

Banco experimental didáctico para la evaluación de la generación de energía eléctrica de un panel fotovoltaico en función de su ángulo de inclinación con sistema de control programable

Camilo Andrés Chaparro Pérez-2194212

José Fernando Suarez Botello- 2200460

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Mecánico

Director

Carlos Fidel Amarís Castilla

Ingeniero Mecánico, PhD.

Codirector

Yennifer Yuliana Ríos Díaz

Ingeniera Mecatrónica, PhD.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomécanicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

Primeramente, gracias a Dios, por brindarme la fortaleza y sabiduría necesarias para culminar este proyecto. A mis padres, Luis Alejandro Chaparro Figueredo y Alba Nayibe Pérez Barrera, por ser mi pilar fundamental, por su amor, paciencia y apoyo incondicional en cada paso de este camino. A mi hermana Karen, por su cariño y comprensión, y por estar siempre a mi lado.

A Ángel, por acompañarme en este gran proyecto, A mi compañero de trabajo de grado, por su compromiso y dedicación a lo largo de esta etapa y a todos aquellos que creyeron en mí, gracias por su confianza y por inspirarme a seguir adelante. A mi alma mater por enseñarme a ser decidido y que, a pesar de todas las dificultades, debemos continuar por nuestros sueños.

Camilo Andrés Chaparro Pérez

Con profundo sentimiento de alegría, satisfacción y gratitud, dedico este proyecto a mis seres queridos, quienes han sido apoyo fundamental en este sueño. A quienes me acompañaron a lo largo del camino especialmente a mi buen amigo Andrés Felipe, y a los que fueron inspiración constante y sostén incondicional.

Este logro no solo me pertenece a mí, sino también a quienes lo hicieron posible con su amor, paciencia, esfuerzo y perseverancia.

A mis padres, que siempre estuvieron a mi lado, brindándome su apoyo inquebrantable, a mi abuela, quien desde la tierra y ahora desde el cielo ha sido un pilar moral en mi vida, a mi abuelo, que aún hoy continúa siendo un mentor invaluable, a mi familia entera: tíos, primos, hermanas, gracias por formar parte de mi vida y por permitirme compartir con ustedes este orgullo que tanto significa para mí. Este trabajo es para ustedes, con todo mi corazón.

José Fernando Suarez Botello

Agradecimientos

A la Universidad Industrial de Santander (UIS), por ser mi alma mater, el lugar donde me formé como ingeniero mecánico. Gracias por brindarme una educación integral en todos los aspectos que un ingeniero necesita para ser competente y capaz.

A la Escuela de Ingeniería Mecánica, por el apoyo prestado durante la construcción del banco experimental, especialmente en temas de impresión y manufactura, así como por otras ayudas brindadas a lo largo del proceso.

A mi director y codirectora de tesis, el Dr. Carlos Fidel Amaris y la Dra. Yennifer Yuliana Ríos, por su orientación, conocimiento y compromiso durante el desarrollo de este trabajo.

A los técnicos de la escuela de Ingeniería Mecánica, Cesar, Don Henry, Juan José, Don Freddy por su colaboración y apoyo, importante en la fabricación y en el desarrollo de este proyecto.

A cada docente de la escuela, gracias por alimentar en mí la curiosidad y las ganas de aprender. Su apoyo y enseñanza han sido fundamentales en la formación de mi vida profesional.

Tabla de Contenido

Introducción	15
1 Planteamiento del problema.....	16
2 Objetivo General.....	18
2.1 Objetivos Específicos.....	18
3 Marco teórico	19
3.1.1 Estrategias de control.....	20
3.1.2 Tipos de celdas fotovoltaicas	21
3.1.3 Componentes principales del sistema	22
3.1.4 Geometría y movimiento solar.....	23
3.2 Estrategias de control más comunes usadas en seguidores solares.....	26
3.2.1 Control PID.....	26
3.2.2 Sistema de control ON-OFF.....	27
4 Marco referencial	28
4.1 Marco de antecedentes	28
5 Metodología	29
5.1 Alcance de la investigación	29
5.2 Desarrollo del Montaje del sistema mecánico	30
5.2.1 Descripción detallada del sistema.....	30
5.3 Planteamiento de alternativas	31
5.3.1 Alternativa 1. Seguidor solar con cilindros hidráulicos.....	31
5.3.2 Alternativa 2. Robot seguidor	32

5.3.3	Alternativa 3.....	33
5.4	Selección de alternativas del sistema.....	35
5.5	Selección de elementos del sistema de control.....	35
5.5.1	Microcontrolador	35
5.5.2	Panel Solar	36
5.5.3	Motor DC	37
5.5.4	Componentes de acondicionamiento de señal.	38
5.6	Identificación de los parámetros adecuados del controlador	38
5.7	Desarrollo del montaje de componentes electrónicos y generación del sistema de control	38
5.7.1	Comprobación del estado y funcionamiento de los componentes.....	38
5.7.2	Conexión de los componentes electrónicos.	40
5.7.3	Obtención de la función de transferencia en lazo cerrado.	41
5.7.4	Caracterización de la planta “LuzBot”	42
5.8	Integración del sistema mecánico con el sistema de control para regular el ángulo de inclinación a través de programación del panel fotovoltaico.....	42
5.9	Evaluación del funcionamiento del controlador del sistema de inclinación mediante pruebas experimentales.	43
6	Resultados	44
6.1	Desarrollo del sistema mecánico	45
6.1.1	Evaluación de alternativas	45
6.1.2	Descripción detallada del sistema.....	46
6.2	Fabricación del soporte del panel fotovoltaico	47

