eso establecer la estrategia de control que se requiere en cada uno de los casos.

5.3 Circuito eléctrico Implementado

Toda la instrumentación implementada en este proyecto requirió del diseño de un circuito eléctrico capaz de proporcionar los voltajes necesarios de operación y demanda de los dispositivos sensores, los actuadores o demás componentes del mismo. (véase figura 53).



Figura 53. Placa del circuito impreso

Respuesta del Controlador

El tiempo de respuesta del controlador depende de la inercia del sistema y de la capacidad que tenga los actuadores de realizar cambios en el interior del invernadero. Los casos que se han analizado se parte de condiciones extremas de temperatura y de

humedad y se estipula la variación y el tiempo de respuesta ante cada una de las variables de control.

Respuesta del Controlador a la Temperatura

Se evaluó la respuesta del controlador a la variable de temperatura partiendo del caso de reposo, en la cual el invernadero se encuentra a una temperatura de 31 C° y se desea llevar a una temperatura final de 24 C°. En la gráfica de la figura 54 se puede apreciar una pequeña inclinación en el minuto 2, en la cual la temperatura aumenta en un grado aproximadamente, esto se presenta porque a esta temperatura se activa la nebulización y en primera instancia y sin previo uso, el agua resultante del sistema sale a mayor temperatura de la esperada, puesto que la manguera que la traslada se encuentra en el exterior y ha sido calentada por la temperatura ambiente. Durante los primeros 18 minutos se aprecia la oposición al cambio generado por el sistema hasta que el minuto 19 decae la temperatura a 20°C y por fin empieza estabilizarse en la temperatura esperada. La estabilización del sistema partiendo del estado en reposo sin uso del controlador previamente se dio en la mitad del tiempo con el uso del sistema de control implementado.

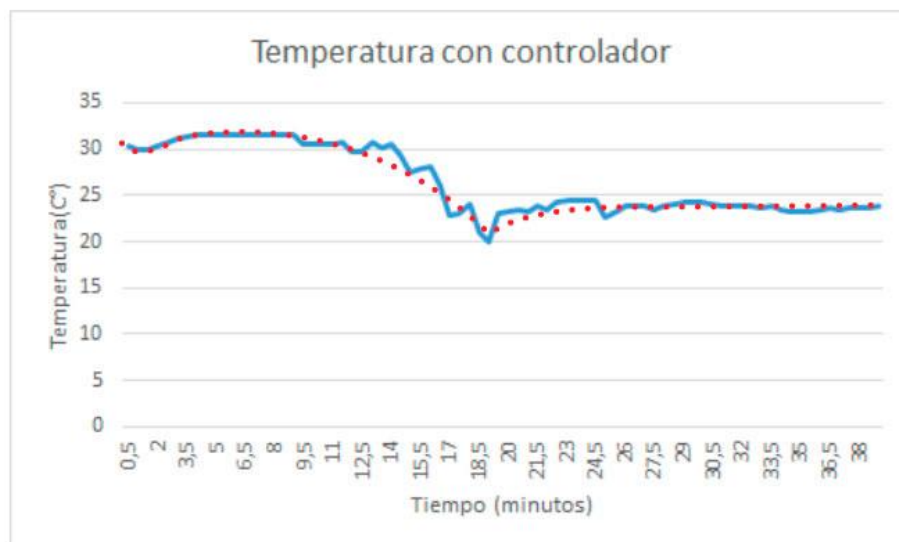


Figura 54. Respuesta del controlador a la temperatura

Respuesta del Controlador a la Humedad de Suelo

La respuesta del controlador a la variable de Humedad de Suelo partió desde la condición de que la tierra se encontraba totalmente seca, es decir que, se deseaba llevar la humedad del suelo de un 0% a una entre 60 - 80 %. Los valores que se discrimina en la gráfica de la figura 55 corresponden a los valores arrojados por el sensor de humedad de suelo directamente, para la determinación del rango en el que se encontraba se partió de los datos de caracterización del sensor que establecen ese rango entre los 300- 200 de la respuesta del este. Como se puede apreciar en la gráfica, la estabilización del sistema partiendo de una humedad del 0% se presentó de forma homogénea y en un tiempo aproximado de 10 minutos.

