

**DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN SISTEMA DE CORTINAS PLEGABLES PARA
INVERNADEROS TIPO ASIMÉTRICOS**



MIGUEL ANGEL SALCEDO ROJAS

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
SECCIONAL TUNJA**

FACULTAD DE INGENIERIA MECÁNICA

**TUNJA
2025**

**DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN SISTEMA DE CORTINAS PLEGABLES PARA
INVERNADEROS TIPO ASIMÉTRICOS**

MIGUEL ANGEL SALCEDO ROJAS

Trabajo de grado para optar al título
de ingeniero mecánico

Asesor
ALONSO HERNANDEZ MOLANO
Ingeniero Mecánico

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
SECCIONAL TUNJA

FACULTAD DE INGENIERIA MECÁNICA

TUNJA
2025

AUTORIDADES ACADEMICAS

Fray Álvaro José Arango Restrepo, O.P.
Rector General

Fray Mauricio Cortés Gallego, O.P.
Vicerrector Académico General

Fray José Fernando Mancipe, O.P.
Rector Seccional Tunja

Fray Wilmar Yesid Ruiz Cortés, O.P.
Vicerrector Académico Seccional Tunja

Helver Mauricio Muñoz Barajas
Decano Facultad de Ingeniería Mecánica

CONTENIDO

1.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	10
2.	JUSTIFICACIÓN.....	12
3.	ANTECEDENTES.....	13
4.	OBJETIVOS.....	14
4.1.	OBJETIVO GENERAL.....	14
4.2.	OBJETIVos ESPECIFICos.....	14
5.	ALCANCE.....	15
6.	MARCO TEÓRICO.....	16
6.1.	MARCO HISTÓRICO.....	16
6.2.	MARCO DE REFERENCIA.....	16
6.3.	MARCO CONCEPTUAL.....	16
6.4.	MARCO LEGAL.....	17
7.	METODOLOGÍA.....	19
7.1.	ANÁLISIS DE CONDICIONES ACTUALES.....	19
7.1.1		19
7.1.2		21
7.1.3		21
7.2.	INVESTIGACIÓN Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS.....	22
7.3.	DISEÑO DEL SISTEMA SELECCIONADO.....	23
7.3.1		23
7.3.2		26
7.3.3		32
7.4.	AUTOMATIZACIÓN DEL SISTEMA.....	52
7.5.	CONSTRUCCIÓN Y PRUEBA PILOTO.....	64
8.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	74
9.	CONCLUSIONES.....	78
10.	REFERENCIAS.....	79
11.	Anexos.....	80
11.1.	firmware del sistema de control.....	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fotografía Invernadero Asimétrico.	10
Figura 2. Sistema De Ductos Cerrado.	20
Figura 3. Sistema De Ductos Abierto.	20
Figura 4. Botritis cinérea y Oidium spp.	22
Figura 5. Sistema Roller Manual.	23
Figura 6 DCL Fuerzas Presentes Dentro Del Eje	24
Figura 7. Criterios De Evaluación.	26
Figura 8. Resultado matriz de decisión motor GMD100-S.	27
Figura 9. Resultado matriz de decisión motor Worm Gear Motor 12V.	28
Figura 10. Resultado matriz de decisión motor VEVOR.	29
Figura 11. Soporte Motor GMD100-S.	30
Figura 12. Foto Soporte Motor GMD.	30
Figura 13. Especificaciones Del Eje De La Cortina.	32
Figura 14. Diagrama De Cuerpo Libre Del Eje.	34
Figura 15. Diagrama Fuerza Cortante.	34
Figura 16. Diagrama Momento Flector.	35
Figura 17. Diagrama Circulo De Mohr.	38
Figura 18. Resultados Circulo De Mohr Del Simulador.	38
Figura 19. Vista Frontal Del Herraje.	39
Figura 20. Vista Lateral Del Herraje.	40
Figura 21 Vista Isométrica Del Herraje	40
Figura 22 Plano Del Riel	41
Figura 23 Soporte Fijo Del Riel.	42
Figura 24 Buje	43
Figura 25 Plano Lista De Partes	44
Figura 26 Ubicación Del Herraje En El Invernadero.	45
Figura 27 Esfuerzo Von Mises Herraje	46
Figura 28 Tención Principal Del Herraje	47
Figura 29 Segunda Tención Principal Del Herraje	48
Figura 30 Factor De Seguridad Del Herraje	49
Figura 31. Diseño Soporte Panel.	50
Figura 32. Plano Soporte Panel Solar.	50
Figura 33 Análisis De Esfuerzos Por Deflexión	51
Figura 34. Factor De Seguridad.	51
Figura 35 Bateria Inteligente	52
Figura 36. Hora Sol Pico Facatativá, Cundinamarca.	53
Figura 37. Panel Solar De 40 Watts.	54
Figura 38. Modulo Puente H BTS7960.	55
Figura 39. Regulador De Voltaje LM317T.	56
Figura 40. Selector De 3 Posiciones.	57
Figura 41. Plano Circuito.	57
Figura 42 Diagrama De Bloques.	59
Figura 43. Conexiones Batería.	60
Figura 44. Conexiones Modulo Regulador.	60
Figura 45. Conexión Del Puente H.	60

Figura 46. Conexión Pines De La ESP32.	61
Figura 47. Ancho De Pistas PCB.	62
Figura 48. Diseño De La PCB.	63
Figura 49. Modelo 3D PCB.	63
Figura 50. Soporte Del Panel Solar.	64
Figura 51. Soporte Caja IP.	65
Figura 52. Instalación Del Panel Solar.	66
Figura 53 Clip Para Tubos De Invernadero	66
Figura 54. Incorrecta Alineación Del Motor y El Carril Guía.	67
Figura 55. Correcta Alineación Del Motor Y Carril Guía.	67
Figura 56 Instalación Completa Del Motor Y El Panel Solar	68
Figura 57. Proceso De Planchado Del Circuito.	69
Figura 58. Proceso De Grabado Químico.	69
Figura 59. Fabricación De La PCB.	70
Figura 60. PCB Con Los Componentes Integrados.	70
Figura 61. Ensamble Fina Caja IP.	71
Figura 62. Instalación Caja IP Dentro Del Invernadero.	72
Figura 63 Protocolo De Validación Y Prueba De Campo	73
Figura 64 Medidas Para Una Correcta Alineación Del Riel	75
Figura 65. Presencia De Corrosión En PCB.	76
Figura 66 Resultados Prueba Con sensor De Temperatura	76
Figura 67 Instalación Del Sistema En Las 14 Naves Del Invernadero	78

GLOSARIO

INVERNADERO: Estructura cubierta que permite controlar las condiciones ambientales para producir cultivos.

CULTIVO: Proceso de sembrar y desarrollar plantas bajo ciertas condiciones.

CUMBRERA: Parte más alta o línea superior del techo de un invernadero.

HUMEDAD RELATIVA: Cantidad de vapor de agua en el aire comparada con la máxima que podría contener.

BOTRYTIS CINEREA: Hongo que causa pudrición gris en muchas plantas.

OIDIUM SPP: Grupo de hongos que producen el oídio o “polvillo blanco” en hojas.

FITOSANITARIO: Producto o acción destinada a prevenir o controlar plagas y enfermedades.

CORTINAS PLEGABLES: Paneles móviles que controlan entrada de luz o ventilación en un invernadero.

MICROCLIMA: Condiciones ambientales locales dentro de un espacio pequeño.

LoRa: Tecnología de comunicación inalámbrica de largo alcance y bajo consumo.

TORQUE: Fuerza que causa rotación, medida en N·m.

FUERZA NORMAL: Fuerza perpendicular a una superficie que evita que un objeto la atraviese.

FRICCION: Resistencia al movimiento entre dos superficies en contacto.

MOTOR DC: Motor que funciona con corriente directa.

RPM: Revoluciones por minuto de un eje.

PERIMETRO: Suma de las longitudes de los lados de una figura.

DIGRAMA DE CUERPO LIBRE: Representación gráfica que muestra todas las fuerzas que actúan sobre un objeto aislado.

AREA: Superficie ocupada por una figura.

MASA: Cantidad de materia en un cuerpo.

PESO: Fuerza con la que la gravedad atrae a un cuerpo.

MOMENTO: Efecto rotacional producido por una fuerza respecto a un punto.

MOMENTO FLECTOR MAXIMO: Mayor valor de momento que experimenta una viga al doblarse.

MOMENTO DE INERCIA DE AREA: Medida de la resistencia de una sección a la flexión.

ESFUERZO DE FLEXIÓN: Tensión interna generada cuando una viga se dobla.

MOMENTO POLAR DE INERCIA: Medida de la resistencia de una sección a la torsión.

ESFUERZO CORTANTE POR TORSIÓN: Tensión interna causada por una fuerza que hace girar el elemento.

ESFUERZO VON MISES: Valor combinado de esfuerzos usado para predecir falla en materiales.

FACTOR DE SEGURIDAD: Relación entre la resistencia real y la resistencia requerida de un diseño.

CIRCULO DE MORH: Gráfico que representa estados de esfuerzo en un punto.

HERRAJE: Pieza metálica utilizada para unir, reforzar o soportar estructuras o elementos.

LINEA DEL ECUADOR: Línea imaginaria que divide la Tierra en hemisferio norte y sur.

LATITUD: Distancia angular entre un punto y el ecuador.

SIMULACION ELEMENTOS FINITOS: Método para analizar esfuerzos, deformaciones o temperaturas dividiendo un objeto en elementos pequeños.

VOLTAJE: Diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos.

CORRIENTE: Flujo de carga eléctrica a través de un conductor.

RESISTENCIA: Oposición al paso de corriente eléctrica.

MUDULACION POR ANCHO DE PULSO PWM: Técnica que controla potencia variando la duración de pulsos eléctricos.

CIRCUITO: Conjunto de componentes conectados para permitir el flujo de corriente.

ESP-32: Microcontrolador con WiFi y Bluetooth integrado.

HORAS SOL PICO: Medida estándar de energía solar equivalente a una hora de irradiancia de 1000 W/m².

POTENCIA: Tasa a la que se entrega o consume energía.

AUTONOMIA: Tiempo que un sistema funciona antes de agotar su fuente de energía.

PLACA DE CIRCUITO IMPRESO PCB: Tarjeta donde se montan y conectan componentes electrónicos.

ESTAÑO: Metal blando y flexible usado comúnmente para soldar componentes electrónicos.

CAUTIN: Herramienta que calienta una punta metálica para fundir estaño y realizar soldaduras.

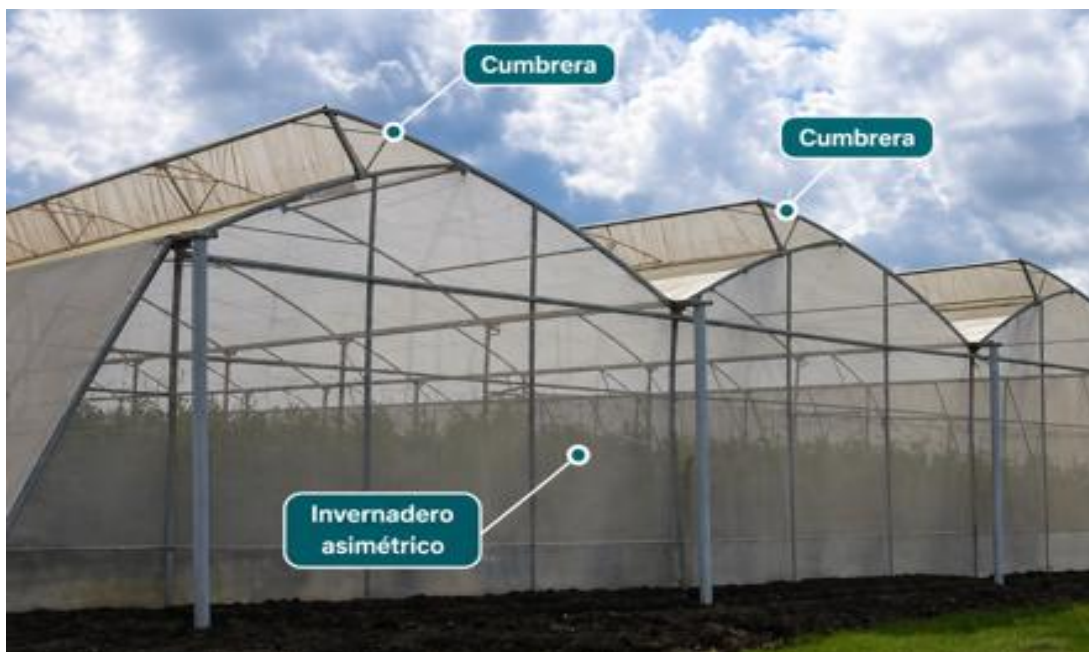
ACIDO CLORHIDRICO: Sustancia química corrosiva usada para limpieza, desoxidación y procesos industriales.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

The Elite Flower es una organización colombiana con más de 30 años de trayectoria en la producción y comercialización de flores ornamentales, cuyo mercado principal se encuentra en Norteamérica. Actualmente, la compañía cuenta con diversas sedes nacionales e internacionales y ha experimentado un crecimiento exponencial, expandiendo su presencia a países como Canadá y Estados Unidos, así como a regiones en África y el Reino Unido. Como resultado de esta expansión, la empresa invierte en proyectos de innovación orientados a optimizar sus procesos internos, desde la etapa de cultivo hasta la postcosecha.

Por esta razón, actualmente está importando invernaderos desde el país de Israel, estos invernaderos son conocidos como asimétricos o tropicales, este tipo de invernaderos se caracteriza por que en su parte superior tiene un descapote llamado cumbrera la cual es muy beneficiosa para los días de verano ya que esta permite una ventilación natural para las flores, el problema es en los días lluviosos debido a que la cumbrera permite que ingrese mucha humedad, lo cual afecta a las flores que se encuentran dentro del invernadero. Por el momento la empresa cuenta con un sistema manual para tapar la cumbrera, el problema de ese sistema se debe a que el proceso tarda alrededor de veinte minutos, el trascurso de ese tiempo resulta perjudicial para las flores.

Figura 1. Fotografía Invernadero Asimétrico.



Fuente. El Autor

La producción de flores en invernadero requiere un estricto control de las condiciones micro climáticas, en especial de la humedad relativa, debido a que esta variable incide directamente en la sanidad del cultivo.

Este aumento de humedad genera un ambiente propicio para la aparición de enfermedades fúngicas y bacterianas que afectan de manera directa la calidad y cantidad de la producción. Dichas enfermedades suelen propagarse con rapidez y, en los casos más graves, pueden ocasionar la pérdida total de un cultivo. Incluso cuando son detectadas a tiempo, el proceso de control implica eliminar el material vegetal afectado y aplicar tratamientos químicos de alto costo.

De manera adicional, el exceso de humedad favorece la presencia de insectos que se alimentan de las flores. Cuando esto ocurre, la empresa se ve obligada a realizar fumigaciones no programadas, lo que incrementa los costos de operación y afecta la sostenibilidad del cultivo.

Frente a este panorama, surge la necesidad de desarrollar una solución que permita **reducir el tiempo de cierre y apertura de las cubiertas**, a fin de controlar de manera más eficiente la humedad relativa dentro del invernadero. En este contexto, es que la empresa decide tomar acción y se dispone a apoyar proyectos que encuentre una solución viable ante esta problemática.

2. JUSTIFICACIÓN

El desarrollo de este proyecto surge de la necesidad de mejorar el control del microclima dentro de los invernaderos de la empresa Elite Flower, especialmente en lo relacionado con el control de la humedad relativa. El sistema actual de cierre de cubreras mediante ductos presenta tiempos de respuesta elevados, lo que permite el ingreso excesivo de humedad durante eventos de lluvia. Esta situación favorece la aparición de enfermedades fúngicas y plagas que afectan la calidad y productividad del cultivo de flores. Por esta razón, se propone el diseño de un sistema de cortinas plegables que permita reducir el tiempo de cierre de las cubreras y optimizar el control ambiental dentro del invernadero.

Este proyecto es pertinente porque responde a una problemática real que afecta la productividad y rentabilidad de la empresa. Desde una perspectiva técnica, la implementación de cortinas plegables permitiría controlar de manera más eficiente la humedad relativa, reduciendo la incidencia de enfermedades e infestaciones de insectos.

Desde el ámbito económico, disminuiría los costos asociados a la eliminación de material vegetal, aplicaciones químicas y fumigaciones no programadas, del mismo modo ayudaría a aumentar la producción ya que creando un ambiente propicio para las plantas contribuirá incrementando la velocidad de crecimiento de las plantas.

Finalmente, desde una dimensión científica, la investigación aporta al conocimiento sobre el diseño y aplicación de sistemas de control ambiental en invernaderos, contribuyendo a la innovación tecnológica en la floricultura.

3. ANTECEDENTES

El cultivo de flores en invernaderos ha adquirido gran importancia en los últimos años debido a la posibilidad de controlar las condiciones ambientales y garantizar una producción constante y de alta calidad. Sin embargo, uno de los principales problemas en este tipo de infraestructura es la acumulación de humedad relativa, la cual, al incrementarse en cortos periodos de tiempo, genera un ambiente propicio para la aparición de enfermedades fúngicas que pueden afectar significativamente la productividad del cultivo.

"Diversos estudios han evidenciado que la humedad elevada favorece el desarrollo de hongos patógenos como *Botrytis cinerea* y *Oidium spp.*, los cuales ocasionan daños severos en flores ornamentales, comprometiendo tanto la estética como el rendimiento económico del cultivo. La presencia de estas enfermedades obliga a los productores a retirar el material vegetal afectado y a aplicar tratamientos químicos, lo que incrementa los costos de producción y, en ocasiones, genera pérdidas irreversibles"¹

Adicionalmente, la acumulación de humedad dentro del invernadero favorece la aparición y proliferación de insectos plaga, que encuentran en este ambiente condiciones ideales para su desarrollo. La detección tardía de estos organismos implica la necesidad de realizar fumigaciones adicionales no programadas, lo que no solo incrementa los gastos de operación, sino que también afecta los planes de manejo fitosanitario establecidos por la empresa.

Con el fin de mitigar estos problemas, "diferentes investigaciones han propuesto estrategias de ventilación y control micro climático dentro de los invernaderos"². Entre estas soluciones se destacan los sistemas de cortinas automáticas ubicadas en la cumbrera, que permiten regular de manera más eficiente el intercambio de aire con el exterior, reduciendo la acumulación de humedad y, por consiguiente, la aparición de enfermedades y plagas.

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir un sistema de cortinas plegables que reduzca el tiempo de cierre de las cubreras y optimice el control del microclima en los invernaderos de flores de la empresa Elite Flower.

4.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Analizar las condiciones actuales de operación de las cubreras en los invernaderos de la empresa Elite Flower.
- Realizar un diseño funcional de cortinas plegables que reduzca el tiempo de cierre de las cubreras aplicando criterios de diseño mecánico que permitan identificar el factor de seguridad del diseño.
- Construir un prototipo de tamaño escala el cual se someterá a pruebas piloto para identificar la eficiencia del diseño.

5. ALCANCE

La investigación se centrará en el diseño, evaluación técnica y construcción de un prototipo tamaño escala de un sistema de cortinas plegables que reduzca el tiempo de cierre de las cumbreras y optimice el control del microclima en los invernaderos de la empresa Elite Flower. El proyecto tendrá un enfoque aplicado, ya que se busca dar solución a una problemática real de producción.