6.2.1	Diseño y montaje del sistema de transmisión	48
6.2.2	Fabricación del eje de transmisión y selección de chumaceras	49
6.2.3	Fabricación del soporte del panel	50
6.2.4	Montaje final del sistema	51
6.3	Selección de componentes	52
6.3.1	Microcontrolador	52
6.3.2	Panel Solar	53
6.3.3	Motor DC.....	53
6.4	Parámetros adecuados del controlador.....	54
6.5	Desarrollo del montaje de componentes electrónicos y generación del sistema de control	55
6.5.1	Comprobación del estado y funcionamiento de los componentes.....	55
6.5.2	Conexión de los componentes electrónicos.....	58
6.5.3	Función de transferencia en lazo cerrado.....	60
6.5.4	Caracterización de la planta “LuzBot”	61
6.5.5	Integración del sistema mecánico con el electrónico.....	63
6.6	Evaluación de funcionamiento del controlador del sistema de inclinación mediante pruebas experimentales	64
7	Conclusiones	70
8	Recomendaciones	72
	Referencias Bibliográficas	73
	Apéndices.....	77

Lista de Tablas

Tabla 1 Características de diferentes tipos de células fotovoltaicas	21
Tabla 2 Descripción de ángulos solares.....	24
Tabla 3 Matriz Pugh del sistema.....	35
Tabla 4 Matriz PUG de selección del microcontrolador	35
Tabla 5 Matriz PUG de selección del panel solar.....	36
Tabla 6 Evaluación de alternativas	45
Tabla 7 Matriz PUG de selección del microcontrolador	52
Tabla 8 Matriz PUG de selección del panel solar.....	53
Tabla 9 Posición inicial (PID) y Energía Neta (Wh)	93
Tabla 10 Posición inicial (ON-OFF) y Energía Neta (Wh)	93
Tabla 11 Datos del piñón y la rueda	96
Tabla 12 Número de dientes recomendados	105
Tabla 13 Cálculos realizados para el engranaje motriz y conductor	106
Tabla 14 Componentes electrónicos	113
Tabla 15 Componentes mecánicos del sistema.....	114
Tabla 16 Datos experimentales para caracterizar la planta.....	141

Lista de figuras

Figura 1 Mapa conceptual de las ventajas y desventajas de la energía solar.....	19
Figura 2 Control de lazo cerrado	20
Figura 3 Control de lazo cerrado del proyecto.....	21
Figura 4 Partes de un sistema fotovoltaico	23
Figura 5 Trayectoria y posición del sol.....	23
Figura 6 Diagrama de bloques del PID.....	26
Figura 7 Modelo de seguidor solar	27
Figura 8 Alternativa 1	32
Figura 9 Alternativa 2	33
Figura 10 Alternativa 3	34
Figura 11 Herramientas análisis de movimiento Solidworks motion.....	37
Figura 12 Conexiones para probar motores DC.	39
Figura 13 Conexiones para probar el potenciómetro	39
Figura 14 Conexiones para probar fotorresistencias.....	40
Figura 15 Diagrama de conexiones del sistema.....	40
Figura 16 Control en lazo cerrado, con controlador P	41
Figura 17 ejemplo de cómo obtener una función de transferencia en MATLAB.	42
Figura 18 Caja de electrónica	43
Figura 19 Protocolo de pruebas	44
Figura 20 Boceto del prototipo del banco.....	47
Figura 21 Bastidor.....	48
Figura 22 Impresión de 3d de los engranajes.....	48

Figura 23 Engranajes	49
Figura 24 Selección de las chumaceras	50
Figura 25 Soporte del panel	50
Figura 26 Fotografías del sistema final.....	51
Figura 27 Voltaje entregado por el potenciómetro	56
Figura 28 Gráfica de voltaje y corriente de motores VEX 393	57
Figura 29 Fuente de poder utilizada para probar y programar el banco experimental.	57
Figura 30 Datos obtenidos por las fotorresistencias.	58
Figura 31 Conexión física del Arduino, puentes H y Protoboard.....	59
Figura 32 Conexión del Arduino con motores y potenciómetro.....	59
Figura 33 Fotorresistencias conectadas al sistema.....	60
Figura 34 Sistema montado	60
Figura 35 Respuesta del sistema con controlador Proporcional.	61
Figura 36 Función de transferencia obtenida con Toolbox de MATLAB.....	61
Figura 37 Caja cortada y armada en acrílico	63
Figura 38 Componentes electrónicos anclados a la caja.....	63
Figura 39 Integración del sistema mecánico y electrónico.	64
Figura 40 Panel fotovoltaico conectado con una resistencia de 20Ω	65
Figura 41 Medición de la resistencia de cerámica.	65
Figura 42 Posición Izquierda [a], central [b] y derecha [c] del panel para probar el banco.	65
Figura 43 Potencia generada por el panel estando en la posición izquierda aplicando PID como estrategia de control	66
Figura 44 Potencia generada por el panel estando en la posición horizontal	67

Figura 45 Potencia generada por el panel estando en la posición derecha	67
Figura 46 Potencia generada por el panel estando en la posición izquierda aplicando ON/OFF .	68
Figura 47 Potencia generada por el panel estando en la posición horizontal aplicando ON/OFF	69
Figura 48 Potencia generada por el panel estando en la posición derecha aplicando ON/OFF ...	70