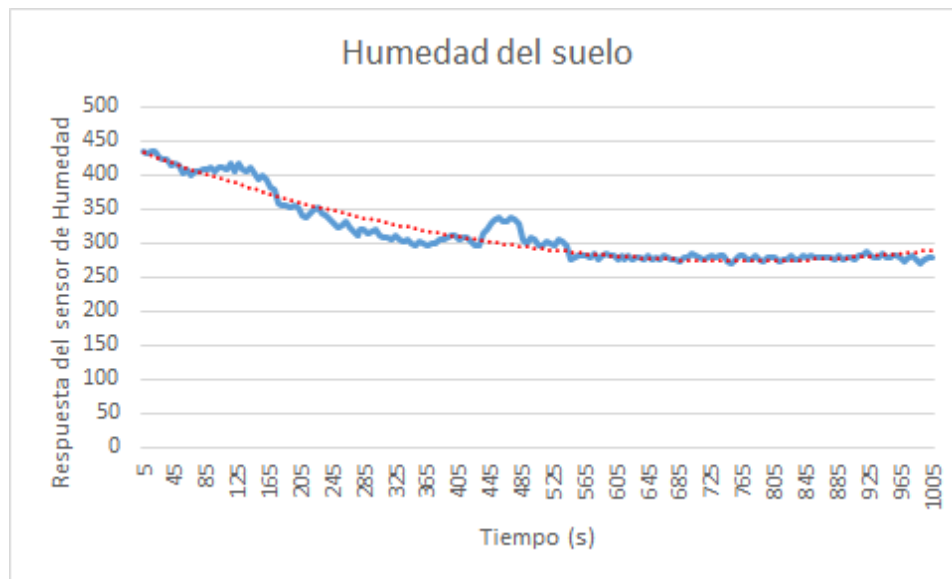


Figura 55. Respuesta del controlador a la Humedad de Suelo

Evaluación del rendimiento

El rendimiento del invernadero se evaluó por medio de la plantación y comparación de dos cultivos, sembrados bajo las mismas condiciones y al mismo tiempo, con la diferencia de que uno se localizó en el interior del invernadero, bajo un ambiente controlado y el otro a la intemperie. A continuación, se hace la descripción del estado de los cultivos durante el tiempo de siembra, hasta el momento de la cosecha:





Tabla 7. Evaluación del cultivo a la intemperie.


# Semanas	Descripción	Fotografía de resultados
Semanas 1 - 2	Etapa de semillero, sustrato a base de turba, buen riego y luz, que garantizo un buen desarrollo de la semilla.	
Semanas 3 - 4	Etapa de plántula, lista para el trasplante a la era en la intemperie.	
Semanas 5 - 6	Colocación de la plántula en la era en la intemperie , lugar definitivo.	

<p>Semanas 7 - 8</p>	<p>Etapa de roseta, se observa lento crecimiento del área foliar y un amarillamiento de las mismas.</p>	
<p>Semanas 9 - 10</p>	<p>Etapa de formación de cabeza, se observó marchitamiento de las hojas y estancamiento del crecimiento foliar.</p>	
<p>Semanas 11 - 12</p>	<p>Madurez fisiológica, las plantas alcanzaron esta etapa sin lograr el tamaño ideal de cosecha, además de presentar pérdidas foliares por exceso de temperatura y vientos.</p>	

Tabla 8. Evaluación del cultivo interior.

# Semanas	Descripción	Fotografía de resultados
<p>Semanas 1 - 2</p>	<p>Etapa de semillero, sustrato a base de turba, buen riego y luz, que garantizo un buen desarrollo de la semilla.</p>	

<p>Semanas 3 - 4</p>	<p>Etapa de plántula se determinó hasta la aparición de la cuarta hoja verdadera, lista para trasplante al lugar definitivo.</p>	
<p>Semanas 5 - 6</p>	<p>Colocación de las plántulas en las eras , bajo condiciones controladas.</p>	
<p>Semanas 7 - 8</p>	<p>Etapa de roseta, donde se observó elongación de las hojas y más formación de hojas verdaderas (12-14 aprox) .</p>	
<p>Semanas 9 - 10</p>	<p>Formación de cabeza, hojas crespas continuas saliendo cubriendo la zona central de la planta .</p>	