- El estudio se desarrolló en los invernaderos de Elite Flower ubicados en la ciudad de Facatativá en el municipio de Cundinamarca.
- Se analizó las condiciones actuales del sistema de cierre de cumbreras y sus efectos en la humedad relativa.
- Se diseñó el sistema de cortinas plegables con planos, cálculos estructurales (diagrama de cuerpo libre, esfuerzos cortantes, momento flector, círculo de Mohr y factor de seguridad).
- El estudio no incluyó la construcción masiva del sistema en todos los invernaderos, sino la validación de la viabilidad técnica por medio de pruebas piloto con un prototipo de tamaño a escala.

6. MARCO TEÓRICO

6.1. MARCO HISTÓRICO

"El origen de los invernaderos se remonta a la antigua Roma, donde se empleaban estructuras rudimentarias con materiales traslúcidos para proteger cultivos delicados" (Rodríguez & Pérez, 2015). Posteriormente, en los siglos XVIII y XIX, Europa consolidó el uso de invernaderos como parte de la agricultura moderna, facilitando la producción intensiva de flores y hortalizas en condiciones climáticas controladas.

En Colombia, la introducción de los invernaderos se consolidó a mediados del siglo XX, especialmente en la Sabana de Bogotá, debido al auge de la floricultura de exportación. "Según Asocolflores (2020), este sector ha representado uno de los principales motores económicos no tradicionales del país "¹. En este contexto, la empresa **Elite Flower**, fundada en la década de 1990, ha liderado procesos de innovación en producción, enfrentando constantemente el reto de controlar la humedad y la temperatura para garantizar la calidad de sus cultivos destinados a mercados internacionales.

6.2. MARCO DE REFERENCIA

La literatura científica ha demostrado que el tiempo de apertura y cierre de las cubiertas en los invernaderos tiene un impacto directo en el equilibrio del microclima. López et al. (2018) "encontraron que los retrasos en el proceso generan aumentos significativos de la humedad relativa, lo cual crea condiciones favorables para el desarrollo de patógenos". En el mismo sentido, García y Muñoz (2021) "identificaron que hongos como *Botrytis cinerea* y *Oidium* spp. proliferan rápidamente cuando se generan excesos de humedad, causando pérdidas considerables en cultivos florales".

En experiencias internacionales, Martínez y Herrera (2019) "demostraron que la automatización de sistemas de ventilación puede reducir entre un 25 % y 30 % los costos asociados a fumigaciones y tratamientos correctivos". Estos hallazgos se relacionan directamente con la problemática de Elite Flower, donde el proceso manual de cierre de cubiertas puede tardar hasta 23 minutos, elevando la humedad relativa a niveles que favorecen plagas y enfermedades, además de incrementar los costos por agroquímicos.

En términos institucionales, Asocolflores (2020) "enfatisa que la competitividad internacional de la floricultura colombiana depende de la implementación de innovaciones tecnológicas que aseguren eficiencia en producción y sostenibilidad ambiental".

6.3. MARCO CONCEPTUAL

Dentro de la presente investigación se manejan algunos conceptos técnicos, los cuales son necesarios conocerlos ya que permitirán una mejor comprensión de proyecto a realizar.

- **Invernadero:** estructura cubierta con materiales traslúcidos que permite modificar las condiciones ambientales internas para favorecer el crecimiento de plantas (FAO, 2017).
- **Cumbrera:** punto más alto del invernadero, donde se localizan los sistemas de ventilación para regular la entrada y salida de aire.
- **Cortinas plegables:** dispositivos móviles de material flexible que permiten el control de la ventilación natural, incidiendo en la humedad relativa y temperatura interna.
- **Humedad relativa (HR):** proporción entre la cantidad de vapor de agua presente en el aire y la cantidad máxima que este puede contener a una temperatura específica.
- **Microclima:** conjunto de variables ambientales (temperatura, humedad, radiación y movimiento del aire) que afectan directamente el desarrollo fisiológico de los cultivos.
- **Factor de seguridad:** parámetro de diseño estructural que relaciona la resistencia del material con las cargas aplicadas, garantizando estabilidad y durabilidad.
- **Fuerza Normal:** Fuerza perpendicular a una superficie que evita que un objeto la atraviese.
- **Coeficiente De Fricción:** Resistencia al movimiento entre dos superficies en contacto.
- **Torque:** Fuerza que causa rotación, medida en N·m.
- **Metodología en cascada:** modelo secuencial de gestión de proyectos en el cual cada fase debe completarse antes de pasar a la siguiente, asegurando organización y control.

6.4. MARCO LEGAL

El proyecto se enmarca en normativas nacionales que regulan tanto el diseño estructural como las prácticas agrícolas y ambientales:

1. Normas de construcción y diseño estructural:

- Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10), que establece lineamientos para el diseño de estructuras metálicas y elementos sometidos a cargas.
- Normas ICONTEC aplicables a materiales y procesos de soldadura.

2. Normatividad agrícola y ambiental:

- Decreto 1843 de 1991, que regula el manejo de plaguicidas de uso agrícola.

- Resolución 682 de 2018 del ICA, la cual establece medidas fitosanitarias para la producción de flores de exportación.
- Ley 99 de 1993, que organiza el Sistema Nacional Ambiental (SINA).

3. Normatividad laboral y de seguridad:

- Ley 1562 de 2012, que reglamenta la seguridad y salud en el trabajo.
- Decreto 1072 de 2015, compilación normativa en materia laboral, incluyendo lineamientos para uso seguro de maquinaria y equipos.

Este marco legal asegura que el diseño e implementación del sistema de cortinas plegables no solo sea técnicamente viable, sino también conforme a las regulaciones vigentes en Colombia, garantizando seguridad, sostenibilidad y cumplimiento normativo.

7. METODOLOGÍA

La metodología seleccionada para el desarrollo del proyecto es la metodología de cascada, dado que permite un enfoque secuencial, organizado y controlado en el que cada fase debe completarse antes de avanzar a la siguiente. Esta metodología es especialmente útil en proyectos de diseño e implementación tecnológica, ya que garantiza una planificación ordenada y minimiza la improvisación en la ejecución.

El desarrollo del proyecto se estructuró en las siguientes fases:

7.1. ANÁLISIS DE CONDICIONES ACTUALES

En esta etapa se realizó un diagnóstico detallado del método de apertura y cierre de las cumbreras utilizado en los invernaderos con los que cuenta la empresa Elite Flower.

Después de observar las diferentes fincas que se encuentran en Cundinamarca es evidente que todos los invernaderos de la empresa utilizan el tipo de invernadero asimétrico, pero los diseños varían mucho dependiendo de la finca, Lo que no cambia es el sistema utilizado para la apertura y cierre de las cumbreras, debido a que en todos los invernaderos de la finca utilizan un sistema conocido como ductos el cual se expondrá más adelante.

7.1.1 Tiempo promedio de apertura y cierre: Actualmente los invernaderos de la empresa de Elite Flower cuentan con un sistema de cierre de las cumbreras conocido como ductos. Este es un sistema ventilación forzado el cual implementa ventiladores para refrigerar el invernadero, pero cuando la temperatura desciende utilizan este tipo de ventiladores para inflar una capa de plástico de polietileno (PE) ubicado en toda la cumbrera del invernadero, el cual cuando se infla por completo cubre toda la cumbrera logrando mantener y estabilizar la temperatura ideal para las plantas.

Para una mejor comprensión del sistema de ductos se toma un registro fotográfico de cuando el sistema cierra la cumbrera del invernadero, es decir cuando infla el plástico hasta que cubra la cumbrera del invernadero, normalmente este proceso se realiza cuando llueve para que no ingrese humedad o cuando el invernadero se encuentra a una temperatura más baja de lo recomendado que por lo general es por debajo de los 18 °C.

Lo explicado anteriormente se ilustra en la Figura 2.

Figura 2. Sistema De Ductos Cerrado.



Fuente. El Autor

En la figura 3, se ilustra todo lo contrario que es cuando el sistema de ductos abre la cumbrera, donde podemos observar que el plástico se recoge y queda colgando, esa ubicación del plástico también es contra productiva ya que genera una sombra que para las plantas no es beneficiosa debido a que ellas necesitan de la luz solar para que tengan un crecimiento normal. Esta es otra razón por la cual la empresa está buscando otro sistema de apertura a cierre de las cortinas de la cumbrera.

Figura 3. Sistema De Ductos Abierto.



Fuente. El Autor

Otro problema del sistema de ductos es que tarda alrededor de 23 minutos en realizar la operación de cierre de la cumbrera, provocando que cuando el clima se torna lluvioso alcance a entrar mucha humedad en ese lapso de tiempo al invernadero provocando las enfermedades y propagación de insectos mencionados en un principio.

Por otra parte, el sistema de ductos tiene otra desventaja ya que requiere que los ventiladores se encuentren funcionando las veinte cuatro horas del día ya sea para refrigerar el interior del invernadero o para mantener cerrado el ducto, lo cual conlleva a un alto consumo de energía para la empresa.

7.1.2 Variación de la humedad relativa y temperatura: La temperatura normal a la cual debería mantenerse los invernaderos para no detener o ralentizar el crecimiento y afectar la calidad de las flores es de 18-24 °C en el transcurso día, y de 15-17°C en la noche.

Por otro lado, la humedad relativa ideal que debería conservar los invernaderos para que no afecte en el proceso fisiológico o apariciones de enfermedades fúngicas de la planta es de un **60-80 %**.

Según el mapeo que ha realizado Elite Flower a sus invernaderos han notado que en épocas lluviosas, debido al tiempo que tarda en cerrar los ductos, las cumbreras de los invernaderos. Han logrado registrar datos en algunos casos de un **90%** de humedad relativa pero el promedio registrado es de **86%**, demostrando el interés que tiene Elite Flower por este proyecto de cambiar el sistema de ductos.

7.1.3 Incidencia De Plagas y Enfermedades: Existen una gran variedad de enfermedades asociadas a las plantas cuando estas son expuestas a un ambiente con exceso de humedad. Según lo expuesto por la empresa las que suelen presentarse son:

Botritis cinérea y Oidium spp, los cuales son uno hongos que aparecen debido al exceso de humedad, según los estudios realizados por García y Muñoz (2021) "este es un patógeno muy extendido, especialmente en cultivos los cuales provocan descomposición blanda y necrólisis en las flores, estos hongos se logran identificar por ser de color gris o marrón".

Figura 4. *Botrytis cinérea* y *Oidium spp.*



Fuente. HERBARIO VIRTUAL. CÁTEDRA DE FITOPATOLOGÍA. FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES. Tizón de la flor del Rosal (*Botrytis cinerea*) [Ilustración y Texto]. Buenos Aires, Argentina, 2025. Disponible en: https://herbariofitopatologia.agro.uba.ar/?page_id=3262. [Consultado el 10 de diciembre de 2025].

7.2. INVESTIGACIÓN Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

Después de llevar a cabo una revisión bibliográfica y técnica sobre sistemas de control de microclima en invernaderos, con énfasis en mecanismos de cortinas plegables. Se determinó que la mejor opción en términos de viabilidad técnica, costo y adaptabilidad a las condiciones de Elite Flower. para la empresa es el sistema conocido como (Roller).

El sistema (Roller) como su palabra en inglés lo define, funciona enrollando y desenrollando con ayuda de un tubo una capa de plástico, en este caso la cortina que recubre la cumbrera del invernadero, este sistema puede ser manual es decir que trabaje por medio de manivelas o cadenas, pero también puede ser implementado de forma automática o sea con motores eléctricos, según los objetivos y lineamientos de la empresa, utilizar los motores eléctricos es la mejor opción.

Figura 5. Sistema Roller Manual.



Fuente. AMAZON.COM, INC. Invernadero enrollable autobloqueante enrollador ventilación [Fotografía]. Seattle, EE. UU., 2025. Disponible en: <https://www.amazon.com/-/es/invernadero-enrollable-autobloqueante-enrollador-ventilaci%C3%B3n/dp/B0C81FSD1S>. [Consultado el 10 de diciembre de 2025].

El sistema roller se escoge también, porque lo que la empresa busca en un futuro es integrar los motores eléctricos con la tecnología de comunicación inalámbrica de alto alcance conocida como LoRa. Pero por el momento la intención es controlar estos motores con un selector de 3 tiempos, el cual permitirá abrir, cerrar y detener el motor, junto con el las cortinas del invernadero en el punto deseado.

7.3. DISEÑO DEL SISTEMA SELECCIONADO

En esta fase se desarrolló el diseño, estructural y mecánico de las cortinas plegables, el cual incluyó los siguientes aspectos:

7.3.1 Cálculo Del Par Torque Del Motor: La primera fase de este proyecto consistió realizar el cálculo del torque necesario que debe entregar el motor, para que logre abrir y cerrar la cortina del invernadero sin ningún tipo de inconvenientes.

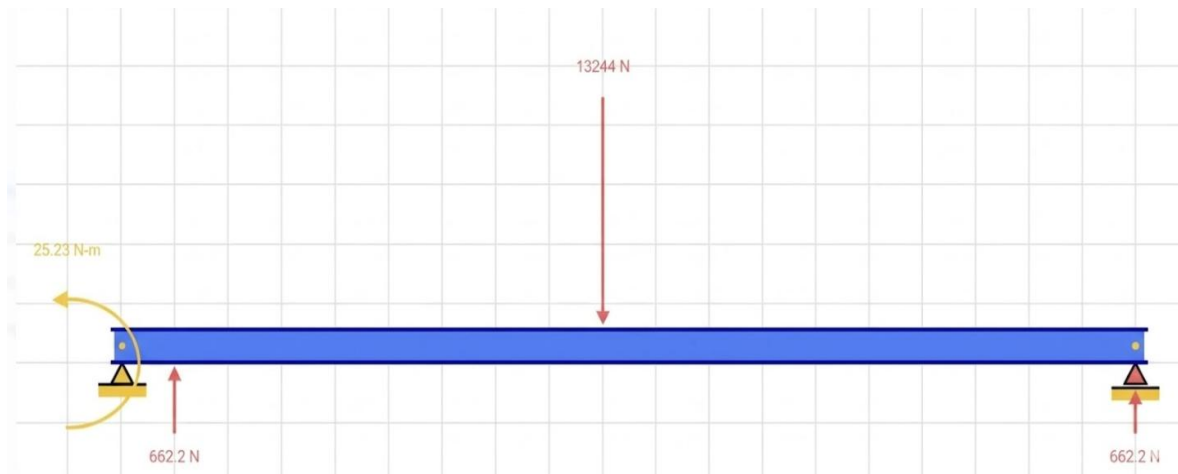
Para poder obtener el resultado del par torque mínimo que necesita el motor, es necesario conocer los siguientes datos los cuales se obtienen de las especificaciones técnicas otorgadas por la empresa.

- ✓ Masa del eje de las cortinas: 83,1 Kg
- ✓ Masa del Motor: 4 Kg
- ✓ Diámetro del eje de las cortinas: 0,0254 m

- ✓ Radio del eje de las cortinas: 0,0127 m
- ✓ Coeficiente de fricción del acero galvanizado: 0,35
- ✓ Coeficiente de fricción del polietileno: 0,2

El primer paso para el cálculo del torque del motor es identificar todas las fuerzas presentes en el sistema que se opondrán al movimiento del motor. En este caso son dos fuerzas, la fuerza normal la que se crea por la masa del eje y la fuerza generada por fricción. A continuación, se ilustra el diagrama de cuerpo libre para una mejor comprensión.

Figura 6 DCL Fuerzas Presentes Dentro Del Eje



Fuente. El Autor

En la Figura 6 se observa una carga puntual ilustrada de color rojo la cual hace referencia a la fuerza total, dentro de la figura también se observa el torque requerido que debe ejercer el motor para poder romper el momento de inercia, ilustrado de color amarillo. Los cálculos para identificar los valores mencionados anteriormente se encuentran a continuación.

- Fuerza Normal:

$$N = (Masa\ eje * g) + (Masa\ motor * g)$$

$$N = \left(83,1\ kg * 9.81\ \frac{m}{s^2}\right) + \left(4\ kg * 9.81\ \frac{m}{s^2}\right)$$

$$N = 854,45\ N$$

- Fuerza De Fricción:

$$F = (Cp \text{ Acero Galvanizado} + Cp \text{ Polietileno}) * \text{Fuerza Normal}$$

$$F = (0,35 + 0,2) * 854,45 \text{ N}$$

$$F = 469,95 \text{ N}$$

➤ Fuerza Total:

$$Ft = N + F$$

$$Ft = 854,45 \text{ N} + 469,95 \text{ N}$$

$$Ft = 1324,4 \text{ N}$$

A continuación, se procede con el cálculo del torque necesario para que el motor cumpla con el objetivo de abrir y cerrar las cortinas del invernadero sin dificultad ni inconvenientes.

➤ Torque:

$$T = (Ft * R \text{ eje})$$

$$T = 1324,4 \text{ N} * 0,0127 \text{ m}$$

$$T = 16,82 \text{ N.m}$$

"Se aplicó un factor de seguridad = 1.5 sobre el torque calculado, siguiendo las recomendaciones generales de Shigley (Diseño en Ingeniería Mecánica) para componentes dúctiles bajo condiciones de carga con incertidumbres moderadas. Este valor permite compensar efectos de desgaste a largo plazo y transitorios de carga (picos de torque derivados de fluctuaciones de voltaje), alineándose con los criterios de seguridad para transmisiones mecánicas donde se prevén choques menores (Budynas & Nisbett, 2015)."

➤ Torque Total:

$$T \text{ total} = T * 1.5$$

$$T_{total} = 16,82 \text{ N.m} * 1,5$$

$$T_{total} = 25,23 \text{ N.m}$$

7.3.2 Selección Del Motor: Conociendo el torque mínimo que debe tener el motor se procede a seleccionar el motor ideal que contribuya al éxito del proyecto, el cual debe cumplir con los siguientes requisitos.

- Motor Eléctrico DC.
- Tener alto par torque mínimo de 25,23 Newton metro.
- Alta Calidad.
- Buena Disponibilidad.
- Peso menor a 6 kg.
- Bajo consumo de energía para poder alimentarlo por energía solar.
- Debe resistir condiciones meteorológicas adversas.
- Alta relación entre calidad y precio.

Conociendo las especificaciones con las que debía cumplir el motor, el primer paso consistió en una búsqueda detallada de los diferentes tipos de motores eléctricos que se encuentran en el mercado que cumplan o se acerquen a los requerimientos anteriormente mencionados.

Luego de realizar la búsqueda se escogieron 3 diferentes motores eléctricos que cumplieran con los requerimientos necesarios. Para escoger el motor ideal o que mejor se ajustara a las necesidades de la empresa se realizó una matriz de decisión, donde se realizó una comparativa entre los requerimientos técnicos como los requerimientos de la empresa. La matriz se evaluó con un puntaje del uno al cinco de la siguiente manera:

Figura 7. Criterios De Evaluación.

CRITERIOS EVALUATIVOS	
5	Excelente
4	Bueno
3	Normal
2	Regular
1	Malo

Fuente. El Autor

Teniendo en cuenta los puntajes de evaluación, los resultados de la matriz de decisión fueron los siguientes:

Figura 8. Resultado matriz de decisión motor GMD100-S.