Lista de Apéndices

Apendice A.	Diseño y análisis estructural	78
Apendice B.	Comprobación del funcionamiento de los motores	80
Apendice C.	Datos experimentales, evaluación del panel	82
Apendice D.	Estimación de la energía neta del sistema de seguimiento solar	90
Apendice E.	Dimensionamiento del eje.....	95
Apendice F.	Selección de las chumaceras	101
Apendice G.	Selección del sistema de potencia.....	102
Apendice H.	Cálculo del mecanismo de engranajes	104
Apendice I.	Manual Instructivo de funcionamiento del banco.....	107
Apendice J.	Presupuesto	143
Apendice K.	Planos.....	144

Resumen

Título: Banco experimental didáctico para la evaluación de la generación de energía eléctrica de un panel fotovoltaico en función de su ángulo de inclinación con sistema de control programable

Autor: Camilo Andrés Chaparro Pérez y José Fernando Suarez Botello

Palabras Clave: Seguidor solar, Automatización, Control PID, Control ON/OFF, Energía fotovoltaica

Descripción: El aumento sostenido de la demanda energética a nivel global ha impulsado históricamente el uso intensivo de combustibles fósiles, generando serias consecuencias ambientales como el calentamiento global y la contaminación atmosférica. En respuesta a esta problemática, aparecen alternativas sostenibles, entre ellas las energías renovables, cuyo estudio y aplicación se vuelven indispensables para la formación de la nueva generación de ingenieros. En este contexto, la ingeniería de control juega un papel fundamental al contribuir al mejoramiento de la eficiencia de las plantas energéticas; un ejemplo de esto es el control de la orientación de los paneles solares, que permite aumentar la captación de radiación solar y mejorar la generación de energía.

Atendiendo a esta necesidad, se construyó un banco experimental didáctico que permite implementar diferentes estrategias de control para regular el ángulo de inclinación de un panel fotovoltaico y analizar su influencia en la generación de potencia. Este banco está concebido como una herramienta esencial para la enseñanza de sistemas de control y automatización, orientada a estudiantes de ingeniería mecánica de la Universidad Industrial de Santander (UIS).

Para su desarrollo, se diseñaron e integraron los componentes mecánicos y electrónicos en un sistema funcional de seguimiento solar, el cual fue programado con controladores PID y ON/OFF.

A partir de evaluar el efecto del ángulo de inclinación del panel solar y su corrección con sistemas

de control, se evidenció un impacto positivo en la potencia generada. En el escenario más desfavorable, donde el panel partía de una orientación inicial incorrecta, el control activo permitió incrementar la potencia generada en 9,11 W, pasando de 0,16 W en su posición inicial a 9,27 W con el ajuste generado en el ángulo. Por otro lado, en el caso inicial más favorable para la generación, donde el ángulo de inclinación ya permitía una buena incidencia solar (es decir, partía con un ángulo inicial beneficioso para captar la radiación), la potencia aumentó ligeramente en 0,19 W, de 8,74 W a 8,94 W (estos datos de generación son valores promedio de los ensayos realizados) tras la aplicación del control. Lo anterior permitió confirmar el correcto funcionamiento del sistema.

Abstract

Title: Educational experimental bench for the evaluation of the electrical energy generation of a photovoltaic panel as a function of its inclination angle with a programmable control system

Author(s): Camilo Andrés Chaparro Pérez y José Fernando Suarez Botello

Key Words: Solar tracker, Automation, PID control, ON/OFF control, Photovoltaic energy.

Description: The sustained increase in global energy demand has historically driven the intensive use of fossil fuels, leading to serious environmental consequences such as global warming and atmospheric pollution, as a response, renewable energy sources have emerged as sustainable alternatives, becoming essential in the training of the new generation of engineers, in this context, control engineering plays a key role in improving the efficiency of energy systems, one relevant application is the orientation control of photovoltaic panels to enhance solar radiation capture and energy generation.

To address this need, a didactic experimental bench was developed to implement different control strategies aimed at regulating the tilt angle of a photovoltaic panel and analyzing its influence on

power output, the system, designed for educational purposes at the Universidad Industrial de Santander (UIS), integrates mechanical and electronic components and was programmed with PID and ON/OFF controllers.

Experimental results demonstrated the effectiveness of the system in adjusting the panel's orientation to improve power generation, in the most unfavorable scenario, where the panel started in a misaligned position, the applied control strategy increased the average power from 0,16 W to 9,27 W, representing a gain of 9,11 W, conversely, in the most favorable initial condition, the system achieved a smaller improvement of 0,19 W, from 8,74 W to 8,94 W, these outcomes validate the proper functioning of the system and its relevance as a pedagogical tool for teaching control and automation concepts.

Introducción

El crecimiento de la demanda energética ha estado históricamente ligado al uso de combustibles fósiles como el carbón, petróleo y gas natural. A pesar de su papel fundamental en el desarrollo industrial y económico, la explotación descontrolada ha generado consecuencias ambientales irreversibles, incluyendo el calentamiento global, la contaminación atmosférica y el agotamiento de los recursos naturales. Frente a esta crisis, la transición hacia fuentes de energía renovable se ha convertido en una prioridad estratégica a nivel mundial, promovida tanto por el sector industrial, como la comunidad científica. Dentro de estas alternativas, la energía fotovoltaica se caracteriza como una de las soluciones más viables y sostenibles debido a su disponibilidad y capacidad de generar electricidad sin emisiones contaminantes. Sin embargo, la eficiencia en la captación de radiación solar y los elevados costos de instalación continúan siendo factores limitantes para su implementación a gran escala (Mekhilef, Saidur, Safai., 2011).

Un aspecto determinante en la eficiencia de los paneles fotovoltaicos es la variabilidad en la posición del sol a lo largo del día, lo cual altera el ángulo de incidencia de la radiación solar sobre las celdas y reduce la conversión de energía (Notton., 2014). Para maximizar la captación de luz solar y mejorar el rendimiento energético, se han desarrollado sistemas de seguimiento solar que permiten ajustar la inclinación del panel en función del movimiento del sol (Kumba., 2024).