<p>Semanas 11 - 12</p>	<p>Madurez fisiológica, en esta etapa se observó que la planta ya ha formado gran cantidad de hojas y está lista para ser cosechada en el momento presentaba un buen color y buena sanidad de la misma, evitando un periodo de sobre madurez donde se presenta agrietamiento de estas.</p>	
----------------------------	--	--

Una vez se hizo la cosecha se procedió a determinar los parámetros importantes del cultivo, en este caso se enfatizó en la parte área o comercial de la planta. En la tabla 9 se puede apreciar los datos obtenidos una vez se había hecho la cosecha de los dos cultivos.

Tabla 9. Parámetros del cultivo exterior (C.E) y del cultivo interior (C.I)

No. Plant	Altura de la planta [cm]		Peso total por planta		Peso foliar por		Cantidad por planta		Promedio largo de hoja		Promedio ancho de hoja	
	C.E	C.I	C.E	C.I	C.E	C.I	C.E	C.I	C.E	C.I	C.E	C.I
1	11	24	30	200	15	170	14	25	5,49	12,32	4,6	11,6
2	7	20	15	140	10	100	14	28	4,16	12,43	3,14	9,86
3	9	23	15	130	10	105	14	20	4,47	13,15	3,69	10,45
4	9	20	15	75	7	55	10	12	5,14	16	3,77	10,5
5	6	22	10	150	5	115	10	23	4,24	12,57	3,55	10,52
6	7	17	15	140	7	95	13	22	4,28	13,55	3,79	11,55
7	6	25	15	160	5	135	9	25	4,59	13,72	3,63	12,16
8	6	18	10	150	5	120	10	34	4,62	13,53	3,59	10,65
9	8	16	15	100	11	80	13	30	4,55	9,07	3,75	7,13
10	6	18	12	100	5	80	10	28	3,59	14,86	2,87	12
11	7	22	10	160	5	110	8	19	4,21	12,95	3,46	11,21
12	5	14	10	100	5	80	8	28	5,38	12,46	5,25	9,64
13	7	25	20	120	10	80	15	29	4,99	13,31	3,53	11,31
14	7	20	20	150	5	130	19	38	3,1	11,16	2,47	9,16
15	7	20	15	120	5	90	9	25	4,5	12,4	3,53	9,6
16	6	20	10	100	5	50	9	24	4,64	11,67	3,59	9,33
17	7	15	12	100	5	80	9	24	5,38	11,33	4,67	9,33
18	8	15	20	100	15	80	16	24	5,19	11,67	3,98	9,67
19	6	12	15	100	9	50	13	24	4,24	11,67	3,68	9,67
20	10	14	18	55	13	45	15	18	5,21	11,11	4,53	9
21	5	19	7	110	4	60	6	22	3,7	10,36	3,57	9,18
22	5	15	15	70	11	50	12	26	4,63	14,31	3,7	11,08
23	5	25	14	210	10	170	11	24	4,29	13,21	3,65	12,58
24	7	21	8	140	5	100	8	25	4,79	13,32	4,91	11,72
25	6	24	15	75	10	55	10	13	4,51	15,69	3,99	14,31
26	7	22	7	150	5	120	6	23	6,22	12,52	5,27	10,78
27	6	25	12	130	7	110	10	18	4,07	12,83	3,52	9,78
28	5	23	7	160	5	120	7	21	3,8	11,19	3,66	11
29	5	25	9	165	4	140	9	24	3,5	13,88	2,96	12,54
30	6	18	9	140	5	100	9	22	3,82	13,5	3,61	11,73
Σ	202	597	405	3800	223	2875	326	716	135,3	381,7	113,9	319,04
Promedio	6,73	19,9	13,5	127	7,43	95,8	10,9	23,9	4,51	12,72	3,8	10,63

La rentabilidad del cultivo al interior del invernadero respecto del cultivo a intemperie se evaluó usando la siguiente ecuación en cada uno de los parámetros descriptores de cada plantación:

$$R = \left(\frac{\text{PARÁMETRO LECHUGA INTERIOR} - \text{PARÁMETRO LECHUGA EXTERIOR}}{\text{PARÁMETRO LECHUGA INTERIOR}} \right) * 100\%$$

En la tabla 11 se presentan los valores obtenidos de rentabilidad del cultivo en el interior del invernadero respecto al cultivo que se localizaba en el exterior de este. En la tabla se puede apreciar que en todos los descriptores se denota una mejora en el cultivo cuyas condiciones fueron controladas a través del invernadero en estudio.