REQUERIMIENTOS DE LA EMPRESA	REQUERIMIENTOS TECNICOS					PRODUCTO		
	ALTO PAR TORQUE DEL MOTOR	CONSUMO DE ENERGÍA	RESISTENTE A CONDICIONES METEOROLOGICAS ADVERSAS	PESO DEL MOTOR	RPM DEL MOTOR			
						SUMATORIA	ÍNDICE PORCENTUAL	ELECCIÓN
CALIDAD DEL PRODUCTO	5	5	5	5	5	25	0,25	25 %
GARANTIA DEL PRODUCTO	4	4	4	4	4	20	0,2	20 %
COSTO DE ADQUICION	4	4	4	4	4	20	0,2	20 %
TIEMPO DE CIERRE DE LAS CORTINAS	3	3	3	3	3	15	0,15	15 %
DISPONIBILIDAD DEL PRODUCTO	3	3	3	3	3	15	0,15	15 %
						TOTAL	95 %	

Fuente. El Autor

Este motor eléctrico de referencia GMD100-S, posee un alto torque de 100 Newton por metro (N.m), tiene bajo consumo de corriente de 6 Amperios, otro punto a favor de este motor es que tiene integrado un interruptor de bloqueo muy preciso el cual permite detener el motor en la posición deseada en el trayecto de apertura y cierre de las cortinas. Para el proyecto de cortinas esto es muy útil ya que utilizando este motor no hay necesidad de adquirir otro componente o sensor extra e integrarlo al circuito para que detenga el motor en la posición deseada.

Una desventaja de este motor y por el cual no obtuvo el 100% de aprobación es por las revoluciones por minuto (RPM) a las que trabaja, debido a que este motor trabaja a 2,8 RPM.

Figura 9. Resultado matriz de decisión motor Worm Gear Motor 12V.

REQUERIMIENTOS DE LA EMPRESA	REQUERIMIENTOS TECNICOS					PRODUCTO		
	ALTO PAR TORQUE DEL MOTOR	CONSUMO DE ENERGÍA	RESISTENTE A CONDICIONES METEOROLOGICAS ADVERSAS	PESO DEL MOTOR	RPM DEL MOTOR			
						SUMATORIA	ÍNDICE PORCENTUAL	ELECCIÓN
CALIDAD DEL PRODUCTO	3	3	2	4	4	16	0,16	16 %
GARANTIA DEL PRODUCTO	3	3	2	3	3	14	0,14	14 %
COSTO DE ADQUICION	4	4	3	4	4	19	0,19	19 %
TIEMPO DE CIERRE DE LAS CORTINAS	4	4	3	4	4	19	0,19	19 %
DISPONIBILIDAD DEL PRODUCTO	3	3	3	3	3	15	0,15	15 %
						TOTAL		83 %

Fuente. El Autor

El motor **Worm Gear** es un motor con un alto torque, trabaja a cuarenta revoluciones por minuto, lo que lo hace el más veloz de los motores contemplados para el proyecto, otro punto a favor de este motor es que es el más económico.

El defecto que tiene este motor es por el alto consumo de corriente, pero además su alto consumo de corriente este motor a diferencia de los otros dos no cuenta con un interruptor de bloqueo. Lo que implica que se debe realizar una inversión extra para comprar un componente como un sensor que le indique donde detenerse al motor, esto también conllevaría a realizar un circuito más complejo.

Figura 10. Resultado matriz de decisión motor VEVOR.

REQUERIMIENTOS DE LA EMPRESA	REQUERIMIENTOS TECNICOS					PRODUCTO		
	ALTO PAR TORQUE DEL MOTOR	CONSUMO DE ENERGÍA	RESISTENTE A CONDICIONES METEOROLOGICAS ADVERSAS	PESO DEL MOTOR	RPM DEL MOTOR			
						SUMATORIA	ÍNDICE PORCENTUAL	ELECCIÓN
CALIDAD DEL PRODUCTO	4	4	3	4	4	19	0,19	19 %
GARANTIA DEL PRODUCTO	4	3	4	3	4	18	0,18	18 %
COSTO DE ADQUICION	4	4	3	4	4	19	0,19	19 %
TIEMPO DE CIERRE DE LAS CORTINAS	4	4	3	4	4	19	0,19	19 %
DISPONIBILIDAD DEL PRODUCTO	3	3	3	3	3	15	0,15	15 %
						TOTAL		90 %

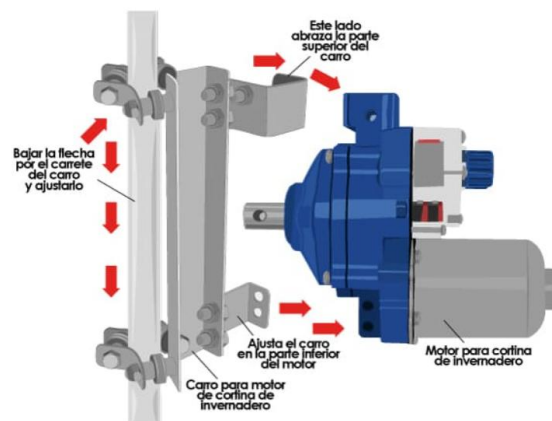
Fuente. El Autor

Por otro lado, el motor **Vevor** cuenta con características muy similares a las del motor GMD 100-S. Lo que los diferenciaba no eran sus características técnicas sino económicas ya que el motor Vevor era ligeramente más económico pero el problema con este motor era su disponibilidad ya que retrasaría mucho el proyecto.

Por estas razones y como se logra apreciar en las imágenes el motor que mejor cumple, tanto con los requerimientos técnicos del proyecto como los requerimientos demandados por la empresa es el motor **GMD100-S**.

Otro punto a favor del motor escogido es que este motor incluye el soporte diseñado por el fabricante, el diseño de este soporte cumple con el objetivo del proyecto ya que permitiría trasladar el motor en el riel guía. a continuación, se podrá visualizar un esquema detallado del soporte y su correcto ensamble con el motor.

Figura 11. Soporte Motor GMD100-S.



Fuente. TANUSSI. Ηλεκτρικό μοτέρ roll up DC 24V GMD100-S [en línea]. Tesalónica, Grecia: Tanussi, 2026. [consultado el 11 de marzo de 2026]. Disponible en: <https://tanussi.gr/%CF%80%CF%81%CE%BF%CF%8A%CF%8C%CE%BD/%CE%B7%CE%BB%CE%B5%CE%BA%CF%84%CF%81%CE%B9%CE%BA%CF%8C-%CE%BC%CE%BF%CF%84%CE%AD%CF%81-roll-up-dc-24v-gmd100-s/>

En la figura 11 se logran analizar detalladamente los componentes que conforman el soporte resaltando los rodamientos que son los componentes que permitirán la traslación del motor ya sea para abrir o cerrar las cortinas de la cumbre del invernadero.

Figura 12. Foto Soporte Motor GMD.



Fuente. El Autor

Tal y como se mencionó anteriormente el único defecto de este motor eran sus revoluciones por esta razón para poder tomar una decisión final fue necesario realizar el cálculo de cuanto se tardaría con este motor el proceso de apertura y cierre de las cortinas del invernadero. Los resultados fueron los siguientes:

- **Diámetro Del Eje:** 25,4 milímetros
- **Radio Del Eje:** 12,7 milímetros
- **RPM Motor:** 2,8 RPM
- **Altura Del Tubo:** 1,3 metros

Teniendo en cuenta las siguientes variables procedemos a realizar el cálculo:

- **Perímetro:**

$$P = \pi * D$$

$$P = \pi * 0,0254 \text{ m}$$

$$P = 0,079796 \text{ m}$$

- **Revoluciones En 1,3 Metros:**

$$N = \frac{1,3 \text{ m}}{0,079796 \text{ m}}$$

$$N = 16,3 \text{ Revoluciones}$$

- **Tiempo Por Recorrido:**

$$t = \frac{16,3 \text{ Rev}}{2,8 \frac{\text{Rev}}{\text{Minuto}}}$$

$$t = 5,8 \text{ Minutos}$$

Con el resultado anterior se espera que el motor seleccionado tardara casi seis minutos en abrir o cerrar las cortinas de la cumbrera del invernadero, comparándolo con el sistema de ductos que se utilizaba anteriormente se mejoró el tiempo del proceso en un 74 %.

Con los resultados anteriores se presentó el proyecto a la empresa demostrando los beneficios y la viabilidad del proyecto, y por esta razón decidieron aprobar el proyecto de diseño y construcción de cortinas plegables para invernaderos asimétricos.

7.3.3 Diagrama De Cuerpo Libre: A continuación, se logran apreciar todos los cálculos de esfuerzo que se le realizaron al eje de las cortinas, con la intención de identificar su comportamiento y predecir que el eje en ningún momento presentara fractura por fatiga, determinando que el eje sea el idóneo para soportar las diferentes cargas a las que se encontrara expuesto.

Para realizar los cálculos de los esfuerzos del eje fue necesario tener en cuenta los siguientes datos:

Figura 13. Especificaciones Del Eje De La Cortina.

Datos Obtenidos		
Material Del Eje	A. Galvanizado	
Densidad Del Material	7850	kg/m ³
Resistencia A La Fluencia	250000000	Pa
Diametro Exterior (De)	0,0254	m
Diametro Interior (Di)	0,0214	m
Radio Del Eje ®	0,0127	m
Longitud Total (L)	72	m
Par Motor	100	N*m

Fuente. El Autor

Con los datos anteriormente mencionados se ejecutaron las siguientes operaciones matemáticas:

➤ **Área Del Eje:**

$$A = \frac{\pi}{4} * (D^2 - d^2)$$

$$A = \frac{\pi}{4} * (0,0254^2 m - 0,0214^2 m)$$

$$A = 0,000147 m^2$$

➤ **Masa Del Eje:**

$$m = \rho * A * L$$

$$m = 7850 \frac{kg}{m^3} * 0,000147 m^2 * 72 m$$

$$m = 83 kg$$

➤ **Peso Del Eje:**

$$W = m * g$$

$$W = 83 kg * 9,81 \frac{m}{s^2}$$

$$W = 814,23 N$$

➤ **Peso Del Eje Por Unidad De Longitud:**

$$W_u = \frac{W}{L}$$

$$W_u = \frac{814,23 N}{72 m}$$

$$W_u = 11,31 \frac{N}{m}$$

- **Momento Flector Máximo:** En esta fórmula se utiliza la longitud de 4 metros en vez de los 72 metros debido a que el eje de las cortinas lo sostiene una serie de vigas simplemente apoyadas que se encuentran ubicadas cada 4 metros. Por esta razón se utiliza la fórmula que encontramos a continuación la cual es específicamente para vigas simplemente apoyadas con carga distribuida.

$$M = \frac{W_u * L^2}{8}$$

$$M = \frac{11,31 \frac{N}{m} * (4 m)^2}{8}$$

$$M = 22,62 N.m$$

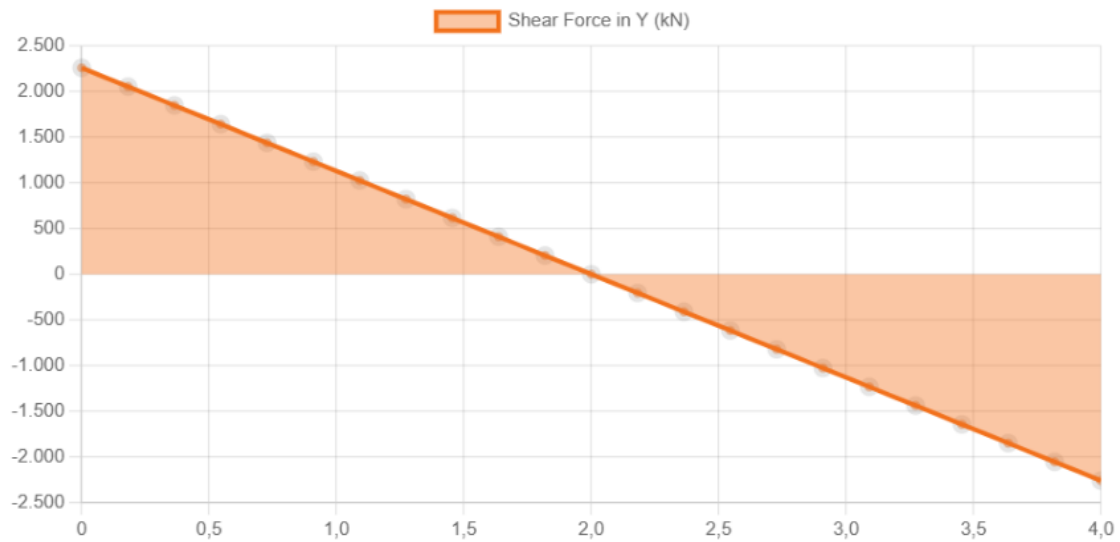
Para confirmar que los cálculos realizados hasta este punto eran correctos, se compararon los resultados con un programa gratuito conocido como SkyCiv, en el cual se logra apreciar los mismos resultados expuestos anteriormente confirmando la veracidad de los cálculos..

Figura 14. Diagrama De Cuerpo Libre Del Eje.



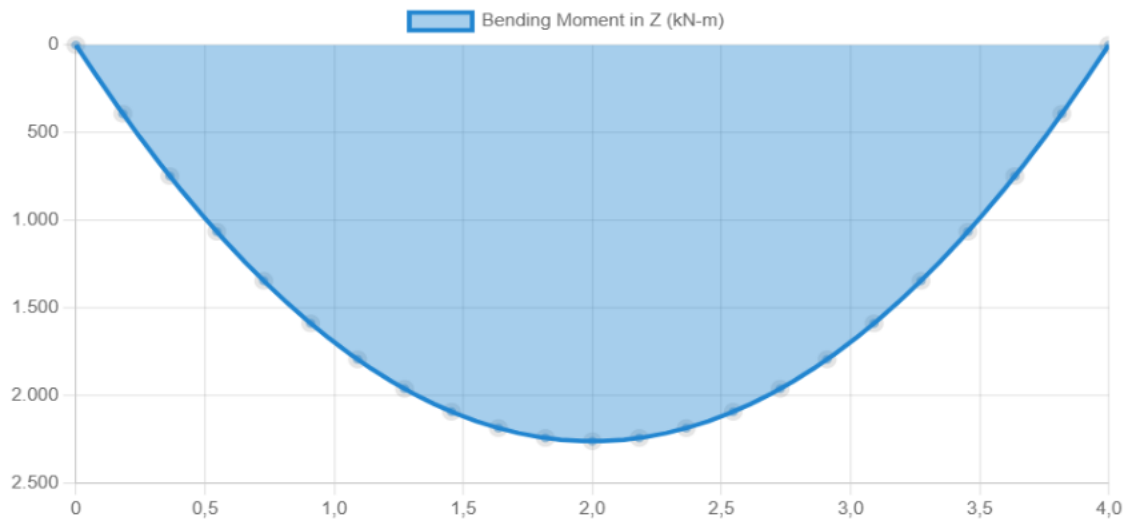
Fuente. El Autor

Figura 15. Diagrama Fuerza Cortante.



Fuente. El Autor

Figura 16. Diagrama Momento Flector.



Fuente. El Autor

➤ **Momento De Inercia De Área Eje Hueco:**

$$I = \frac{\pi}{64} * (D^4 - d^4)$$

$$I = \frac{\pi}{64} * (0,0254^4 - 0,0214^4)$$

$$I = 1,01367 \times 10^{-8} \text{ m}^4$$

➤ **Esfuerzo De Flexión:**

$$\sigma = \frac{M * C}{I}$$

$$\sigma = \frac{22,62 \text{ N.m} * 0,0127 \text{ m}}{1,01367 \times 10^{-8} \text{ m}^4}$$

$$\sigma = 28,33 \text{ MPa}$$

➤ **Momento Polar De Inercia:**

$$j = \frac{\pi}{32} * (D^4 - d^4)$$

$$j = \frac{\pi}{32} * (0,0254 \text{ m}^4 - 0,0214 \text{ m}^4)$$

$$j = 2,027 \times 10^{-8} m^4$$

➤ **Esfuerzo Cortante Por Torción:**

$$\tau = \frac{T * r}{j}$$

$$\tau = \frac{100 \text{ N.m} * 0,0127 \text{ m}}{2,027 \times 10^{-8} m^4}$$

$$\tau = 62,64 \text{ MPa}$$

➤ **Esfuerzo Von Mises:** Criterio de diseño utilizado para determinar si un material en este caso el eje de las cortinas cederá o se fracturará.

$$\nabla = \sqrt{\sigma^2 + (3 * \tau^2)}$$

$$\nabla = \sqrt{(28,33 \text{ MPa})^2 + (3 * (62,64 \text{ MPa})^2)}$$

$$\nabla = 112,13 \text{ MPa}$$

Como se logra observar que el resultado de la tensión de Von Mises es menor que el límite de fluencia del acero galvanizado, es correcto asumir que el eje no se fracturará.

➤ **Factor De Seguridad:** Siguiendo los lineamientos de diseño se calcula el factor de seguridad del eje, el cual para cargas estáticas nunca puede ser menor a 1 ya que esto significaría que el eje fallará, por otro lado, como el eje también estará expuesto a cargas dinámicas y a fatiga, lo recomendable en estos casos es que tenga un rango entre 2 y 2,5.

$$FS = \frac{\delta}{\nabla}$$

$$FS = \frac{250 \text{ MPa}}{112,13 \text{ MPa}}$$

$$FS = 2,23$$

Se considero necesario realizar los cálculos de los esfuerzos principales presentes en el eje de las cortinas, para identificar esfuerzo máximo y el mínimo mediante el método del círculo de Mohr, los resultados fueron los siguientes.