Diversos estudios han demostrado que la implementación de mecanismos de seguimiento con ajuste de elevación puede incrementar la producción de energía hasta en un 30% anual, dependiendo de la precisión del sistema y el tipo de tecnología utilizada (Eke., 2012). Estas mejoras no solo optimizan el aprovechamiento de la radiación solar, sino que también aumentan la viabilidad económica y la competitividad de la energía fotovoltaica como alternativa energética.

Planteamiento del problema

Los laboratorios son una herramienta crucial en la educación, permitiendo a los estudiantes aplicar de manera práctica los conceptos teóricos y posibilitar el escalamiento de proyectos generados a nivel laboratorio. Estos espacios actúan como un enlace entre la teoría y la práctica, proporcionando a los estudiantes la habilidad para construir activamente ideas y explicaciones,(Urrea Quiroga et al., 2022). El Ministerio de las Tecnologías de la Información y Comunicación, en el ámbito educativo, recalca la importancia de los laboratorios, ya que ofrecen a los estudiantes la oportunidad de aplicar la teoría en un entorno práctico, lo que facilita una comprensión más profunda de los conceptos y promueve un aprendizaje significativo,(Ministerio TIC, 2022).Asimismo, los laboratorios desempeñan un papel fundamental en el apoyo a los estudiantes para prepararse y enfrentar problemáticas actuales en diversas áreas; energética, económica, social, cultural, etc.

En este sentido una de las preocupaciones actuales es la crisis climática, donde las fuentes de energía tradicionales, como el carbón y el petróleo, continúan siendo las responsables de la gran mayoría de las emisiones de carbono, con más del 60% de las emisiones globales (Matteo Carmen, 2022). No obstante, las energías renovables representan una oportunidad para abordar esta crisis y reducir las emisiones de carbono, según datos de la Agencia Internacional de Energía (AIE), las energías renovables representaron un 29% de la generación en 2020 a nivel mundial, y se espera que esta proporción aumente a más del 60% para 2050. (Dierman Ralph, 2024)

Las universidades están asumiendo un papel más proactivo frente a la crisis climática actual, integrando semilleros en el área de energías renovables y asignaturas de energías alternativas, como lo evidencia la carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander. Es necesario complementar la enseñanza, con herramientas creativas y eficientes que

respondan ante las problemáticas ambientales; como, por ejemplo, la tecnología de paneles fotovoltaicos. Según la AIE, entre 2010 y 2020, la capacidad de energía solar fotovoltaica aumentó aproximadamente de 40 gigavatios (GW) a más de 700 (GW) a nivel mundial,(Stolik Novygrod Daniel, 2014).

En este orden de ideas, se propone diseñar un panel fotovoltaico con una estrategia de control implementada que permita regular el ángulo de inclinación del panel. El ángulo de inclinación de un panel fotovoltaico es crucial tanto en términos de control como de aprovechamiento de energía solar debido a los principios de luz y refracción de la luz. En primer lugar, el ángulo de inclinación afecta directamente la cantidad de luz solar que incide sobre las celdas del panel solar (Zipa Bermudez Carlos Augusto, 2021). La teoría de incidencia de luz, cuando la luz solar llega a la superficie de un panel fotovoltaico, un ángulo de inclinación óptimo permite maximizar la cantidad de luz que incide perpendicularmente sobre las celdas solares. Esto significa que un ángulo de inclinación adecuado puede aumentar la eficiencia del panel al permitir mayor absorción de energía solar, (Urrea Quiroga et al., 2022).

Adicionalmente, el panel fotovoltaico se complementará con un seguidor solar automático, el cual permite seguir la trayectoria del sol a lo largo del día, de tal manera que asegure que el panel esté orientado de manera óptima para recibir la máxima cantidad de luz solar incidente. Finalmente, el banco experimental propuesto permitirá estimar la potencia eléctrica generada por el panel fotovoltaico en función de su inclinación. Por lo tanto, el banco propuesto representará una herramienta teórico-práctica que permitirá a los estudiantes de ingeniería mecánica de la UIS desarrollar competencias asociadas a la implementación de sistemas de control para regulación del ángulo de inclinación y evaluación de paneles fotovoltaicos.

Objetivo General

Construir un banco experimental didáctico que permita implementar diferentes estrategias de control para regular el ángulo de inclinación y su influencia en la generación de potencia de un panel fotovoltaico. Este banco representará una herramienta esencial para llevar a cabo prácticas de sistemas de control y automatización de los estudiantes de ingeniería mecánica de la Universidad Industrial de Santander (UIS) ubicada en Bucaramanga, Santander.

1.1 Objetivos Específicos

Seleccionar el sistema de control y que permita regular el ángulo de inclinación del panel fotovoltaico.

Desarrollar un banco de pruebas funcional que permita ajustar el ángulo de inclinación de un panel fotovoltaico de manera precisa y controlada.