Tabla 10. Rentabilidad del cultivo interior respecto a la intemperie

Alto	Peso total	Peso Foliar	Cantidad de hojas	Promedio largo de hoja	Promedio Ancho de hoja
118,18	566,67	1033,33	78,57	124,29	152,17

6. CONCLUSIONES

- Se evaluó los resultados obtenidos del cultivo bajo invernadero y el cultivo a la

intemperie y se determinó que la eficiencia para el primer tipo de cultivo respecto al segundo corresponde al 118,8% para el alto de la planta, 566,67% peso total, 1033,33% peso foliar, 78,57% cantidad de hojas buenas, 124% del largo de las hojas en promedio y 157,17% el ancho de la hoja en promedio. Por lo que se concluye que el cultivo del interior del invernadero fue más rentable que el del exterior.

- La estructura diseñada y el tipo de invernadero seleccionado presentaron un desempeño que permitió el crecimiento del cultivo de lechuga bajo condiciones climáticas externas difíciles para el cultivo, lo que permite concluir que el invernadero controlado es una alternativa para minimizar el riesgo alimentario debido al cambio climático.
- La estrategia de control seleccionada (lógica difusa) permitió controlar el invernadero y alcanzar el microclima necesario para el desarrollo adecuado del cultivo de lechuga.
- A partir de los resultados obtenidos con el microclima del invernadero, se pudo demostrar la importancia de mantener las variables medioambientales en los rangos de producción adecuados del cultivo de lechuga, ya que se obtuvo mejores resultados productivos dentro del invernadero en comparación al cultivo a intemperie.
- Al evaluar tanto el tamaño como la condición de daño en las hojas se observó que el cultivo presentó un buen rendimiento y no hubo presencia de perforaciones por insectos a pesar de que no se utilizaron agroquímicos, lo que demuestra que el invernadero propuesto es una potencial estrategia para desarrollar agricultura limpia.

7. REFERENCIAS







- Admindefinca. (2018). La importancia del riego en los cultivos.[Online]. Available:
<http://www.fincaycampo.com/2014/09/la-importancia-del-riego-en-los-cultivos/>
- Agudelo.R. & Castellanos.D. Medina.M. (2005). Automatización del sistema de riego para el cultivo de flores tipo exportación. Bogotá, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana
- Andrickson.J. & Chacón.R. (2016). Sensores. [Online]. Available:
<http://www.unet.edu.ve/~ielectro/sensores.pdf>
- Annan. K. (2002). Seguridad alimentaria y nutricional. [Online]. Available:
<http://www.fao.org/3/a-at772s.pdf>
- Amozurrutia.A.J. (2006). Metodología, métodos, técnicas: Lógica borrosa y redes neuronales artificiales aplicadas a las Ciencias Sociales. [Online]. Available: <http://www.redalyc.org/pdf/316/31602407.pdf>
- Deceuninck.(2016). Ventilación:Principios teóricos [Online].Available:
https://www.construnario.com/ebooks/1126/@_@cat%C3%A1logos/prestaciones%20t%C3%A9rmicas%20-%20ac%C3%BAsticas/ventilaci%C3%B3n.pdf
- Burwell. L.(2017).¿Qué es un detector de cruce por cero? [Online]. Available:
https://techlandia.com/detector-cruce-cero-hechos_45009/
- Carpio, J. & Huamán. S. (2006). Diseño y construcción de un invernadero con control y supervisión de temperatura, humedad e intensidad de luz. Lima, Perú: Tecnia.
- Cortes. M. D. & Perez. H. (2007). Simulación y control de la temperatura dentro de un invernadero. Bogotá, Colombia: Universidad de La Salle
- Colombini .C. (2005) *Invernadero automatizado*, 1st ed. Buenos Aires, Argentina: Saavedra.
- Castillo. R. (2017). Humedad del suelo. Como se comporta y su importancia – Universidad Agrícola. [Online].Available:<http://universidadagricola.com/humedad-del-suelo-como-se-comporta-y-su-importancia/>.
- Denim.P. E.(2014). Aportes para el mejoramiento del manejo de los sistemas de riego, Métodos de riego: fundamentos, usos y adaptaciones. [Online]. Available:
https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_aportes_para_el_mejoramiento_del_manejo_de_los_sistemas_de_riego.pdf
- Dimmer regulador de luz [Online]. Available:<https://www.areatecnologia.com/electricidad/dimmer-regulador-de-luz.html>
- Ebel.F.Nestel.S.(1993). Sensores para la técnica de procesos y manipulación:

- Sensores de proximidad. [Online]. Available: https://www.festo-didactic.com/ov3/media/customers/1100/094342_leseprobe_es.pdf
- Espino. A. (2017). Control de temperatura con lógica difusa para un sistema de espectroscopia láser. [Online]. Available: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/12293/TESIS.pdf?sequence=1>
- Elsevier B.V.(2015). Temperature extremes: Effect on plant growth and development. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212094715300116>
- El estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo (2018) [Online]. Available: <http://www.fao.org/3/I9553ES/i9553es.pdf>
- Estructuras, materiales y equipos de producción. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la agricultura.(2019). [Online]. Available: <http://www.fao.org/tempref/docrep/fao/005/s8630s/s8630s02.pdf>
- Freddy.F. (2017). 18 Ventajas Del Control Difuso [Online]. Available: <https://es.scribd.com/document/147601418/18-Ventajas-Del-Control-Difuso>
- Hernández. G.(2015). Funciones de pertenencia. [Online]. Available: http://www.dma.fi.upm.es/recursos/aplicaciones/logica_borrosa/web/fuzz_y_inferencia/funpert.htm
- Hernandez.I.I.(2004). Sección del controlador difuso. [Online]. Available: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lep/hernandez_b_ii/capitulo_4.pdf
- Importancia del agua para la agricultura [Online]. Available: <http://importanciadelagua.net/importancia-del-agua-para-la-agricultura/>
- Importancia de la calibración y mantenimiento preventivo de un equipo.(2007). [Online]. Available: <https://www.quiminet.com/articulos/importancia-de-la-calibracion-y-mantenimiento-preventivo-de-un-equipo-21014.htm>
- Jurado.J. G.(2012). Diseño de sistemas de control multivariable por desacoplo con controladores PID, Universidad de Córdoba
- Navarro. f. (2015). Metrología: Diferencias entre Calibración y Verificación de Equipos. [Online]. Available: <https://revistadigital.inesem.es/gestion-integrada/metrologia-calibracion-y-verificacion/>
- News. A.(2018). Humedad del suelo. Cómo se comporta y su importancia [Online]. Available: <https://gruposacsa.com.mx/humedad-del-suelo-se-comporta-importancia>
- Mallas mosquiteras para invernaderos: Todo lo que necesitas saber (2018) [Online].