➤ **Esfuerzo Promedio:**

$$\nabla \text{ prom} = \frac{\sigma}{2}$$

$$\nabla \text{ prom} = \frac{28,3 \text{ MPa}}{2}$$

$$\nabla \text{ prom} = 14,15 \text{ MPa}$$

➤ **Esfuerzo Cortante Máximo:**

$$\tau \text{ max} = \sqrt{(\nabla \text{ prom})^2 + (\tau)^2}$$

$$\tau \text{ max} = \sqrt{(14,15 \text{ MPa})^2 + (62,64 \text{ MPa})^2}$$

$$\tau \text{ max} = 64,18 \text{ MPa}$$

➤ **Esfuerzo Máximo:**

$$\nabla \text{ Maximo} = \nabla \text{ prom} + \tau \text{ max}$$

$$\nabla \text{ Maximo} = 14,15 \text{ MPa} + 64,18 \text{ MPa}$$

$$\nabla \text{ Maximo} = 78,33 \text{ MPa}$$

➤ **Esfuerzo Mínimo:**

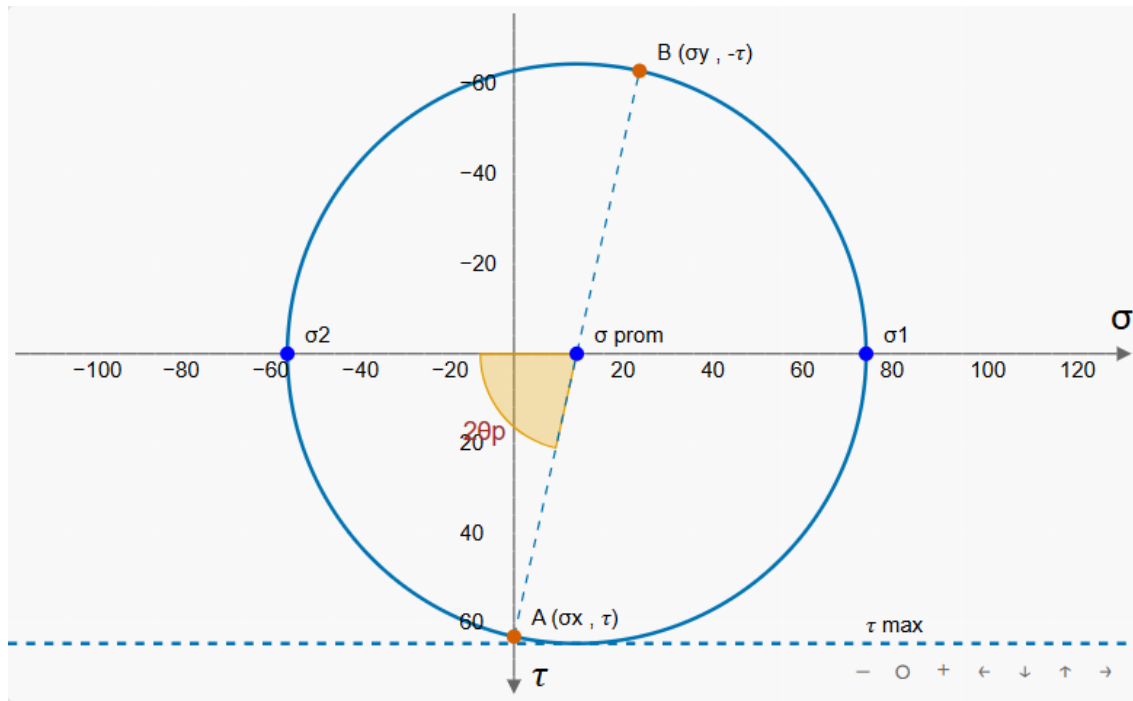
$$\nabla \text{ Minimo} = \nabla \text{ prom} - \tau \text{ max}$$

$$\nabla \text{ Minimo} = 14,15 \text{ MPa} - 64,18 \text{ MPa}$$

$$\nabla \text{ Minimo} = 50,03 \text{ MPa}$$

Para comprobar la veracidad de los cálculos realizado anteriormente se utilizó un simulado gratuito de internet conocido como ingeniería elemental- círculo de mor online. En el cual se agregaron los valores que obtuvimos en el esfuerzo de deflexión y el esfuerzo cortante por torción. Los resultados fueron los siguientes.

Figura 17. Diagrama Circulo De Mohr.



Fuente. El Autor

Como se puede analizar en la siguiente imagen los resultados del simulador son iguales a los resultados arrojados en las fórmulas, constatando que los cálculos anteriores eran correctos.

Figura 18. Resultados Circulo De Mohr Del Simulador.

σ_x :	Radio = τ_{max} :	σ_1 :
0	64,54	78,54
σ_y :	σ_{prom} :	σ_2 :
28	14	-50,54
τ_{xy} :	θ_{p1} :	
63	-38.74°	

Fuente. El Autor

Con estos resultados anteriormente expuestos se aplicó la fórmula de criterio de Morh-Coulomb

$$Fs = \frac{\delta}{\nabla \text{Maximo}} \\ 38$$

$$F_s = \frac{250 \text{ MPa}}{78,33 \text{ MPa}}$$

$$F_s = 3.19$$

Se utilizo el criterio de Morth-Coulomb como segunda opinión para comprobar que el eje de las cortinas sea seguro a pesar de las cargas a las cuales se someterá mientras realiza las operaciones de apertura y cierre en el sistema.

Terminado los cálculos del eje de las cortinas plegables continuo con el diseño que del carril que guiaría la traslación del motor en la apertura y cierre de las cortinas. El carril guía fue implementado por la empresa ya que tenían mucho material de un tubo de 1in ½ de acero galvanizado el cual se encontraba disponible en el almacén de la empresa.

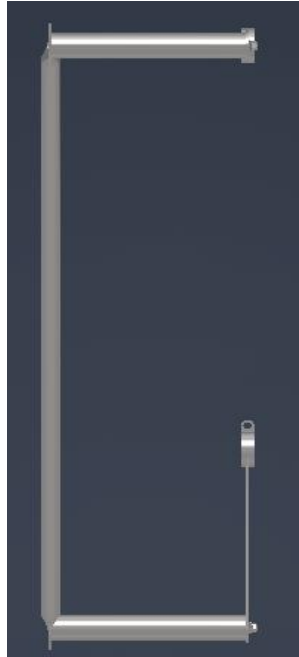
Seleccionado el tipo de perfil y material del carril guía que se utilizara para el proyecto, el reto se centraba en el diseño que acoplaría este tubo a la cumbrera del invernadero. El cual debe tener el mismo ángulo de caída que la cumbrera, conociendo esta limitante se daba por entendido que la mejor opción sería diseñar un herraje ensamblado a la cumbrera, logrando de esta forma que el carril guía se ubique paralelamente a la cumbrera. El diseño Propuesto fue el siguiente.

Figura 19. Vista Frontal Del Herraje.



Fuente. El Autor

Figura 20. Vista Lateral Del Herraje.



Fuente. El Autor

Para una mejor interpretación, del diseño del herraje la figura 21, muestra la vista isométrica donde se aprecia mejor el estilo y las piezas que lo conformar.

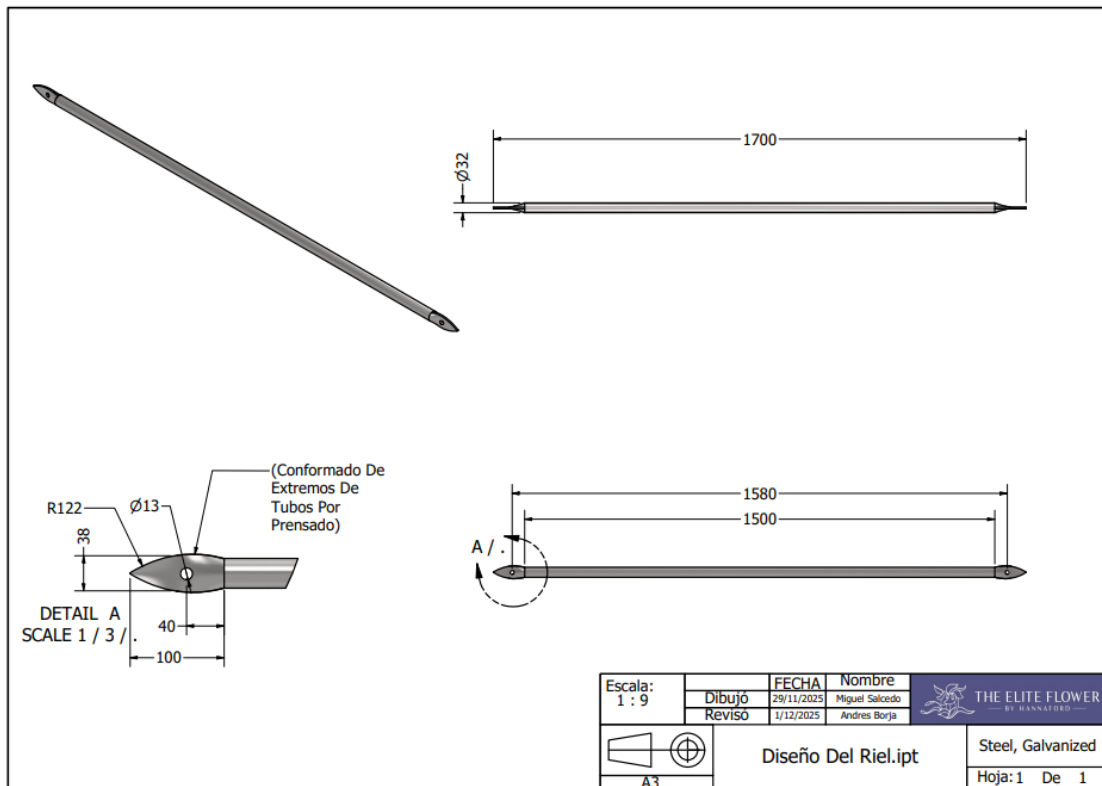
Figura 21 Vista Isométrica Del Herraje



Fuente. El Autor

El herraje diseñado está conformado por cinco piezas, las cuales son el riel, dos soportes fijos y dos bujes. A continuación, se mostrarán los planos de cada una de las piezas mencionadas anteriormente para una mejor comprensión del diseño.

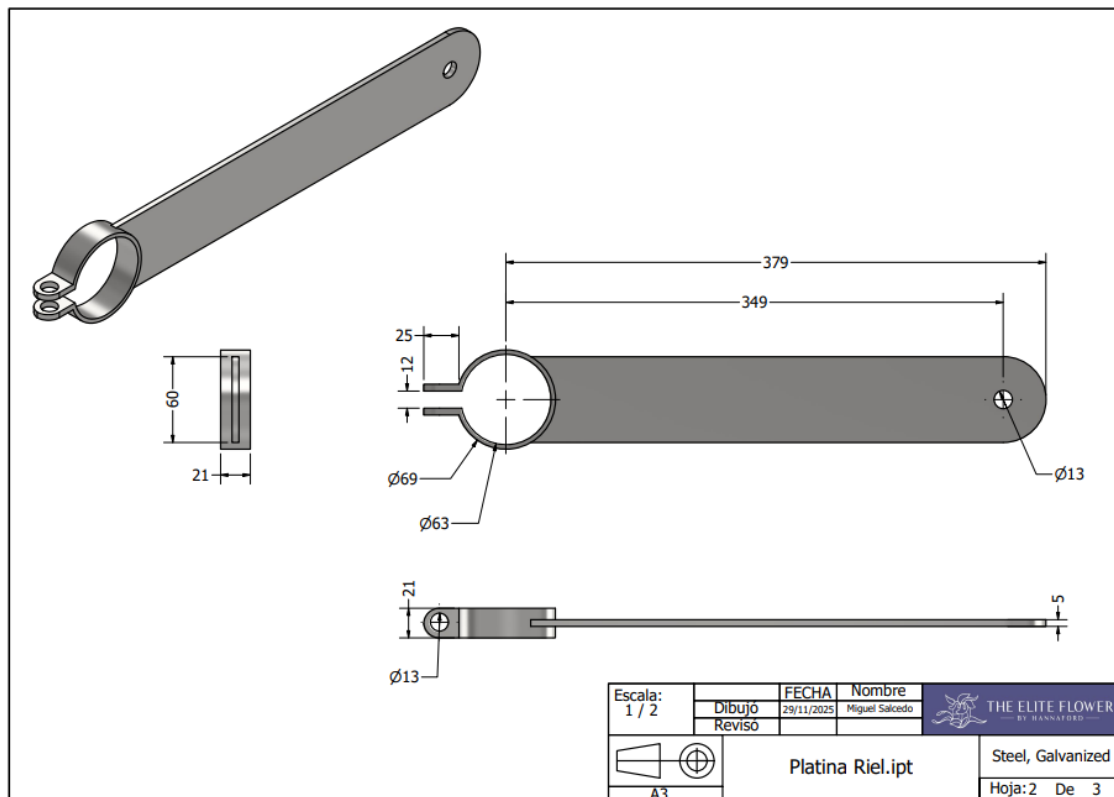
Figura 22 Plano Del Riel



Fuente. El Autor

El plano anterior nos permite identificar las medidas escogidas para el riel, el cual es un tubo de 1in $\frac{1}{2}$ con una longitud de 1,70 metros. A este tubo se le realizó un proceso conocido como, (tube end forming) conformado de extremos de tubo, el cual consiste en prensar las puntas del tubo formando una cara a cada extremo como se puede ver en la Figura 22, la geometría que caracteriza este perfil es del tipo extremo conificado y apuntado, por su nombre en inglés (Tapered And Pointed End), en esta sección del tubo se realiza la respectiva perforación que es donde atravesará el tornillo que unirá las dos piezas.

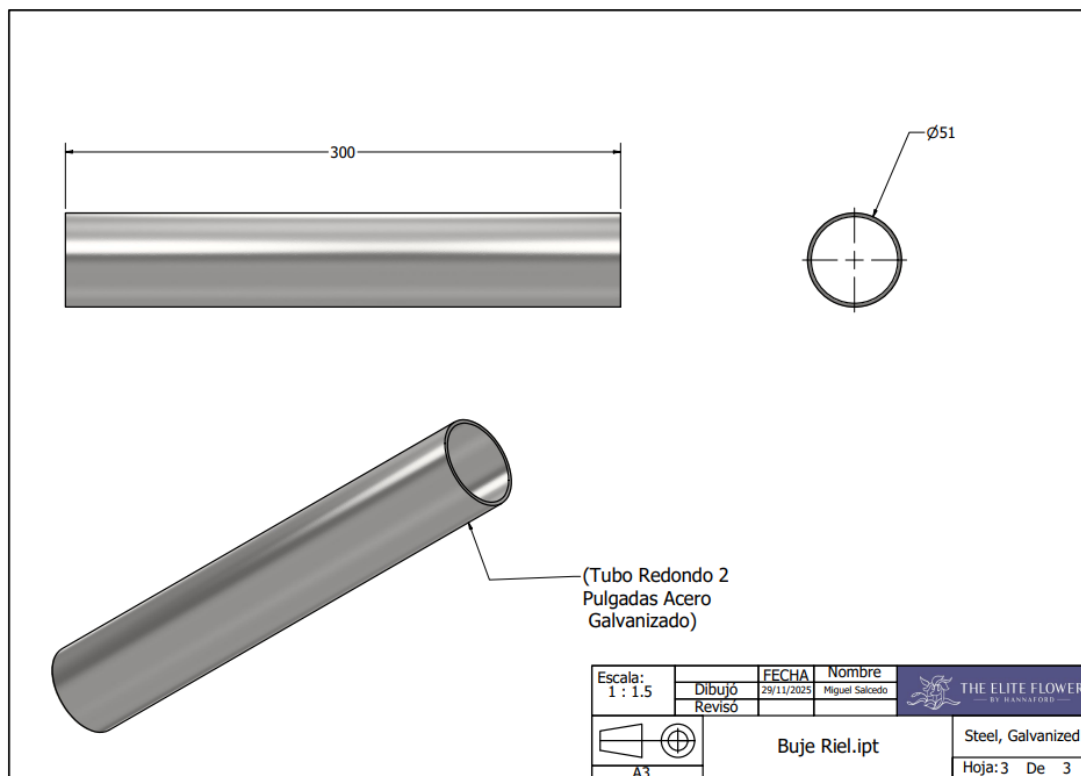
Figura 23 Soporte Fijo Del Riel.



Fuente. El Autor

En la figura 23, se muestra la pieza que permite ensamblar el herraje del riel a los tubos del invernadero utilizando el estilo de abrazadera, y por último al extremo de la platina se le realiza la respectiva perforación donde estará ubicado el tornillo, la platina tiene un calibre de $\frac{3}{16}$ de pulgada, para que esta sea lo suficientemente resistente a los esfuerzos a los que se encontrará expuesta.

Figura 24 Buje

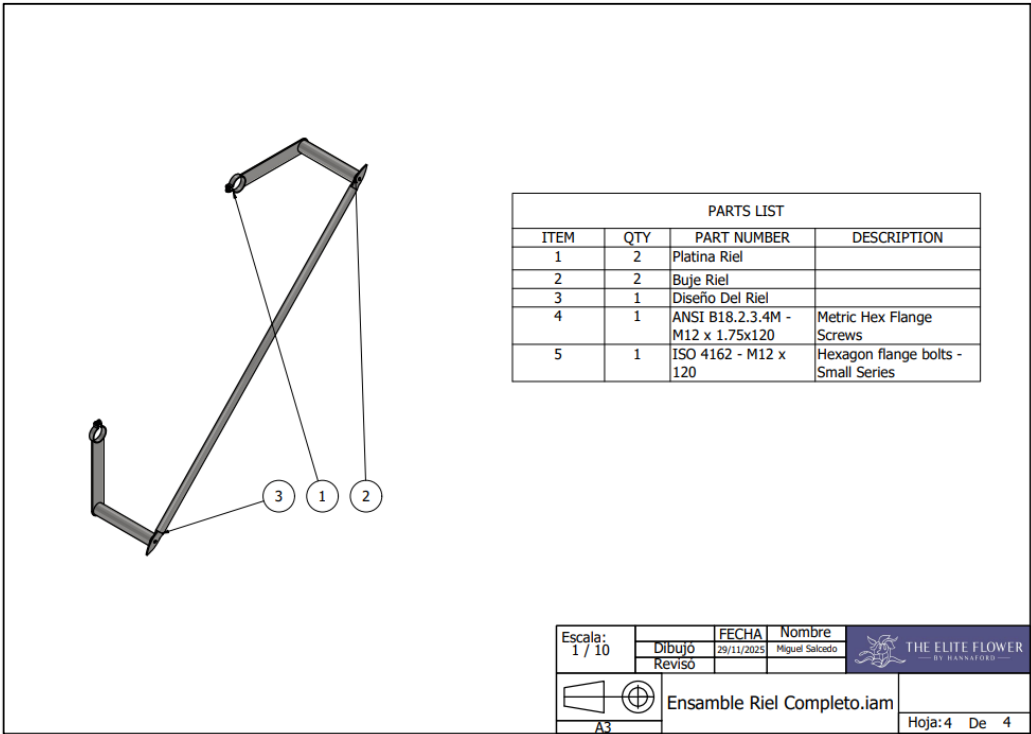


Fuente. El Autor

La última pieza que conforma el herraje del riel, es un buje, la función de esta pieza es el de distanciar unos centímetros el riel de la cumbrera, con la finalidad de dar el espacio suficiente para que el motor no se bloquee mientras se traslada por el riel realizando las diferentes operaciones de apertura o cierre de las cortinas.

En la figura 25 se puede apreciar detalladamente el ensamble completo del riel, ilustrando el número de piezas que conforman el riel y la correcta ubicación de cada pieza al momento de instalarse. La documentación detallada de este ensamble busca estandarizar el proceso de montaje dentro de la empresa, facilitando la ejecución correcta y previniendo desalineaciones que impactarían negativamente en el desplazamiento del motor y la integridad del riel.

Figura 25 Plano Lista De Partes

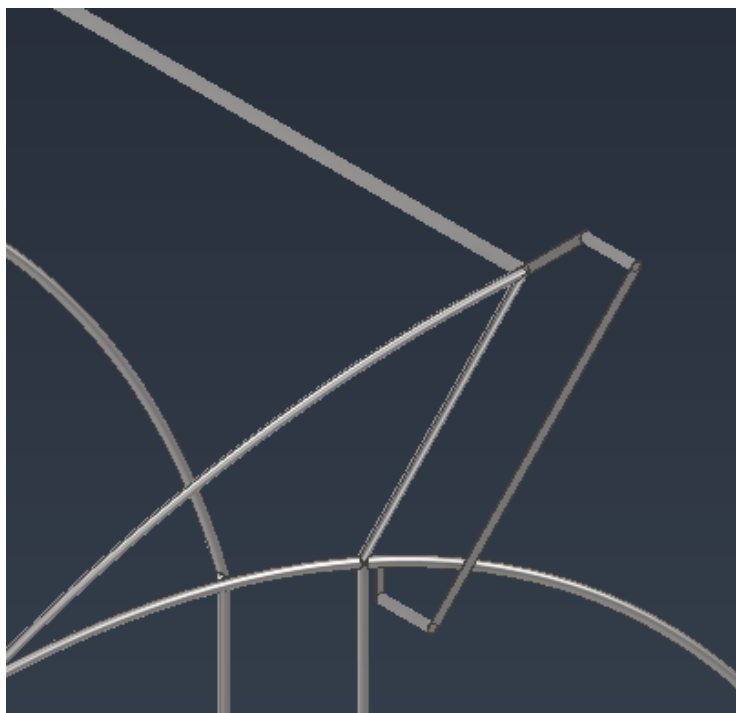


Fuente. El Autor

En la figura 26, se puede apreciar la ubicación exacta donde se ensamblará el herraje al invernadero, ilustrando el procedimiento adecuado de su instalación para los invernaderos isométricos traídos de Israel.