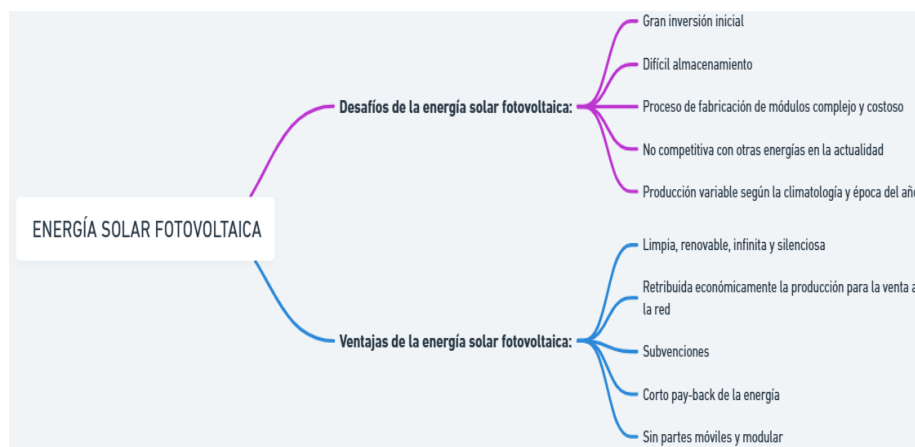
Evaluar el funcionamiento del controlador del sistema de inclinación mediante pruebas experimentales que permitan regular el ángulo de inclinación y su influencia en la generación de potencia del panel fotovoltaico.

Marco teórico

La tecnología de Energía Solar Fotovoltaica permite generar corriente continua a partir de la interacción de la luz solar con materiales semiconductores. Este proceso se basa en el efecto fotovoltaico, mediante el cual los fotones de la radiación solar excitan los electrones del material semiconductor, generando un flujo de corriente eléctrica. La producción de electricidad se mantiene mientras exista exposición a la luz solar y cesa en su ausencia, lo que evidencia la intermitencia de esta tecnología (Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación, n.d.)

La energía solar fotovoltaica se distingue por su carácter renovable, sin embargo, enfrenta desafíos técnicos y económicos que limitan su implementación a gran escala. Entre las principales limitaciones se encuentra la variabilidad de la radiación solar, que impacta directamente en la producción energética, así como la dificultad de almacenar la electricidad generada de manera eficiente. En el mapa conceptual ([Figura 1](#)) se muestran las ventajas y desventajas de la energía solar fotovoltaica, incluyendo aspectos económicos (Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación, n.d.)

Figura 1 Mapa conceptual de las ventajas y desventajas de la energía solar

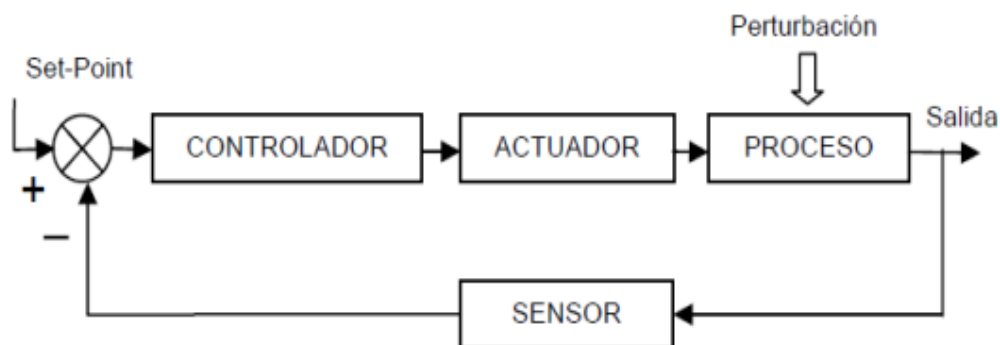


Nota: tomado de:(*Funcionamiento Energía Solar Fotovoltaica - Iberdrola, n.d.*)

1.1.1 Estrategias de control

Sistemas de control en lazo cerrado: Estos sistemas se caracterizan por la implementación de un mecanismo de retroalimentación, a través de la cual la señal de salida es comparada constantemente con la referencia de entrada. Esta configuración permite detectar desviaciones en el comportamiento del sistema y realizar ajustes automáticos para corregir posibles perturbaciones externas. A diferencia de los sistemas en lazo abierto, en los cuales la respuesta del sistema no influye en la acción de control, en un sistema de lazo cerrado la señal medida en la salida impacta directamente en las señales de control generadas, optimizando así la estabilidad y precisión del proceso ((*What Is PID Controller?* - *Electrical Volt*, n.d.)) (ver [Figura 2](#)).

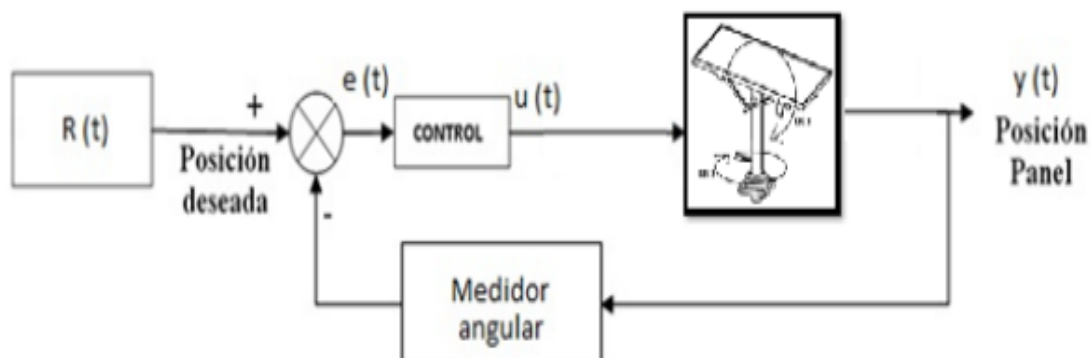
Figura 2 Control de lazo cerrado



Nota: Tomado de: (*¿Qué Es Un Sistema de Control de Movimiento?* - *Uranym*®, n.d.)