- Available:[https://www.sistemashorticolasalmeria.com/blog/mallas -mosquiteras-para-invernaderos/](https://www.sistemashorticolasalmeria.com/blog/mallas-mosquiteras-para-invernaderos/)
- Marlow.D.(2011). Aporte de CO2 en un invernadero | Hortalizas. [Online].Available: <http://www.hortalizas.com/horticultura-protegida/invernadero/aporte-de-co2-en-un-invernadero/>.
- Mejía. A. M. (2016) La seguridad alimentaria en Colombia: Cambios y vulnerabilidades. [Online]. Available: https://www.ucentral.edu.co/sites/default/files/inline-files/2017_Seguridad_alimentaria_001.pdf
- Muñoz. L.(2016). Qué es el Riego por Microaspersión: Ventajas e inconvenientes [Online]. Available: <https://www.agrohuerto.com/riego-por-microaspersion/>
- McGrady. Ch.(2016). ¿Con o sin escobillas? ¿Qué motor de CC debería elegir? [Online]. Available:<https://www.arrow.com/es-mx/research-and-events/articles/which-dc-motor-is-best-for-your-application>
- Principales Tipos de Invernaderos.(2017).[Online]. Available: <https://www.horticultivos.com/agricultura-protegida/invernaderos/principales-tipos-invernaderos/>
- Ramos.A.(2008). Acondicionamiento y cambio de las señales obtenidas por los sensores de presión.[Online]. Available: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lep/ramos_p_a/capitulo4.pdf
- Rosegrant. M. W. (2009). Cambio climático: El impacto en la agricultura y los costos de adaptación [Online]. Available: http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/AGRO_Noticias/docs/costo%20adaptacion.pdf
- Santizo.H.L.(2011). Diseño y construcción de invernaderos para la producción de hortalizas. [Online]. Available:[http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/5625/T18620%20SANTIZO%20VELAZQUEZ,%20HOREL%](http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/5625/T18620%20SANTIZO%20VELAZQUEZ,%20HOREL%20)

ANEXOS

Lechugas exterior

Lechuga # 1 - A	Lechuga # 2 - A	Lechuga # 3 - A
		
Lechuga # 4 - A	Lechuga # 5 - A	Lechuga # 6 - A
		
Lechuga # 7 - A	Lechuga # 8 - A	Lechuga # 9 - A



Lechuga # 10 - A



Lechuga # 11 - A



Lechuga # 12 - A



Lechuga # 13 - A



Lechuga # 14 - A



Lechuga # 15 - A



Lechuga # 16 - A



Lechuga # 17 - A



Lechuga # 18 - A



Lechuga # 19 - A



Lechuga # 20 - A



Lechuga # 21 - A



Lechuga # 22 - A



Lechuga # 23 - A



Lechuga # 24 - A



Lechuga # 25 - A



Lechuga # 26 - A



Lechuga # 27 - A



Lechuga # 28 - A









Lechuga # 29 - A



Lechuga # 30 - A



Lechugas interior invernadero

Lechuga # 1 - B	Lechuga # 2 - B	Lechuga # 3 - B
 A photograph of a green leafy lettuce plant with a dense, rounded head and curly leaves. The plant is shown with its root system against a white background. A small white tag with the number '1' is placed at the bottom right of the plant.	 A photograph of a green leafy lettuce plant with a dense, rounded head and curly leaves. The plant is shown with its root system against a white background. A small white tag with the number '2' is placed at the bottom right of the plant.	 A photograph of a green leafy lettuce plant with a dense, rounded head and curly leaves. The plant is shown with its root system against a white background. A small white tag with the number '3' is placed at the bottom right of the plant.
Lechuga # 4 - B	Lechuga # 5 - B	Lechuga # 6 - B
 A photograph of a green leafy lettuce plant with a dense, rounded head and curly leaves. The plant is shown with its root system against a white background. A small white tag with the number '4' is placed at the bottom right of the plant.	 A photograph of a green leafy lettuce plant with a dense, rounded head and curly leaves. The plant is shown with its root system against a white background. A small white tag with the number '5' is placed at the bottom right of the plant.	 A photograph of a green leafy lettuce plant with a dense, rounded head and curly leaves. The plant is shown with its root system against a white background. A small white tag with the number '6' is placed at the bottom right of the plant.
Lechuga # 7 - B	Lechuga # 8 - B	Lechuga # 9 - B



Lchuga # 10 - B



Lchuga # 11 - B



Lchuga # 12 - B



Lchuga # 13 - B









Lchuga # 14 - B



Lchuga # 15 - B



<p>Lechuga # 16 - B</p>	<p>Lechuga # 17 - B</p>	<p>Lechuga # 18 - B</p>
		
<p>Lechuga # 19 - B</p>	<p>Lechuga # 20 - B</p>	<p>Lechuga # 21 - B</p>
		
<p>Lechuga # 22 - B</p>	<p>Lechuga # 23 - B</p>	<p>Lechuga # 24 - B</p>



Lchuga # 25 - B



Lchuga # 26 - B



Lchuga # 27 - B



Lchuga # 28 - B



Lchuga # 29 - B



Lchuga # 30 - B