Como se mencionó anteriormente este se fijará a un extremo de la cumbrera de invernadero, debido a que en esta ubicación no se encontrará ninguna obstrucción en la trayectoria del motor, en ninguna de las dos fases propuestas las cuales son la apertura y cierre de la cumbrera, lo que permitiría cumplir con el objetivo y el correcto funcionamiento

Figura 26 Ubicación Del Herraje En El Invernadero.



Fuente. El Autor

Con diseño expuesto anteriormente, se cumple la meta de que el carril se alinee con el ángulo de inclinación de la cumbrera, que tienen los invernaderos isométricos fabricados en Israel, como lo demuestra la figura 24 el carril guía es paralelo a la cumbrera del invernadero.

Al diseño del carril fue necesario realizarle una simulación de elementos finitos, debido a que el carril cumple un papel importante que contribuye al éxito de este proyecto. Por esta razón se debía cerciorar de que el diseño sea lo suficientemente resistente, para que no se deforme bajo ninguna circunstancia mientras el motor se desliza por su superficie.

Para garantizar la veracidad de los resultados en la prueba de elementos finitos se definieron los siguientes parámetros para la configuración del modelo (FEA).

- **Condiciones De Frontera:** Se aplicó una restricción de soporte Fijo, dentro de las caras internas de los soportes laterales, simulando el anclaje del eje a la estructura. La carga se definió como un esfuerzo vertical 84,48 N, aplicada sobre el punto medio del riel.
- **Tipo De Elemento:** Se utilizó un elemento sólido Tetraédrico de segundo orden (10 nodos), definidos por una configuración de tamaño promedio de elemento de 0.1 respecto al diámetro del modelo, adecuado para capturar gradientes de esfuerzo en geometrías con curvaturas y perforaciones.
- **Mallado:** Se aplicó un factor de gradación de 1.5 con el fin de garantizar una transición adecuada de la malla en zonas de cambios geométricos. Por otro lado, el control de

mallla se configuro para un ángulo de giro máximo de 60 grados, permitiendo la representación de las superficies circulares del diseño y los alojamientos de los tornillos.

Para el correcto análisis de elementos finitos (FEA), se ubicó la magnitud del esfuerzo en toda la mitad del riel, es decir cuando las cortinas se localizan en la mitad de la cumbrera, se ubicó estratégicamente en este lugar debido a que en este punto es donde el motor se situara lo más lejos de los soportes fijos, los cuales sostienen toda la estructura. A causa de que el motor se ubique en esta posición, este les ejercerá el torque máximo a los dos soportes fijos, por esta razón en este punto es donde nos interesa conocer cómo se comportara el herraje ante este esfuerzo.

La magnitud del esfuerzo con la que se realizó el análisis de elementos finitos y con la que se cargó el programa fue el peso del motor el cual es de cuatro kilogramos sumados con el peso de los cuatro metros de longitud que pesa el eje, donde se obtuvo como resultado una fuerza de **84,48 N**.

Figura 27 Esfuerzo Von Mises Herraje

Von Mises Stress



Fuente. El Autor

El resultado anterior nos permite observar el valor máximo del esfuerzo de Von Mises, que como se puede observar es de 120,1 MPa, y el lugar de la ubicación donde se presentara este esfuerzo es exactamente donde se ubicara el tornillo que une el riel con el buje.

Siguiendo los criterios de diseño para estructuras mecánicas generales, como lo es en este caso los tornillos normalmente usados para este tipo de aplicaciones son de grado cinco (SAE), en el diseño el tornillo utilizado es de ½ pulgada, el material de estos tornillos es de acero medio carbono, los cuales son sometidos normalmente a tratamientos térmicos de templado y revenido. Por esta razón el límite de fluencia para un tornillo de esta medida es de 634 MPa.

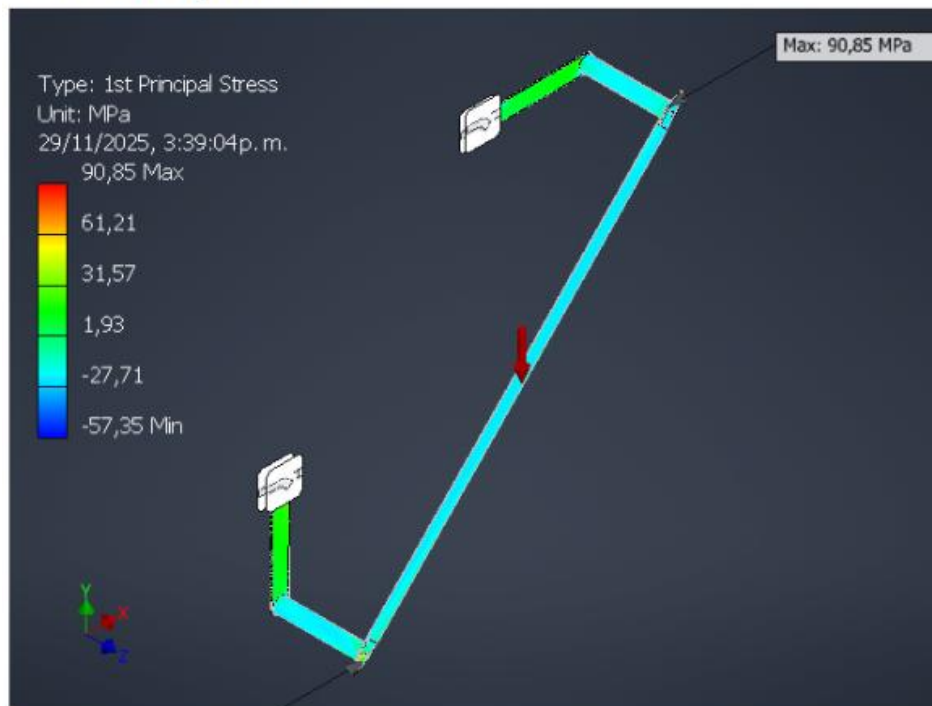
$$\text{Factor De Seguridad} = \frac{634 \text{ MPa}}{120,1 \text{ MPa}}$$

$$\text{Factor De Seguridad} = 5,27$$

Como se observó con el resultado anterior, utilizando tornillo de ½ pulgada grado cinco obtenemos un factor de seguridad de 5,27, lo que nos indica que el tornillo seleccionado es el idóneo para emplearlo en el diseño, evitando la necesidad de buscar un tornillo con un grado más alto, lo que haría más costoso el proyecto.

Figura 28 Tensión Principal Del Herraje

1st Principal Stress



Fuente. El Autor

En la imagen anterior es posible apreciar la sección del diseño donde se encontrará la primera tensión principal, esto nos permite identificar los esfuerzos de tracción que son los valores (positivos) y de compresión valores (negativos), la imagen resalta que el tornillo de ½ pulgada mencionado anterior es el esfuerzo principal dentro del herraje y será sometido a un esfuerzo

de tracción. Pero como se observó en el resultado del factor de seguridad el tornillo está calificado para resistir la magnitud de este esfuerzo.

En la figura 27, observamos donde se presenta la segunda tensión principal en el herraje del riel, pero también podemos observar a que tipo de esfuerzo se encontrará sometido el riel, debido a que es un valor positivo se interpreta que es un esfuerzo de tracción.

Además, se contempla que la ubicación de la segunda tensión principal se encuentra en el soporte fijo inferior del herraje, también se logra apreciar que es un esfuerzo que equivale a 10,6 MPa y el material del soporte es acero galvanizado, que como se analizó en los cálculos del eje este material tiene un esfuerzo a la fluencia de 250 MPa, por lo que se concluye que el diseño es apto para resistir este esfuerzo.

Figura 29 Segunda Tensión Principal Del Herraje

3rd Principal Stress



Fuente. El Autor

En la Figura 28, se observa el resultado del factor de seguridad de cada una de las piezas que conforman el herraje diseñado, donde se puede inferir, la mayoría de las piezas como lo son el carril y los bujes del carril tienen un alto factor de seguridad, como se observa en la imagen, el cual tiene un valor de 10.

Tal y como se observa en la imagen los soportes fijos tienen un factor de seguridad más bajo, obteniendo un valor de 6, lo que significa que de todas formas cumplen con las normas de

diseño las cuales indican que el factor de 2 es el requisito mínimo para garantizar la seguridad del diseño.

Figura 30 Factor De Seguridad Del Herraje

Safety Factor



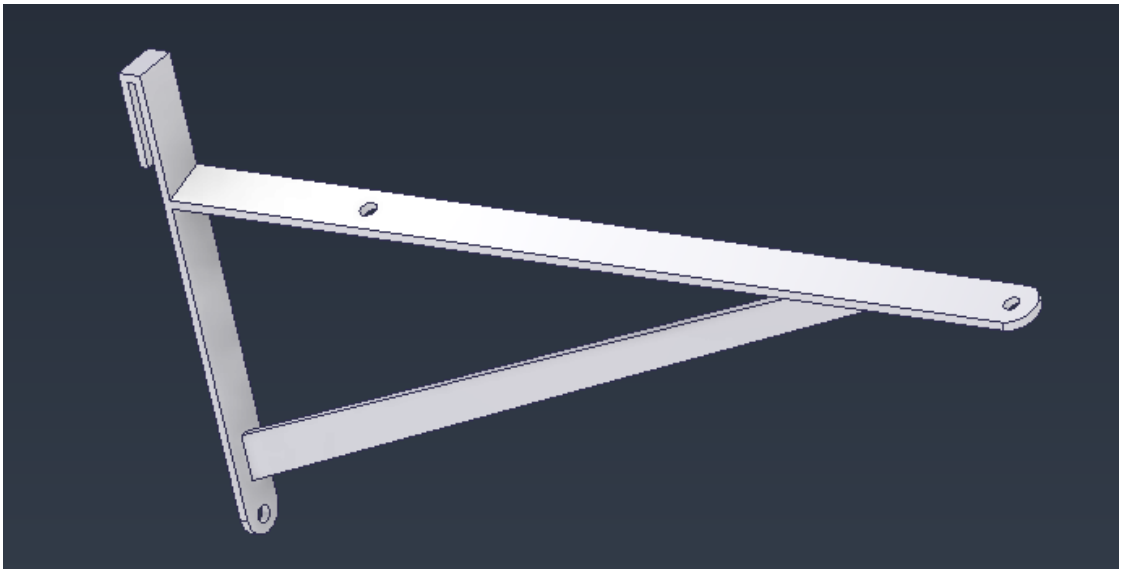
Fuente. El Autor

Con los resultados del análisis de elementos finitos, se concluye la viabilidad del herraje diseñado, corroborando que no llegará en ningún momento al fallo con las cargas y esfuerzos a los que se expone mientras el motor se traslada por el riel.

Continuando con los objetivos del proyecto, para el proyecto fue necesario realizar el diseño de un soporte para el panel solar que cargaría todo el sistema electrónico del proyecto, para el diseño del panel solar fue necesario tener en cuenta varias variables tales como:

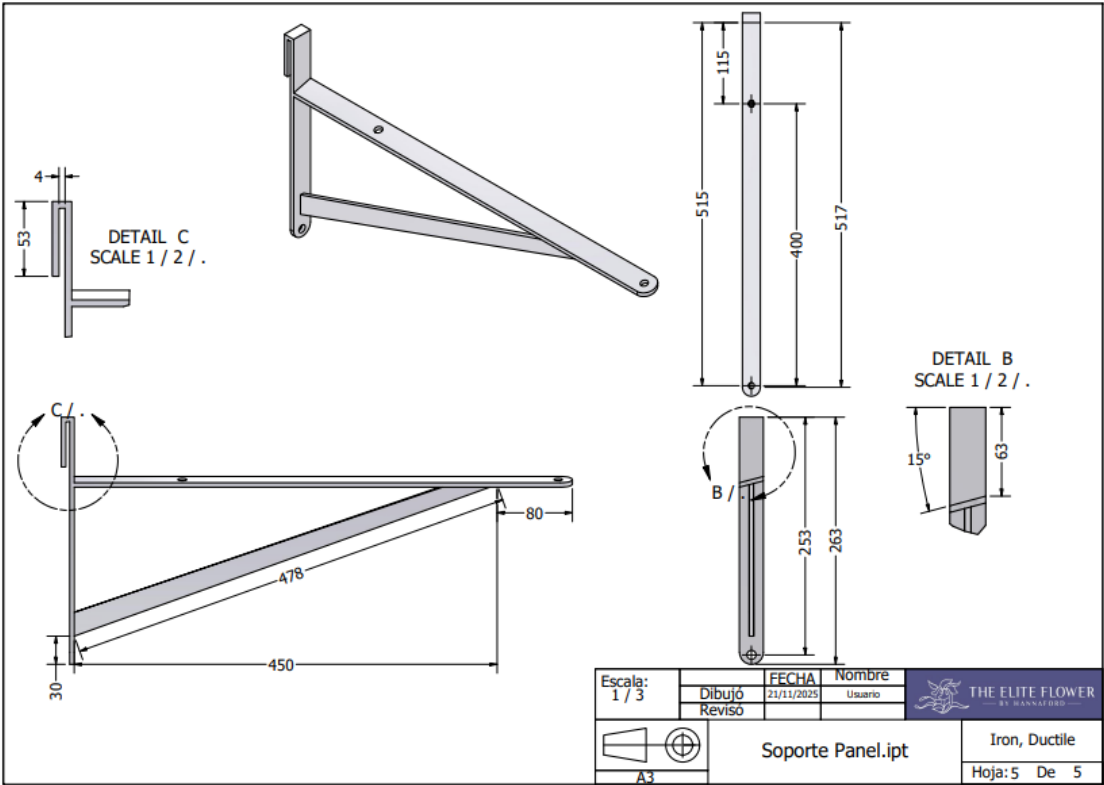
- Ubicación del soporte en el invernadero (Tolva De Desagüe).
- Peso Del Panel Solar (4 Kilogramos).
- Orientación de la línea del Ecuador (Sur)
- Angulo De Inclinación hacia la latitud del lugar (15 Grados).

Conociendo las variables mencionadas anteriormente el diseño ideal para que el panel solar trabaje a máxima eficiencia fue el siguiente:
Figura 31. Diseño Soporte Panel.



Fuente. El Autor

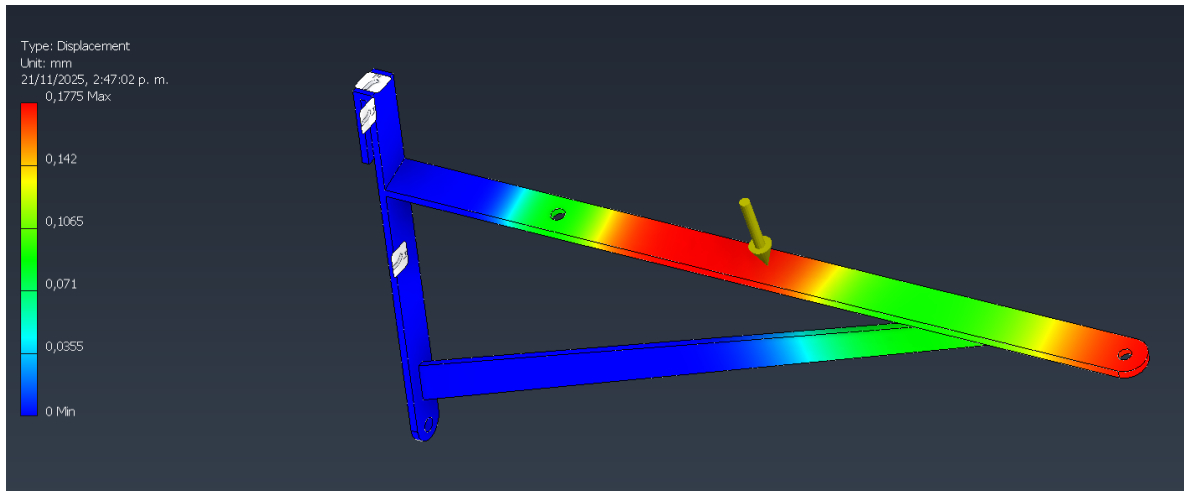
Figura 32. Plano Soporte Panel Solar.



Fuente. El Autor

Para conocer la viabilidad del soporte del panel solar se sometió a una simulación de elementos finitos por medio del software de inventor para conocer si este se dé flectaría y de paso determinar el factor de seguridad del soporte. Los resultados fueron los siguientes.

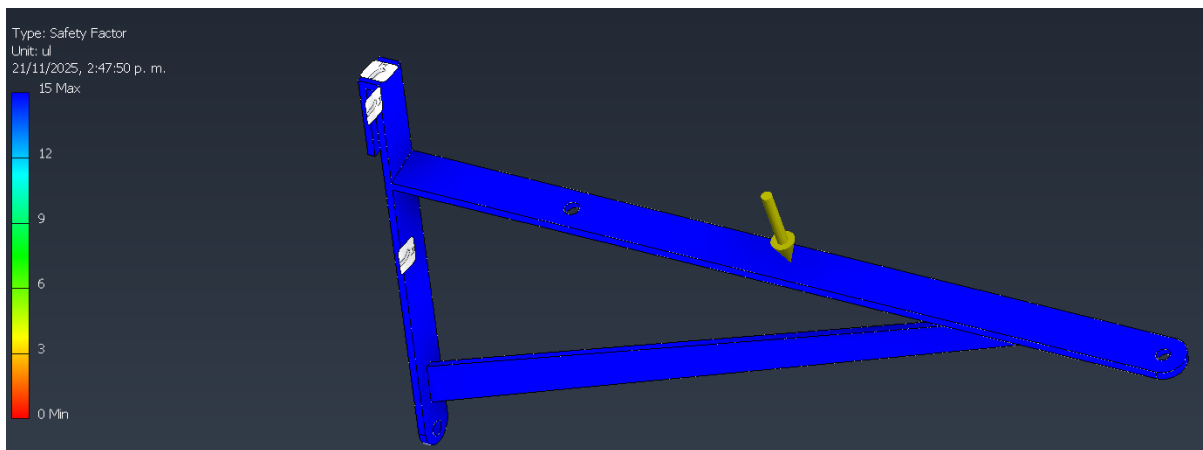
Figura 33 Análisis De Esfuerzos Por Deflexión



Fuente. El Autor

Tal y como se puede observar en los resultados, vemos que el soporte en el punto más crítico en el que se flectaría es 0,177 milímetros, basándonos en los criterios de diseño este valor indica una magnitud de deformación muy bajo cumpliendo con los requisitos de la aplicación específica.

Figura 34. Factor De Seguridad.