En el contexto del presente proyecto, se ha implementado un control de lazo cerrado ([Figura 3](#)), donde la retroalimentación del sistema proviene de un sensor que proporciona datos sobre la posición actual del seguidor en relación con el plano terrestre. Esta información es procesada por el controlador, permitiendo ajustar dinámicamente la orientación del panel fotovoltaico en función de la posición del sol en un momento específico.

Figura 3 Control de lazo cerrado del proyecto



Nota: tomado de (Ariel Cárdenas Martínez & Jesús Hernández Ortíz, 2014).

1.1.2 Tipos de celdas fotovoltaicas

La [Tabla 1](#) proporciona información detallada sobre tres tipos diferentes de células de silicio utilizadas en la fabricación de paneles solares, como lo son sus propias características, ventajas y limitaciones.

Tabla 1 Características de diferentes tipos de células fotovoltaicas

Células de Silicio	
Monocrystalino	<p>Muestra una disposición totalmente organizada. Su consistencia uniforme lo convierte en un buen conductor. Es complicado de producir.</p> <p>Se elabora a partir de silicio puro fundido y mezclado con boro.</p> <p>Se distingue por su tono azulado oscuro y aspecto metálico.</p> <p>Su eficiencia varía entre el 15 -18%.</p>
Policristalino	<p>Posee una estructura ordenada dividida en áreas distintas. Las irregularidades en los enlaces en las fronteras de los cristales reducen la eficiencia de la célula.</p> <p>Se fábrica de manera similar al silicio monocrystalino, pero con menos etapas de cristalización.</p> <p>Su superficie muestra cristales con diferentes tonalidades de azul y gris metálico.</p> <p>Tiene una tolerancia al calor menor que la del silicio monocrystalino.</p>

	Su eficiencia se encuentra entre el 12 -14%.
Amorfo	<p>Presenta un alto nivel de desorden. Contiene numerosos defectos estructurales y enlaces. Su proceso de producción es más sencillo y económico que los anteriores. Se aplica en forma de láminas delgadas sobre vidrio o plástico. Son eficaces bajo iluminación artificial. Tiene color marrón homogéneo. Su eficiencia es inferior al 10%.</p>

Nota: tomado de: (Méndez Muñoz Javier María, n.d.).

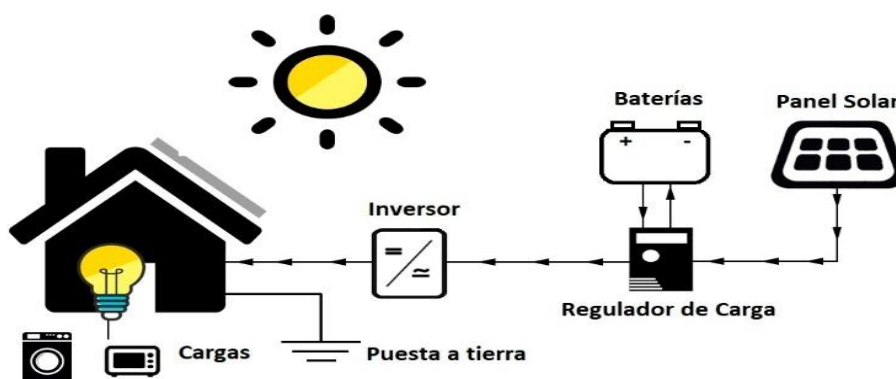
1.1.3 Componentes principales del sistema

En la [Figura 4](#) se presentan los componentes esenciales de un sistema fotovoltaico, cuya estructura puede modificarse dependiendo de si la instalación está conectada a la red eléctrica o si opera de manera independiente.

En los sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica (on-grid), la generación de energía no requiere almacenamiento, debido a que la electricidad generada por los paneles solares puede inyectarse directamente a la red. En este tipo de sistemas, los inversores desempeñan un papel fundamental al transformar la corriente continua generada por los módulos fotovoltaicos en corriente alterna, compatible con la infraestructura eléctrica (Quispe Morales & Paredes Anchatipán, 2024).

Por otro lado, en los sistemas fotovoltaicos fuera de la red (off-grid), es indispensable contar con un sistema de almacenamiento energético a través de baterías, permitiendo el suministro de electricidad durante periodos sin radiación solar. Además, se requiere un regulador de carga, cuya función es proteger las baterías de sobrecargas o descargas (Aurora & Larocca, 2022)

Figura 4 Partes de un sistema fotovoltaico

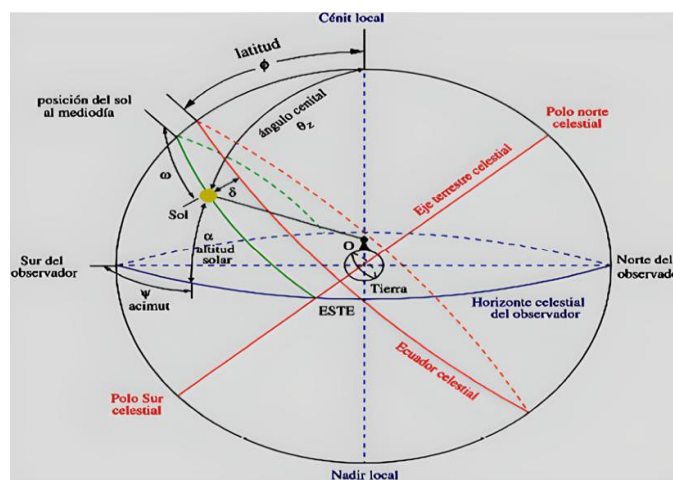


Nota: Trayectoria del sol, tomado de (ENGI, 2020)

1.1.4 Geometría y movimiento solar

La [Figura 5](#) es un diagrama de coordenadas celestes y solares, el cual representa la trayectoria diaria del sol en función de la posición de un observador en la tierra. Este diagrama se utiliza comúnmente en astronomía y en el diseño de sistemas fotovoltaicos para analizar la incidencia de la radiación solar en diferentes momentos del día y del año. (Narciso Moro Garrido, n.d.)