Fuente. El Autor

El resultado anterior se puede identificar el factor de seguridad del soporte del panel solar diseñado, el cual es de 1,5. "Este valor se justifica por los criterios de diseño mecánico de Shigley para materiales dúctiles como lo es en este caso el acero galvanizado con propiedades

mecánicas bien caracterizadas. Shigley (Budynas & Nisbett, 2015)." Ya que, aunque la estructura se encuentre expuesta a condiciones ambientales variables, el valor de 1,5 se considera suficiente debido a que:

- "La carga de viento y lluvia aplicada en el modelo corresponden a los valores máximos estadísticos según la normativa (ASCE, 2022)." Lo que ayudo a minimizar la incertidumbre de la carga externa.

7.4. AUTOMATIZACIÓN DEL SISTEMA

Este paso enfoco en el diseño del circuito que permitiría controlar el motor para que abra o cierre las cortinas del invernadero a conveniencia para controlar la temperatura y humedad relativa ideal para evitar la aparición de enfermedades fúngicas en la cosecha de flores.

Para este paso la empresa exigía que utilizáramos como cerebro de la operación el microcontrolador ESP32, seleccionado ya el microcontrolador procedimos a seleccionar los demás componentes que integrarían el circuito como el driver del motor, reguladores de voltaje, resistencias, capacitores, baterías y el panel solar.

Debido a que ya se conocían las especificaciones del motor el primer paso fue seleccionar la batería que mejor se ajustara a las necesidades, la batería debía contar con los siguientes requerimientos:

- Batería De 24V
- Mínimo de 10Ah
- Recargable
- Mínimo de 100w

Para la selección de la batería la empresa decidió contactar a uno de los contratistas de confianza al cual se le comento las intenciones del proyecto, el cual diseño una batería inteligente de litio 24v de 10Ah y recargable la cual se puede conectar directamente al panel y al motor. Por esta razón se empleó para el proyecto la batería que se observa a continuación.

Figura 35 Bateria Inteligente



Conociendo la batería a utilizar el siguiente paso consistió en elegir el panel solar capaz de cargar la batería anteriormente mencionada sin ningún inconveniente. Para la selección del panel se realizaron los siguientes cálculos:

Antes de realizar el cálculo es necesario obtener las horas sol pico (PSH) del lugar en este caso de la ciudad de Facatativá Cundinamarca, la cual tiene un promedio de horas sol pico de 4,9. "Esta información la obtuvimos de un anexo promedios mensuales de brillo solar para todas las estaciones del país realizado por el metro de Bogotá " (1).

Figura 36. Hora Sol Pico Facatativá, Cundinamarca.

Facatativá	Cundinamarca	4,82	-74,32	2570	6,0	5,0	5,0	4,1	4,4	3,9	4,3	4,8	4,7	4,4	5,2	6,5	4,9
------------	--------------	------	--------	------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Conociendo el promedio de las horas sol pico se realizó el cálculo de la potencia necesaria del panel solar que cargaría las baterías.

$$Potencia\ Panel = \frac{Energía\ Necesaria\ Diaria\ (Wh)}{Horas\ sol\ Pico * Eficicncia\ Del\ Sistema}$$

$$Potencia\ Panel = \frac{240\ Wh}{4,9\ h * 0,8}$$

$$Potencia\ Panel = 61,2W \approx \mathbf{60\ W}$$

Según lo calculado es necesario conseguir un panel de 60 vatios para que mantenga cargada la batería, pero debido a que el motor instalado en las cortinas del invernadero no va a trabajar permanentemente durante el transcurso del día sino máximo unas cinco veces en todo el día, se concluyó que el panel de 60 vatios estaría sobredimensionado para el proyecto.

Aunque el calculo preliminar se baso en un uso continuo teórico, se considero necesario realizar un análisis del perfil de carga real del sistema, debido a que el motor del invernadero operara máximo 10 ciclos durante en el trascurso del día, con una duración de 6 minutos cada ciclo. Por eso aplicamos la fórmula de energía Real Diaria.

$$E_{real} = (P_{motor} \times t \times N) + E_{reposo}$$

$$E\ real = (100\ W * 0,1h * 10) + 44\ W$$

$$E\ real = 144\ Wh$$

Gracias al resultado anterior vemos que el consumo real diario no es de 240 Wh sino de 144 Wh con este resultado se aplica nuevamente la fórmula para conocer la potencia del panel.

$$Potencia\ Panel = \frac{144\ Wh}{4,9\ h * 0,8}$$

$$Potencia\ Panel = 36,7W \approx \mathbf{40\ W}$$

Por esta razón se optó por utilizar un panel de 40 vatios, el cual cuenta con un área considerablemente menor al de 60 vatios, lo que favorecería su instalación en cualquier parte del invernadero. Por esta razón el panel solar para este proyecto fue el siguiente.

Figura 37. Panel Solar De 40 Watts.



Fuente. El Autor

Conociendo la ficha técnica del panel y las características de la batería era necesario calcular el tiempo que tarda el panel en cargar por completo la batería ya que este dato importante para proveer daño de la batería por sobre carga en un futuro.

$$Tiempo\ De\ Carga = \frac{Capacidad\ Total\ De\ La\ Bateria\ Wh}{Potencia\ Panel\ Solar\ W * HSP * Eficiencia}$$

$$Tiempo\ De\ Carga = \frac{240\ Wh}{40\ W * 4,9\ h * 0,8}$$

$$Tiempo\ DE\ Carga = \frac{240\ Wh}{156.8\ \frac{Wh}{Día}}$$

$$Tiempo\ DE\ Carga \approx 1.53\ Días$$

Con el resultado anterior se observa el panel para cargar la batería totalmente tardaría un día, 12 horas y 45 minutos. Pero como lo ideal es que el panel cargue la batería en todo momento y nunca la deje descargar ya que esto disminuiría drásticamente la vida útil de la batería.

Continuando con los lineamientos del proyecto comenzó el diseño del circuito que integraría todos los elementos mencionados anteriormente desde el panel, la batería, la ESP32 y el motor.

El siguiente paso consistió en escoger el módulo puente H ideal que se encargaría de controlar el sentido de giro del motor, para la elección de este era necesario que el puente H cumpliera con las siguientes especificaciones:

- Voltaje De Funcionamiento de 5 Voltios.
- Corriente nominal mayor a 10 Amperios.
- Frecuencia De Modulación por ancho de pulso (PWM) de 25 KHz.
- Gran disponibilidad en el mercado.
- Buena relación de calidad precio.

Realizando la búsqueda detallada se determinó que el puente H que mejor se ajustaba a las necesidades mencionadas anteriormente, es el puente H de referencia **BTS7960** el cual se puede observar a continuación.

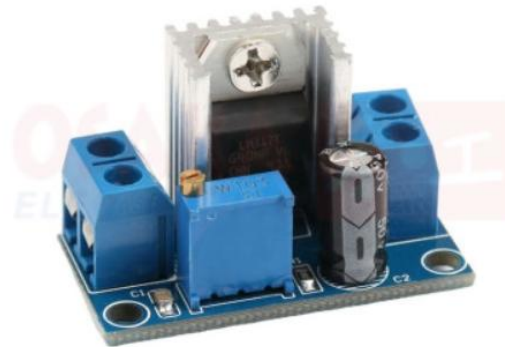
Figura 38. Modulo Puente H BTS7960.



Fuente. EPY ELECTRÓNICA BOLIVIA. Driver BTS7960 Puente H 43A [Fotografía]. Bolivia, 2025. Disponible en: <https://epyelectronica.com/tienda/drivers/driver-bts7960-puente-h-43a/>. [Consultado el 10 de diciembre de 2025].

Por último, para completar los componentes que conformarían el circuito es necesario seleccionar un regulador de voltaje, el cual se encargaría de enviar el voltaje de alimentación adecuado a la ESP32 y al módulo puente H, evitando que estos componentes se dañen, ya que estos reciben un voltaje de alimentación de 5 voltios y la batería genera 24 voltios. Por esta razón se escogió el modulo regulador de voltaje de referencia **LM317T** como el que se puede apreciar a continuación.

Figura 39. Regulador De Voltaje LM317T.



Fuente. BOTS. Módulo convertidor LM317 regulador de voltaje ajustable [Fotografía]. Bogotá, Colombia, 2025. Disponible en: <https://ja-bots.com/producto/modulo-convertidor-lm317-regulador-de-voltaje-ajustable/>. [Consultado el 10 de diciembre de 2025].

Teniendo en cuenta la operación que debía realizar el motor, su ubicación y sobre todo, que las personas que manipularían el sistema son los mismos recolectores de flores, se decide utilizar un selector de tres posiciones para manipular la apertura, paro y cierre de las cortinas de una forma sencilla y cómoda. Por esta razón se implementó el siguiente Selector dentro del circuito.

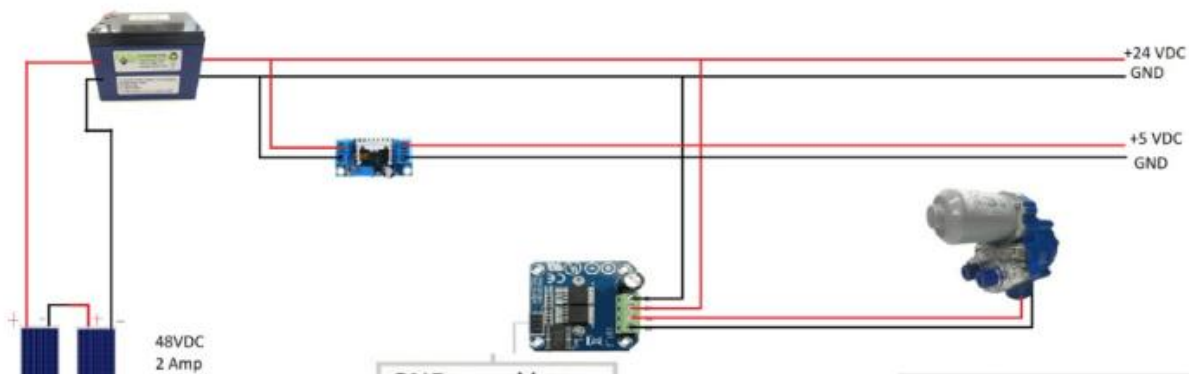
Figura 40. Selector De 3 Posiciones.



Fuente. OSAKA ELECTRONICS LTDA. Selector muletilla 22mm 3 posiciones metal [Fotografía]. Bogotá, Colombia, 2025. Disponible en: <https://osakaelectronicsltda.com/switches-pulsadores/switches-interruptores/selector-muletilla-22mm-3-posiciones-metal.html>. [Consultado el 10 de diciembre de 2025].

Conociendo todos los componentes que formarían parte del circuito se realizó un esquemático del circuito para utilizarlo más adelante como plano guía al momento de realizar las conexiones. Como se puede observar en la siguiente ilustración es como se definieron los pines a utilizar de la ESP32 y el orden de las conexiones del circuito que permitiría controlar el motor.

Figura 41. Plano Circuito.



Fuente. El Autor

Conociendo todos los componentes que integraran el sistema electrónico y que consumirán la energía de la batería se calculó a autonomía que tendría el sistema, para ello fue necesario calcular los vatios hora que genera la batería.

$$Wh = V * Ah$$

$$Wh = 24 \text{ V} * 10 \text{ Ah}$$

$$Wh = 240 \text{ Wh}$$

Para el cálculo de la autonomía del sistema se utilizó la siguiente formula.

$$Autonomia = \frac{Wh \text{ Batería}}{W_{esp} + W_{puente H} + W_{modulo regulador} + W_{motor}}$$

$$Autonomia = \frac{240 \text{ Wh}}{0.5 \text{ W} + 24 \text{ W} + 0.4 \text{ W} + 19 \text{ W}}$$

$$Autonomia = \frac{240 \text{ Wh}}{44 \text{ W}}$$

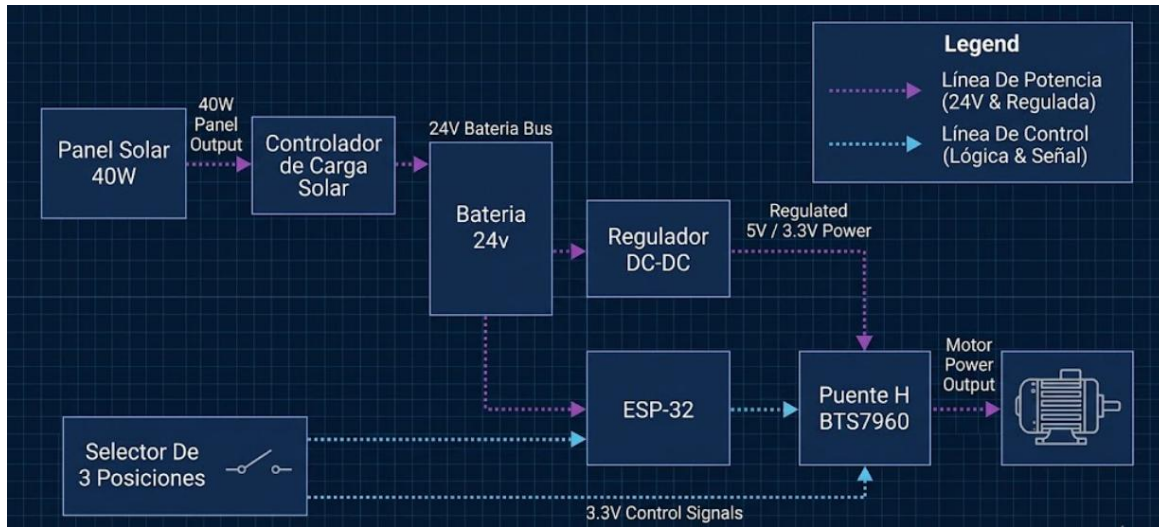
$$Autonomia = 5,5 \text{ Horas}$$

Según el resultado anterior el sistema tendría una autonomía de 5 horas y media aproximadamente, esto teniendo en cuenta que el motor se encontrara trabajando en todo momento, pero como este solo consumirá corriente mientras cierra o abre la cortina, el tiempo de autonomía seria aun mayor, con esto se pronostica que el sistema tendría una autonomía eficiente.

Después de definir los pines que se utilizarían de la ESP32, y el orden de las conexiones se dedujo que la mejor opción para integrar todos los componentes de forma ordenada, segura y efectiva, eliminando la posibilidad de generar corto circuitos o falsos contactos en el circuito, es diseñando una placa de circuito impreso (PCB).

Para este paso se diseñó un diagrama de control de bloques con la intención de esquematizar la arquitectura funcional del sistema, identificando la jerarquía y conexión entre los diferentes subsistemas, en este caso Potencia, Regulación y Control Lógico. Actuando como hoja de ruta que justifica la integración de componentes críticos.

Figura 42 Diagrama De Bloques.



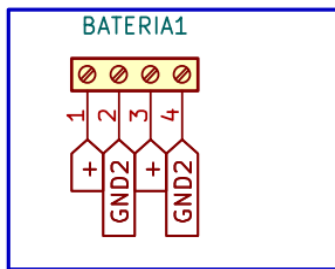
Fuente. El Autor

Una vez definida la selección de componentes y la arquitectura lógica, se desarrolló el **firmware** encargado de ejecutar las secuencias de operación del sistema conforme a los requerimientos técnicos establecidos. Este algoritmo de control permite la integración del hardware con las instrucciones de mando, garantizando que el comportamiento dinámico del prototipo se ajuste a la planificación de diseño. "La lógica de control que rige el comportamiento del microcontrolador ESP32 fue desarrollada en lenguaje C++ utilizando el entorno de desarrollo Visual Estudio Code. Este firmware gestiona las entradas digitales del selector de tres posiciones y genera las señales PWM necesarias para el puente H BTS7960, garantizando un control preciso sobre el sentido de giro y la velocidad del motor. Debido a su extensión y relevancia técnica, el código fuente completo, debidamente comentado, se ha incluido en el **Anexo [A]: Firmware del Sistema de Control**.

La placa del circuito impreso se diseñó por medio de programa Kicad, dentro del diseño de la (PCB) se le agregaron nuevos componentes, como borneras y regletas hembra con la intención de organizar las conexiones e integrar los componentes de forma rápida y sencilla. Evitando soldar todos los componentes a la placa, con la intención de llegado el caso se dañará un componente del circuito eludir el tedioso proceso de desoldar todo nuevamente, sino todo lo contrario simplemente cambiar el componente defectuoso.

Primero se diseñó el esquemático del circuito, donde se logra identificar todas los elementos y el orden de las conexiones que contiene el circuito para que funcione según lo planeado, a continuación, se puede apreciar el esquemático diseñado.

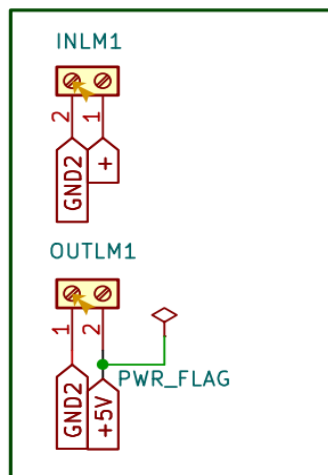
Figura 43. Conexiones Batería.



El componente BATERIA1 corresponde a la bornera de alimentación del circuito donde se conecta la batería que es la fuente de energía y la alimentación de 24V que necesita el puente H para energizar al motor.

Fuente. El Autor

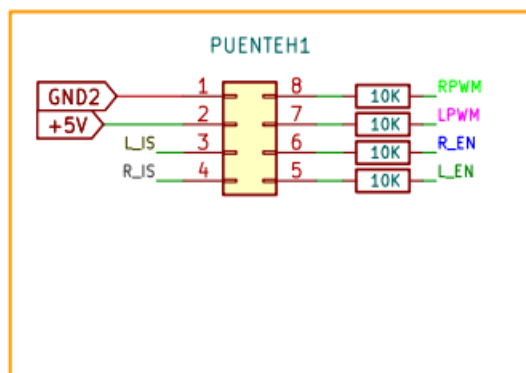
Figura 44. Conexiones Modulo Regulador.



Las borneras INLM1 y OUTLM1 simulan la entrada y salida del módulo regulador de voltaje LM317, al cual se le establece una salida de 5V para alimentar los componentes que operan con este voltaje. Por otro lado, el símbolo PWR_FLAG se utiliza para indicar cuales son las entradas y salidas del circuito.

Fuente. El Autor

Figura 45. Conexión Del Puente H.



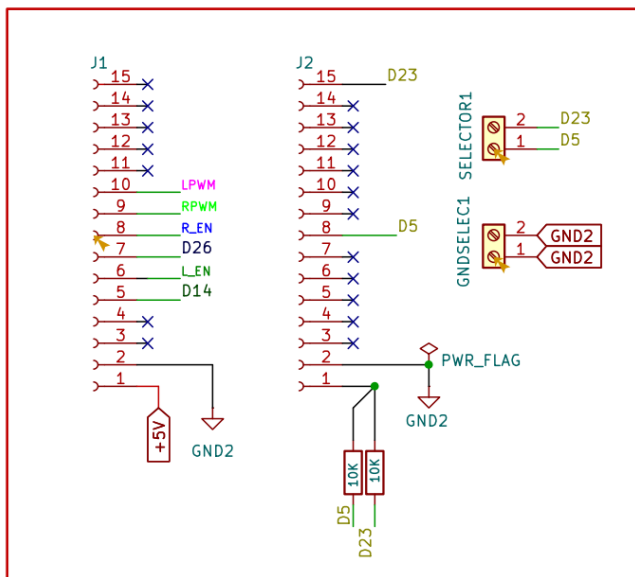
El componente PUENTEH1 simula el módulo puente H BTS7960, en él se alimenta la parte de control con 5V, cabe resaltar que las entradas digitales se protegen con resistencias en serie de 10K ohm para evitar picos de tensión inducidos.

Fuente. El Autor

En esta sección del circuito fue necesario agregar un filtro RC a las conexiones digitales del puente H, siguiendo las indicaciones del fabricante, se le conectaron resistencias de 10 kilo Ohms, y unos capacitores de poliéster de 564 faradios, como lo indica el en el data sheet.

El circuito RC diseñado en el circuito, es el encargado de permitir el paso de ciertas frecuencias mientras atenúa otra, actuando como un filtro paso bajo, el cual permitirá que pasen las frecuencias bajas fácilmente, mientras que las frecuencias altas las atenúa cortocircuitándolas a tierra. Esto es ideal para reducir el ruido de alta frecuencia en una señal, protegiendo los pines digitales a la entrada del puente H.

Figura 46. Conexión Pines De La ESP32.



En esta parte del esquema J1 y J2 representan las regletas donde se conectan los pines de la ESP32, los pines que aparecen con una X es porque no se utilizan. Hay que mencionar también que los componentes GNDSELECTOR1 Y SELECTOR1 indican los terminales donde se conecta GND y las señales del selector de 3 posiciones con el que se realiza el cambio del giro del motor. Por otra parte, las resistencias de 10K ohm que se visualizan son de pull-up que permiten solucionar los rebotes de los selectores mecánicos.

Fuente. El Autor

Diseñado el esquemático del circuito, el siguiente paso consistió en el diseño de las pistas que conectarían todos los elementos en la placa de circuito impreso, para el diseño de la placa de circuito impreso se tomó en cuenta la normativa (IPC 2220) la cual establece los estándares para aspectos de diseño de la PCB.

Siguiendo la norma IPC 2220 para un correcto diseño de la PCB fue necesario definir el ancho de las pistas en la cual se deben tener en cuenta varias variables tales como:

- Intensidad De La Corriente: 3 Amperios
- Intensidad De la Temperatura: 25 Grados Celsius

Conociendo estas variables, fue necesario guiarse de las tablas que en la norma expresan el ancho de las pistas ideal para evitar corrientes parasitas, y sobre calentamientos en la placa, tal y como podemos observar a continuación:

Figura 47. Ancho De Pistas PCB.

Temp Rise	10°C			20°C			30°C		
Copper	1/2oz.	1oz.	2oz.	1/2oz.	1oz.	2oz.	1/2oz.	1oz.	2oz.
Trace Width (:inch)	Maximum Current Amps								
0.01	0.5	1	1.4	0.6	1.2	1.6	0.7	1.5	2.2
0.015	0.7	1.2	1.6	0.8	1.3	2.4	1	1.6	3
0.02	0.7	1.3	2.1	1	1.7	3	1.2	2.4	3.6
0.025	0.9	1.7	2.5	1.2	2.2	3.3	1.5	2.8	4
0.03	1.1	1.9	3	1.4	2.5	4	1.7	3.2	5
0.05	1.5	2.6	4	2	3.6	6	2.6	4.4	7.3
0.075	2	3.5	5.7	2.8	4.5	7.8	3.5	6	10
0.1	2.6	4.2	6.9	3.5	6	9.9	4.3	7.5	12.5
0.2	4.2	7	11.5	6	10	11	7.5	13	20.5
0.25	5	8.3	12.3	7.2	12.3	20	9	15	24

Table 1 Carrying Capacity per mil std 275

Fuente. OURPCB. Rastro de PCB — La Importancia de Los Rastros de PCB en Los PCB [Artículo en línea]. Disponible en: <https://www.ourpccbar.com/rastro-de-pcb.html>. [Consultado el 10 de diciembre de 2025].

Tal y como se pude apreciar en la imagen anterior, se observa que el ancho de la pista que se ajusta a las variables presentes en el proyecto es de 0,075 pulgadas, lo que equivale a 1,9 milímetros, por esta razón las pistas que conectan todos los componentes de la PCB manejan este tipo de grosor.

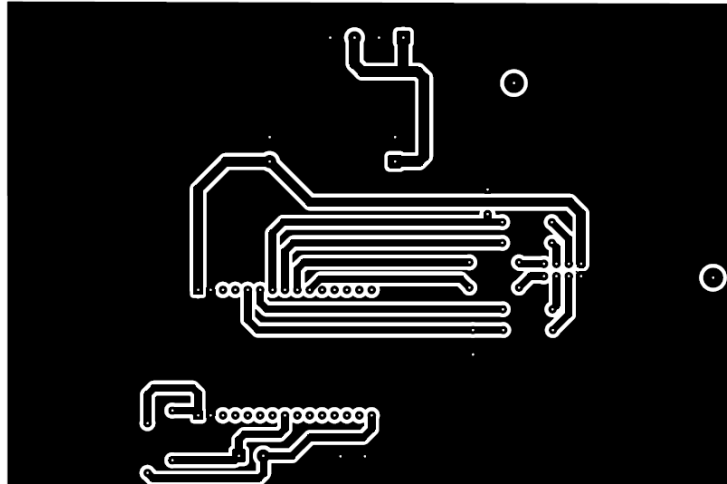
Otro factor importante que hay que tener en cuenta al momento de diseñar una PCB es la separación entre pistas, según la norma IPC 2220 nos especifica que esta separación no pude ser menor al ancho de las pistas, pero lo recomendable que sea del doble del ancho de las pistas, ya que esto evita interferencias dentro del circuito.

Por último, según la noma es esencial que dentro del diseño de la PCB se agregue una tierra em común o como la norma lo llama un (Ground Plane), esto trae muchos beneficios para la efectividad del circuito como:

- Punto De Referencia Estable.
- Camino De Retorno De Baja Impedancia.
- Reducción De Interferencias Electromagnéticas.
- Buena Gestión térmica.

Teniendo en cuanta todas las recomendaciones de la norma IPC 2220 y aplicarlas, el diseño final de la placa del circuito impreso es el siguiente:

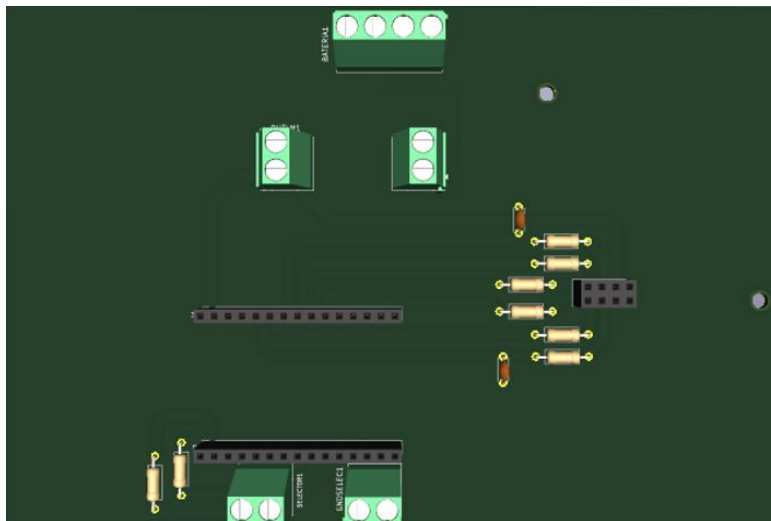
Figura 48. Diseño De La PCB.



Fuente. El Autor

Una opción muy útil que tiene el software de KiCad es que se puede ver el diseño de la placa en 3D, esto es una herramienta supremamente útil ya que permite visualizar el diseño y de esta manera identificar si hay algún error o por lo contrario si el diseño concuerda con lo planeado, tal y como se puede observar a continuación:

Figura 49. Modelo 3D PCB.



Fuente. El Autor

Finalizado el Diseño de la PCB estaría completa la etapa de diseño del proyecto, lo que significa que el siguiente paso es la construcción, donde se pondrán a prueba los diseños expuestos durante esta etapa y de esta manera identificar la veracidad de todos los cálculos anteriormente realizados.

7.5. CONSTRUCCIÓN Y PRUEBA PILOTO

El diseño se construyó como prototipo a tamaño escala para posteriormente instalarlo en un módulo representativo de invernadero. Se puso en funcionamiento para observar su desempeño frente a las condiciones actuales.

El primer paso de la etapa de construcción consistió en la fabricación del diseño del soporte del panel solar y al mismo tiempo el soporte de la caja IP que contendría todos los componentes electrónicos.

La Figura 49 muestra el soporte del panel solar tras su fabricación, destacando la inclinación precisa de 15° en la superficie de ensamble. Esta configuración geométrica, orientada permanentemente hacia el sur, tiene como objetivo maximizar la eficiencia del módulo durante las cuatro horas de sol pico (HSP) registradas en la ubicación del proyecto, optimizando así la captación de irradiación.

Figura 50. Soporte Del Panel Solar.



Fuente. El Autor

Figura 51. Soporte Caja IP.



Fuente. El Autor

Como se puede observar en las imágenes anteriores de los soportes es decir la figura 49 y 50, se consideró pertinente después de su fabricación realizar un recubrimiento con una capa de pintura anticorrosiva, debido a que en el lugar que se ubicaran quedarán expuestos a un ambiente corrosivo, por esta razón es necesario aplicarles este tipo de recubrimientos para protegerlos y alargar su vida útil.

Terminada la fabricación del soporte del panel solar, se ensambló al invernadero en el punto estratégico ideal donde este aprovecharía al máximo las horas sol pico de la zona para que trabaje a su máxima eficiencia, y logre mantener la batería con la carga correspondiente, sin tener afectaciones más adelante por caídas de tensión lo que representaría un problema para el proyecto en un futuro.

Figura 52. Instalación Del Panel Solar.



Fuente. El Autor

Instalado el panel solar, se acoplo el eje de las cortinas, para este paso se siguieron al pie de la letra las indicaciones del fabricante, el cual especifica que hay que envolver el eje dándole tres vueltas con el plástico asignado para la cortina, y cerciorase de que este paso se cumpla a lo largo de todo el eje, para que esta medida no se pierda y se desalineee le eje con el tiempo o con el movimiento de operación, se acoplan unos gancho plástico a lo largo del eje , los cuales le ejercen una presión al plástico contra el eje.

Figura 53 Clip Para Tubos De Invernadero



Fuente. El Autor

Después de asegurarnos de la correcta instalación del eje de las cortinas. El siguiente paso fue instalar el motor con su soporte y el carril guía, este paso requirió una gran precisión ya que todos los componentes debían quedar alineados con la cumbrera del invernadero, para que no se presentaran esfuerzos no deseados en el eje de las cortinas que generaran bloqueos en la traslación del motor o aún peor llegaran a provocar un accidente. Debido a que cuando el carril guía y el motor no se alineaba correctamente, el eje de las cortinas se flexa. En la siguiente imagen se puede ver el resultado.

Figura 54. Incorrecta Alineación Del Motor y El Carril Guía.



Fuente. El Autor

A continuación, se ilustrará por medio de una imagen la instalación final del motor junto a su soporte y el carril guía con la correcta alineación donde se puede apreciar la diferencia con la imagen anterior ya que el eje de las cortinas permanece totalmente recto.

Figura 55. Correcta Alineación Del Motor Y Carril Guía.



Fuente. El Autor

Por esta razón este paso tiene un grado de dificultad muy alto sobre todo por lo que es un trabajo en alturas. Pero en la correcta alineación de los componentes se encuentra el éxito de la operación para que el motor trabajara según lo planeado y cumpliera con los objetivos del proyecto.

Finalizadas las instalaciones mencionadas anteriormente, el proyecto empezaba a tomar forma y un aspecto visual muy llamativo, como se puede observar en la siguiente imagen.

Figura 56 Instalación Completa Del Motor Y El Panel Solar



Fuente. El Autor

Construidos todos los elementos mecánicos del sistema, se procede con el diseño del circuito electrónico, para la fabricación del circuito el primer paso consistió en imprimir el circuito diseñado en la placa, para ello se utilizó papel fotográfico, ácido clorhídrico y los demás componentes electrónicos mencionados en la etapa de diseño.

Después de haber impreso el diseño de la placa en el papel fotográfico se procedió a planchar el circuito en la placa, este proceso tarda alrededor de 6 minutos para obtener el resultado deseado. Terminado este proceso el siguiente paso es sumergir la placa dentro de agua para quitar los residuos del papel fotográfico y que en la placa solo se noten las pistas del circuito.

Figura 57. Proceso De Planchado Del Circuito.



Fuente. El Autor

Para finalizar se vuelve a sumergir la placa con agua y se mezcla con el ácido clorhídrico, esto con la intención de que se disuelva todo el cobre sobrante de la placa menos por donde pasan las pistas, este proceso tarda alrededor de 15 minutos y es conocido como grabado químico.

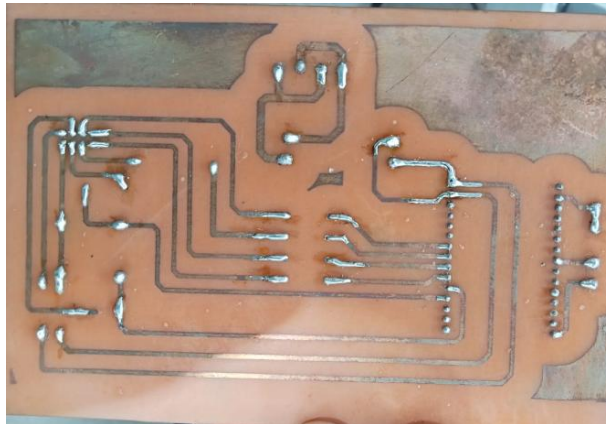
Figura 58. Proceso De Grabado Químico.



Fuente. El Autor

Por último, se retira la placa y se lija permitiendo observar el resultado final y la calidad de las pistas de cobre, como se puede observar a continuación:

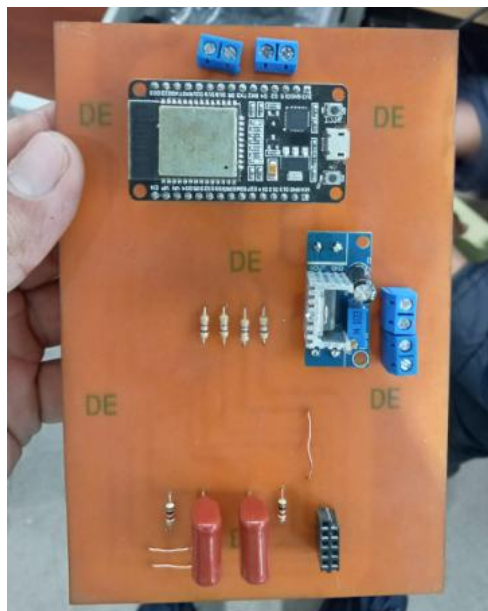
Figura 59. Fabricación De La PCB.



Fuente. El Autor

Fabricado el diseño de la placa de circuito impreso, el siguiente paso consistió en ensamblar los componentes ilustrados en el esquemático del circuito, es decir soldar las borneras, resistencias, capacitores, circuito regulador y las regletas hembra-macho donde se ubicará la ESP-32 y el puente H. El resultado de este paso fue el siguiente:

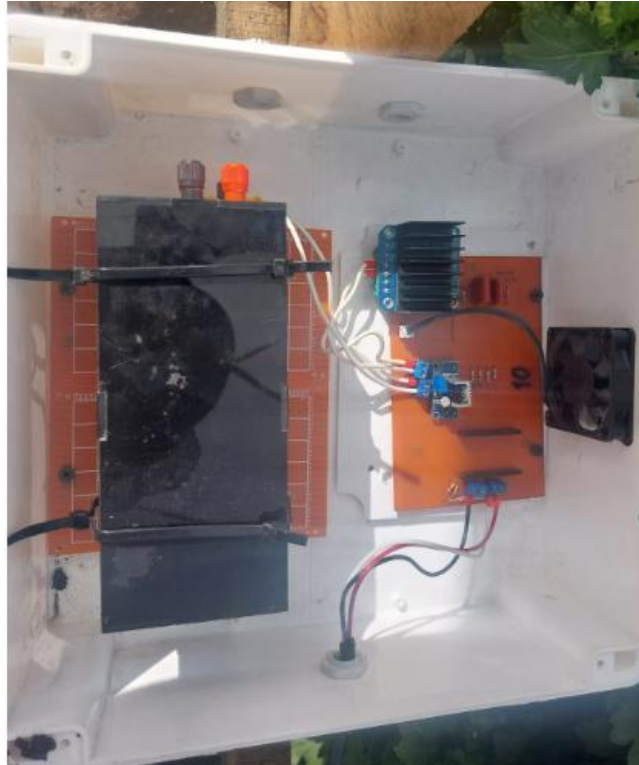
Figura 60. PCB Con Los Componentes Integrados.



Fuente. El Autor

Finalizada la fabricación de la PCB, comenzó el ensamble de la batería con la placa todo esto muy bien organizado dentro de una caja IP que las protegería ante las condiciones ambientales severas a las cuales se enfrentarían dentro del invernadero.

Figura 61. Ensamble Fina Caja IP.



Fuente. El Autor

Para culminar la etapa de construcción se instaló la caja IP dentro del invernadero realizando las ultimas conexiones que completarían el esquemático del circuito tal y como se había diseñado, es decir conectar los cables del motor, el selector y el panel solar, tal y como se observa en la figura 61.

Antes de encender el sistema, se realizó una verificación del plano esquemático identificando el orden de las conexiones, para corroborar que todo se encontraba conectado correctamente, identificando que todos los empalmes entre los diferentes cableados se encontraran en perfectas condiciones, para este paso se utilizó el multímetro para identificar la continuidad entre los cables, asegurando que todo se encontrará en orden según el esquemático ilustrado en la figura 41.

Figura 62. Instalación Caja IP Dentro Del Invernadero.



Fuente. El Autor

Con este paso se da por terminada la etapa de construcción, por lo que el siguiente paso es fundamental y es el que definirá el éxito del proyecto, ya que se pondrá a prueba el funcionamiento del sistema del proyecto de cortinas.

Para garantizar la confiabilidad del sistema y el éxito del proyecto, se implementó un protocolo de validación, el cual se dividió en dos etapas: la prueba funcional inicial y el monitoreo de fatiga a largo plazo. La prueba inicial consistió en la verificación de los ciclos de apertura y cierre por medio del selector, confirmando que la cortina operara de manera sincronizada y sin obstrucciones mecánicas. Esta etapa tuvo una duración de una hora en la cual el sistema arrojó resultados positivos.

Como la prueba anterior es insuficiente para validar un sistema expuesto a la intemperie, se extendió una fase de monitoreo durante 30 días, en el transcurso de este mes, el sistema se sometió a condiciones variables de humedad y temperaturas propias de un invernadero, completando un total de 300 ciclos de operación.