Figura 5 Trayectoria y posición del sol



Nota: Trayectoria del sol, tomado de (Salgado,2010)

El análisis de la radiación solar a través de la [Figura 5](#), requiere de una serie de símbolos y variables que permiten describir de manera precisa la posición del sol en el cielo y su incidencia sobre distintas superficies. En este contexto, la [Tabla 2](#) presenta la definición y descripción de los de los ángulos solares empleados en estos cálculos.

Tabla 2 Descripción de ángulos solares

Variable	Símbolo	Descripción
Azimut de la superficie	γ	Desviación de la proyección horizontal de la línea perpendicular a la superficie con respecto al meridiano local. Inclinación hacia el sur. Siendo negativa hacia el este y positiva hacia el oeste
Angulo horario	Ω	Desplazamiento angular con el sur medido de este a oeste del sol. 15° cada hora (negativo en la mañana, positivo en la tarde) $w = 0$ al medio día
Angulo incidencia	ϕ	Angulo entre el haz de radiación y la normal de la superficie.
Zenit	ϕ_z	Angulo entre la vertical (terrestre) y el haz de la radiación solar.
Altura solar	α_s	Se refiere al ángulo formado entre la posición del sol y el plano horizontal del horizonte.
Azimut solar	γ_s	Es el ángulo que se mide en el plano horizontal entre la dirección norte y la proyección de la línea que marca la posición del sol.

Nota: tomado de: (Sector Electricidad, n.d.)

A continuación, se detallan las ecuaciones y conceptos clave que permiten calcular los parámetros para estimar la radiación solar.

Angulo de declinación solar (δ): representa la altura máxima del sol en el cielo durante el mediodía solar, momento en el cual alcanza su punto máximo en la trayectoria diaria. Este ángulo varía a lo largo del año entre -23.45° y 23.45° , siendo positivo en el hemisferio norte y negativo en el hemisferio sur. La variación de δ está determinada por la inclinación del eje terrestre y su movimiento orbital alrededor del sol, reflejando así el desplazamiento aparente del sol respecto al ecuador. La declinación solar se calcula a través de la siguiente ecuación, donde, n representa el número del día en el año:

$$\delta = 23.45 \sin\left(360 \frac{284 + n}{365}\right); \text{ Donde } n \text{ es el numero del dia del año} \quad (1)$$

En cualquier instante del día, la posición del sol en relación con un punto específico de la tierra se define a través de dos coordenadas fundamentales: la altura y el azimut solares. Estos parámetros permiten conocer la orientación y la inclinación óptima de los paneles solares para maximizar la captación de energía.

Altura solar (α_s)

$$\alpha_s = 90^\circ - \theta_z \quad (2)$$

Ángulo cenital (θ_z)

$$\cos(\theta_z) = \cos(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) + \sin(\phi) \cdot \sin(\delta) \quad (3)$$

Donde:

- ϕ es la latitud del lugar, positiva en el hemisferio norte. ($-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$)
- δ es la declinación solar
- ω es el ángulo horario

Azimut solar (γ_s)

$$\gamma_s = \text{signo de } \omega (\pm) \cos^{-1} \left(\frac{\cos(\theta_z) * \sin(\phi) - \sin(\delta)}{\sin(\theta_z) * \cos(\phi)} \right) \quad (4)$$

Este ángulo es crucial para la alineación precisa de los paneles y seguidores solares, permitiendo una orientación óptima en función al desplazamiento aparente del sol a lo largo del día.

1.2 Estrategias de control más comunes usadas en seguidores solares

1.2.1 Control PID

El control PID es uno de los controladores más comunes, por su facilidad de implementación, robustez en la mayoría de los casos. Estas características mencionadas hacen que sea uno de los controladores más utilizados en la industria.

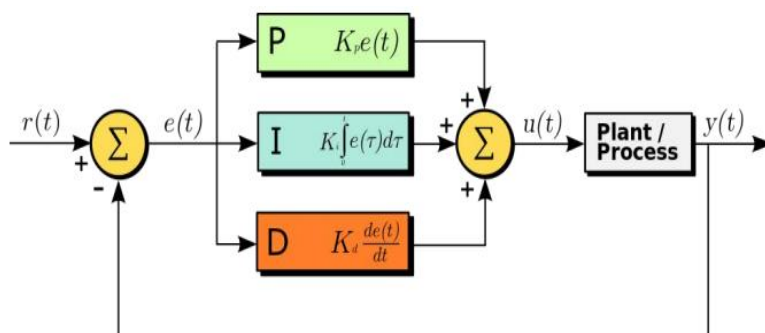
El controlador PID (Proporcional Integral Derivativo) es un tipo de controlador de lazo cerrado que gracias a su relativa sencillez está presente en la mayoría de los controladores de este tipo, se puede describir con la siguiente ecuación.

$$u(t) = K \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (5)$$

donde u es la variable de control y e es el error de seguimiento. Por lo tanto, la variable de control u es la suma de tres términos: el término P (proporcional al error), el término I (proporcional a la integral del error) y el término D (proporcional a la derivada del error). Los parámetros del controlador son la ganancia proporcional K , el tiempo integral T_i y el tiempo derivativo T_d .

En la [Figura 6](#) se presentan los tres tipos de bloques que conforman el sistema.