Figura 63 Protocolo De Validación Y Prueba De Campo

Fase De Prueba	Descripcion	Criterio De Aceptacion	Resultado
Funcionalidad Inicial	Accionamiento de apertura y cierre mediante el selector.	Movimiento fluido sin ruidos mecánicos ni atascos.	Exitoso
Tiempos De Apertura Y Cierre	Monitorear el tiempo de apertura y cierre de la cumbra.	Tiempo maximo de apertura y cierre 6 minutos	Exitoso
Consumo Y Carga	Medicion de voltaje de la bateria despues de 5 ciclos de operación y consumeo del motor.	La batería debe mantenerse por encima de 24V y el consumo del motor no debe ser $> 0,6$ A	Exitoso
Respuesta De Control	Verificación de tiempos de respuesta de la ESP-32 ante el cambio de giro.	Cambio de giro no > 1 segundo sin sobrecalentamiento del Puente H.	Exitoso

Fuente. El Autor

En la imagen anterior se encuentra la tabla de protocolo de pruebas la cual tuvo como propósito fundamental sistematizar la validación técnica del sistema de cortinas plegables, permitiendo un monitoreo estricto de su desempeño en condiciones reales de trabajo.

Por medio de este protocolo, se realizó un seguimiento riguroso de las partes críticas del sistema mecánico y electrónico, evaluando aspectos esenciales como la sincronización mecánica de las cortinas, el balance energético de la batería y la estabilidad térmica del puente de potencia ante cambios de dirección.

Este enfoque estructurado permitió verificar que todos los parámetros operativos se mantuvieron dentro de los rangos de seguridad y eficiencia previstos, confirmando así la funcionalidad del prototipo y su capacidad para operar de manera confiable durante periodos extendidos dentro de entornos hostiles.

8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Al finalizar las dos etapas de la prueba piloto, no se observaron fallos en la lógica de control de la ESP-32, tampoco disminución en el torque del motor, ni descargas críticas en la batería, por otro lado, el tiempo de apertura y cierre de la cortina se mantuvo cumpliendo con los objetivos del proyecto y los criterios de aceptación de diseño.

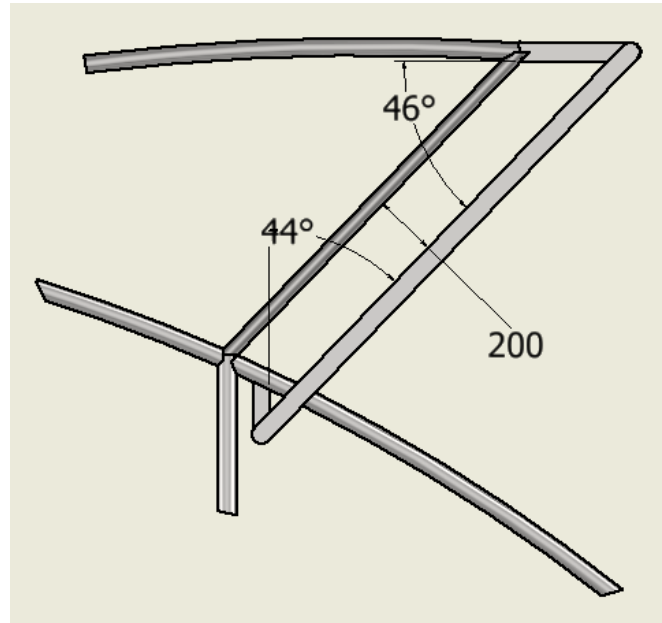
Por otro lado esta prueba fue de gran ayuda ya que permitió identificar puntos importantes a tener en cuenta siempre que se instale el sistema de cortinas plegables, como por ejemplo, la alineación precisa del motor y el riel guía, con la cumbrera del invernadero, ya que si no se alinean correctamente observamos que el motor presenta obstrucciones en el trayecto de apertura de la cortina, generando que aparezca otro esfuerzo por flexión que no se tomó en cuenta dentro del diseño ya que este no debería presentarse en el sistema mecánico. Lo cual conlleva a una flexión del eje, como se logra observar en la figura 51.

Reconociendo la problemática que surge a raíz de la desalineación del motor y el riel guía, se plantea la implementación de un **Protocolo de Alineación Geométrica** mediante el método de plomada de precisión. Este protocolo consta de tres etapas de verificación crítica:

1. **Nivelación de Soportes Fijos:** Se utiliza un nivel de burbuja de alta precisión para verificar la correcta nivelación de los soportes estructurales del herraje del riel, asegurando que se cumpla el nivel de referencia especificado en el diseño.
2. **Verificación de Ángulos de Soporte:** Con el apoyo de un goniómetro, se valida que los ángulos de los soportes (superior e inferior) respecto al riel correspondan a 46 grados en el superior y 44 grados en el inferior, respectivamente, manteniendo las especificaciones del diseño realizado.
3. **Medición de Paralelismo y Distancia:** Finalmente, con el apoyo del flexómetro, se mide la distancia de separación entre el tubo del riel y la cumbrera. Esta distancia debe ser estrictamente de 200 mm (20 cm), verificando en el inicio, punto medio y extremo final del riel.

Para comprender las medidas que se deben realizar en cada una de las etapas se ilustra en la siguiente imagen, el herraje instalado en la cumbrera del invernadero con las medidas de los ángulos y la distancia de separación que debe tener presente el herraje para su correcta alineación.

Figura 64 Medidas Para Una Correcta Alineación Del Riel



Fuente. El Autor

La ejecución de este protocolo de tres etapas, al pie de la letra asegura la correcta alineación geométrica del herraje, previniendo los esfuerzos de flexión y las obstrucciones causadas por la desalineación mencionadas anteriormente, evitando consecuentes fallas mecánicas.

Durante la fase de pruebas, se constató un fenómeno de corrosión prematura en las pistas de la placa de circuito impreso (PCB), en el cual se hizo evidente el proceso de oxidación visible en un lapso aproximado de tres semanas. Esta deteriore se atribuye al ambiente operativo, caracterizado por contener una elevada humedad relativa típico de un invernadero.

La oxidación de las pistas de cobre es una problemática de alto nivel, debido a que en un futuro incrementara la resistencia eléctrica en el circuito de señal y potencia, llegando a generar disipación de calor lo que se encuentra perjudicial para los componentes que hacen parte del circuito, llegando a causar caídas de voltaje significativas, lo que conllevaría a un deficiente funcionamiento del control electrónico.

Para evitar la degradación de la placa de circuito impreso, garantizar su vida útil y confiabilidad, se establece como medida preventiva la aplicación de un recubrimiento sobre la superficie de la PCB, después de investigar que recubrimiento mitigaría esta problemática presente en el proyecto se identificó que los más utilizado en el mercado es el barniz.

Figura 65. Presencia De Corrosión En PCB.



Fuente. El Autor

En la anterior imagen se puede apreciar el cambio del color de las pistas, donde se hace evidente la corrosión en diferentes puntos de la PCB, principalmente se genera la oxidación por los bordes produciendo que se desvanezca el material conductor, por esta razón fue necesario soldar con estaño y cautín las pistas de la placa a causa de que la PCB estaba presentando falsos contactos debido al levantamiento de las pistas.

Por último, se realizó una prueba de temperatura y humedad relativa, para la cual se utilizó un sensor temp-tale/temp-tock de referencia TT2308171798 el cual mide estas dos variables, Los resultados arrojados por el sensor fueron los siguientes:

Figura 66 Resultados Prueba Con sensor De Temperatura

11/27/2025	13:06:29	60.4	76.8
11/27/2025	13:10:29	61.3	76.6
11/27/2025	13:14:29	62.2	76.4
11/27/2025	13:18:29	63.3	76.3
11/27/2025	13:22:29	64.2	76.3
11/27/2025	13:26:29	65.1	76.2
11/27/2025	13:30:29	66.2	76.2
11/27/2025	13:34:29	67.1	76.2
11/27/2025	13:38:29	68.1	76.0
11/27/2025	13:42:29	69.2	75.9
11/27/2025	13:46:29	70.1	75.7
11/27/2025	13:50:29	71.2	75.5
11/27/2025	13:54:29	71.9	75.4
11/27/2025	13:58:29	72.6	75.4

Fuente. El Autor

En la imagen anterior, Podemos apreciar los resultados arrojados directamente por el sensor, la primera columna indica la fecha, a continuación, la hora, la tercera columna hace referencia a la temperatura en grados Fahrenheit y la última es la humedad relativa presente dentro del invernadero.

El análisis de los datos climáticos se focalizó en los registros tomados a la una de la tarde, dado que esta franja horaria históricamente presenta las temperaturas máximas dentro del invernadero. El valor pico registrado fue de 72.6 (°F), lo que equivale a 22.5(°C). Este resultado confirma que el sistema es capaz de mantener la temperatura dentro del rango óptimo especificado para el desarrollo de las plantas, el cual, según lo establecido en la literatura (o en la Sección 7.1.2 del documento), debe oscilar entre 18 (°C) y 24 (°C). Respecto a la Humedad Relativa (HR), cuyo rango ideal se define entre 60% y 80%, los datos demuestran que el valor máximo alcanzado fue de 72.6%.

Con los datos presentados por el sensor se demuestra capacidad del sistema de cortinas plegables para mantener simultáneamente la temperatura en 22.5 (°C) y la humedad relativa (HR) por debajo del 80% en el horario de mayor estrés térmico, validando categóricamente la eficacia del proyecto en la creación y el mantenimiento del microclima ideal para el cultivo.

9. CONCLUSIONES

- Después de analizar el método de ductos utilizado por la empresa para cerrar y abrir las cubreras del invernadero, se determina que el método es funcional en términos cinemáticos, pero contiene un lento tiempo de respuesta para la apertura y cierre de las cubreras, resultando ineficaz para mantener las condiciones ideales de temperatura y humedad relativa en los invernaderos. Debido a esta ineficiencia se ve comprometida la capacidad de crear el ambiente propicio para el crecimiento requerido por las plantas, incrementando la vulnerabilidad a patógenos como botritis cinérea y oidium SPP.
- Se diseñó el sistema de cortinas plegables utilizando el método Roller, demostrando una reducción significativa del 74% en el tiempo de operación con respecto al sistema de ductos. La velocidad de operación se optimizó de 23 minutos a 6 minutos, validando la capacidad del sistema Roller para reaccionar eficazmente a los requerimientos climáticos. Adicionalmente, se garantiza la seguridad operacional para el personal que se encuentra realizando sus labores diarias dentro del invernadero, ya que el cálculo estructural del diseño establece un factor de seguridad mínimo de 2.23, cumpliendo con el umbral de seguridad requerido.
- La construcción y puesta en marcha del prototipo a escala real, en una nave de los nuevos invernaderos instalados por la empresa Elite Flower en el departamento de Cundinamarca, demostró la viabilidad técnica y eficiencia del diseño a través de un mes de pruebas monitoreadas con sensores de temperaturas y humedad relativa. Los datos recopilados confirmaron resultados positivos y una tendencia de mejora en el desarrollo vegetativo de las plantas con respecto a las demás naves del invernadero. Aunque la diferencia general aun no es estadísticamente significativa debido al bajo impacto espacial utilizando una única nave dentro del invernadero, la demostrada eficiencia motivó la decisión de la empresa a escalar la implementación del sistema a las 12 naves restantes que componen el invernadero, tal y como se puede observar en la siguiente imagen. Actualmente, el sistema a escala completa se encuentra en la fase de pruebas finales.

Figura 67 Instalación Del Sistema En Las 14 Naves Del Invernadero



Fuente. El Autor

10. REFERENCIAS

1. Asocolflores. (2020). *Informe de sostenibilidad de la floricultura en Colombia*. Asociación Colombiana de Exportadores de Flores. <https://www.asocolflores.org>
2. Decreto 1843 de 1991. Por el cual se reglamenta el uso de plaguicidas y productos afines en Colombia. Diario Oficial No. 39.876.
3. FAO. (2017). *Protected cultivation: structures and growing media*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org>
4. García, M., & Muñoz, L. (2021). Efecto de la humedad relativa en la proliferación de *Botrytis cinerea* en cultivos florales. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 15(2), 45-58. <http://www.hermes.unal.edu.co:8091/pages/Consultas/Proyecto.xhtml?idProyecto=61955&opcion=1>
5. ICONTEC. (2015). *Normas técnicas colombianas aplicables a procesos de soldadura y construcción metálica*. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.
6. Ley 99 de 1993. Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se organiza el Sistema Nacional Ambiental y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial No. 41.146.
7. Ley 1562 de 2012. Por la cual se modifica el sistema de riesgos laborales y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial No. 48.488.
8. López, J., Ramírez, F., & Torres, A. (2018). Evaluación del tiempo de ventilación en invernaderos y su impacto en la humedad relativa. *Agronomía Colombiana*, 36(3), 112–120. <https://repository.agrosavia.co/server/api/core/bitstreams/42fc7986-9fec-4240-b8ec-89d477b31270/content>
9. Martínez, P., & Herrera, J. (2019). Automatización de sistemas de ventilación en invernaderos: impacto en costos de producción. *Ingeniería y Desarrollo*, 37(2), 89–104. https://www.researchgate.net/publication/354936574_Implementacion_sistema_de_invernadero_automatizado_para_produccion_de_multicultivos_agricolas_educativos_en_el_SENA_de_Mosquera
10. NSR-10. (2010). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente*. Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. <https://www.minvivienda.gov.co>
11. Resolución 682 de 2018. Medidas fitosanitarias para la producción de flores de exportación. Instituto Colombiano Agropecuario (ICA).
12. Rodríguez, L., & Pérez, M. (2015). Historia y evolución de los invernaderos en la agricultura. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 32(1), 23–35. <https://doi.org/10.22267/rcia.153201>
13. **Shigley:** Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2015). *Shigley's Mechanical Engineering Design* (10th ed.). McGraw-Hill Education. (Ver Capítulo 1: *Introduction to Mechanical Engineering Design - Design Factor*).
14. **Beer:** Beer, F. P., Johnston, E. R., DeWolf, J. T., & Mazurek, D. F. (2011). *Mechanics of Materials* (6th ed.). McGraw-Hill. (Sección 1.6: *Allowable Load and Allowable Stress; Factor of Safety*).
15. AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures. Reston: ASCE, 2022. 982 p. (ASCE/SEI 7-22).

11. ANEXOS

11.1. FRIMWARE DEL SISTEMA DE CONTROL

El siguiente código fue desarrollado en el entorno Arduino IDE para controlar un motor DC mediante un driver BTS7960, utilizando un selector de tres posiciones como entrada de mando.

```
/*
 * Control de Motor con Selector de 3 Posiciones - ESP32
 * Visual Studio Code + PlatformIO
 *
 * Selector:
 * DERECHA → Motor gira en sentido HORARIO
 * CENTRO  → Motor DETENIDO
 * IZQUIERDA → Motor gira en sentido ANTIHORARIO
 *
 * Pull-down: Resistencias de 10kΩ entre cada pin del selector y GND
 */

#include <Arduino.h>

// _____
// PINES - Selector de 3 posiciones
// _____
#define PIN_DERECHA  GPIO_NUM_25 // Selector en posición DERECHA
#define PIN_CENTRO   GPIO_NUM_26 // Selector en posición CENTRO
#define PIN_IZQUIERDA GPIO_NUM_27 // Selector en posición IZQUIERDA

// _____
// PINES - Driver de Motor (ej: L298N / L293D)
// _____
#define MOTOR_IN1  GPIO_NUM_32 // Control dirección 1
#define MOTOR_IN2  GPIO_NUM_33 // Control dirección 2
#define MOTOR_ENA  GPIO_NUM_14 // Enable / PWM (velocidad)

// _____
// CONFIGURACIÓN PWM (LEDC - ESP32)
// _____
#define PWM_CANAL    0
#define PWM_FRECUENCIA 1000 // Hz
#define PWM_RESOLUCION 8 // 8 bits → valores 0–255
#define MOTOR_VELOCIDAD 200 // Velocidad (0–255)
```

```

// -----
// DELAY entre lecturas
// -----
#define DELAY_MS 1000           // 1 segundo

// -----
// ESTADOS del motor
// -----
typedef enum {
    ESTADO_HORARIO,
    ESTADO_DETENIDO,
    ESTADO_ANTIHORARIO,
    ESTADO_INDEFINIDO // Ninguna posición activa (error)
} EstadoMotor;

EstadoMotor estadoActual = ESTADO_INDEFINIDO;

// -----
// FUNCIONES DE MOTOR
// -----

void motorHorario() {
    ledcWrite(PWM_CANAL, MOTOR_VELOCIDAD);
    digitalWrite(MOTOR_IN1, HIGH);
    digitalWrite(MOTOR_IN2, LOW);
    Serial.println("[MOTOR] → Girando en sentido HORARIO ⤴");
}

void motorDetener() {
    ledcWrite(PWM_CANAL, 0);
    digitalWrite(MOTOR_IN1, LOW);
    digitalWrite(MOTOR_IN2, LOW);
    Serial.println("[MOTOR] → DETENIDO ■");
}

void motorAntihorario() {
    ledcWrite(PWM_CANAL, MOTOR_VELOCIDAD);
    digitalWrite(MOTOR_IN1, LOW);
    digitalWrite(MOTOR_IN2, HIGH);
    Serial.println("[MOTOR] → Girando en sentido ANTIHORARIO ⤵");
}

// -----
// LEER SELECTOR
// -----

```

```

EstadoMotor leerSelector() {
    bool derecha  = digitalRead(PIN_DERECHA);
    bool centro   = digitalRead(PIN_CENTRO);
    bool izquierda = digitalRead(PIN_IZQUIERDA);

    Serial.printf("[SELECTOR] D:%d | C:%d | I:%d\n", derecha, centro, izquierda);

    if (derecha  && !centro && !izquierda) return ESTADO_HORARIO;
    if (!derecha && centro  && !izquierda) return ESTADO_DETENIDO;
    if (!derecha && !centro && izquierda ) return ESTADO_ANTIHORARIO;

    return ESTADO_INDEFINIDO; // Lectura inválida
}

// -----
// SETUP
// -----

void setup() {
    Serial.begin(115200);
    Serial.println("=== Control de Cortina con ESP32 ===");

    // Configurar pines del selector como ENTRADA con pull-down EXTERNO
    // INPUT (sin pull-up/pull-down interno) porque usamos resistencias externas 10kΩ a GND
    pinMode(PIN_DERECHA, INPUT);
    pinMode(PIN_CENTRO, INPUT);
    pinMode(PIN_IZQUIERDA, INPUT);

    // Configurar pines del motor como SALIDA
    pinMode(MOTOR_IN1, OUTPUT);
    pinMode(MOTOR_IN2, OUTPUT);

    // Configurar PWM con LEDC (API nativa ESP32)
    ledcSetup(PWM_CANAL, PWM_FRECUENCIA, PWM_RESOLUCION);
    ledcAttachPin(MOTOR_ENA, PWM_CANAL);

    // Estado inicial: motor detenido
    motorDetener();
    Serial.println("[INIT] Sistema listo.\n");
}

// -----
// LOOP
// -----

void loop() {
    EstadoMotor nuevoEstado = leerSelector();

```

```

// Solo actuar si el estado cambia (evita llamadas repetidas innecesarias)
if (nuevoEstado != estadoActual) {
    estadoActual = nuevoEstado;

    switch (estadoActual) {
        case ESTADO_HORARIO:
            motorHorario();
            break;

        case ESTADO_DETENIDO:
            motorDetener();
            break;

        case ESTADO_ANTIHORARIO:
            motorAntihorario();
            break;

        case ESTADO_INDEFINIDO:
        default:
            motorDetener(); // Por seguridad: si hay error, detener
            Serial.println("[WARN] Posición del selector no válida → Motor detenido por
seguridad.");
            break;
    }
}

delay(DELAY_MS);
}

```