Figura 6 Diagrama de bloques del PID



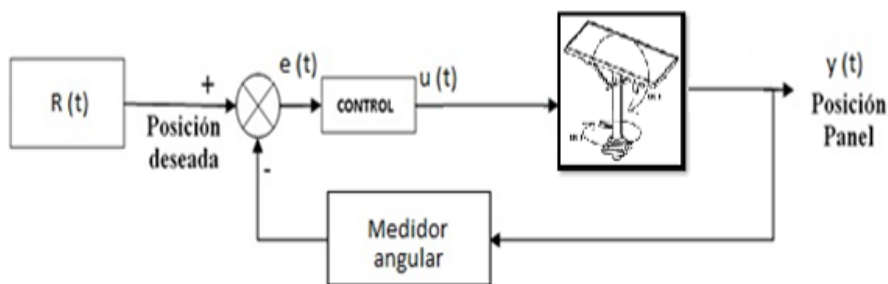
Nota: tomado de(Controlador PID - Wikipedia, La Enciclopedia Libre, n.d.)

1.2.2 Sistema de control ON-OFF

Un sistema de control ON/OFF, también conocido como de dos posiciones o todo/nada, este tipo de control opera con dos estados fijos: encendido (ON) y apagado (OFF), activando o desactivando un actuador según si la variable de proceso supera o cae por debajo de un valor de referencia setpoint. Por ejemplo, en un sistema de control de seguidor solar de un solo eje, se puede implementar un control ON/OFF utilizando dos sensores de luz LDR colocados en extremos opuestos de una barrera que genera sombra parcial; el microcontrolador (como un Arduino) compara la intensidad luminosa captada por ambos sensores, y si la diferencia entre ellos supera un umbral predefinido (setpoint), se activa el motor para mover el panel en dirección al sensor con mayor luz (estado ON), mientras que si ambos sensores detectan niveles de luz similares, lo que indica que el panel está bien alineado con el sol, el motor se apaga automáticamente (estado OFF); este tipo de control es sencillo, eficiente y económico, ideal para sistemas básicos, aunque se recomienda aplicar una histéresis para evitar encendidos y apagados constantes cuando la diferencia de luz se mantiene cerca del setpoint.

La [Figura 7](#) presenta el diagrama de bloques correspondiente a la configuración de la planta en lazo cerrado.

Figura 7 Modelo de seguidor solar



Nota: tomado de (Ariel Cárdenas Martínez & Jesús Hernández Ortiz, 2014).

Marco referencial

1.3 Marco de antecedentes

El trabajo desarrollado por Juan Miranda (2011) se enfocó en el diseño y construcción de un sistema de captación de energía solar equipado con dos paneles fotovoltaicos y sistemas de seguimiento avanzados para maximizar la eficiencia de la captación solar. Utilizando motorreductores eléctricos y controladores Arduino, el sistema pudo seguir eficazmente la trayectoria del sol, además se evaluaron dos métodos de seguimiento: uno basado en ecuaciones de posición solar y otro en las diferencias detectadas por las lecturas de fotoceldas. El análisis reveló que el seguimiento basado en ecuaciones de posición solar fue más eficiente, logrando una captación de energía superior en comparación con el método que utilizaba fotoceldas.

El proyecto de Alviades David (2018) se centró en desarrollar un robot capaz de seguir una trayectoria solar mediante el uso de sensores y actuadores simples, enfocándose en la aplicación de técnicas de automatización y control básicas, sin embargo el proyecto explora métodos de seguimiento de trayectorias, los cuales son aplicables a otras tecnologías como los paneles solares, sugiriendo que el robot podría optimizar la captación de energía solar mediante el ajuste automático a la posición óptima del sol a lo largo del día .

El trabajo de grado de Juan Osorio (2010) se encargó de investigar la viabilidad de adoptar energía solar en una granja avícola para satisfacer sus demandas energéticas. Se estableció una red compuesta por 54 paneles solares que no solo satisfacen el consumo energético de la granja, sino que también generan excedentes que se venden, proporcionando un beneficio económico adicional.

El trabajo desarrollado por Juan Jiménez y Luis Reyes (2014) se enfocó en un seguidor solar con controlador PID con modo deslizante, ajuste dinámicamente su posición para optimizar

la absorción solar. Este sistema demostró ser altamente eficaz en seguir la trayectoria del sol ajustándose automáticamente en dos ejes, lo que resulta en una captación energética más efectiva durante el día. Comparado con los sistemas de seguimiento estándar, el controlador PID con modo deslizante mostró una superioridad notable en precisión y eficiencia.

El proyecto aborda el diseño, modelado y pruebas de un sistema de seguimiento solar activo de un solo eje, utilizando una combinación de herramientas de modelado computacional y pruebas experimentales, el estudio comenzó con el diseño de un modelo del sistema mediante el software MATLAB, seguido por la fabricación de un prototipo físico para realizar pruebas experimentales. Sensores de resistencia dependiente de la luz (LDR) fueron empleados para detectar la intensidad de la radiación solar y ajustar adecuadamente la orientación del panel solar. Los resultados experimentales confirmaron las simulaciones, mostrando que el seguimiento solar activo puede incrementar notablemente la eficiencia de los paneles solares. Se encontró que el sistema de seguimiento podría mejorar la captación de energía solar hasta en un 30% para un rastreador de un solo eje y hasta un 72% para un rastreador de dos ejes, comparado con un sistema fijo. Este estudio es esencial por que se enfoca en optimizar la eficiencia de los sistemas de energía solar a través de tecnologías de seguimiento. (Chin et al., 2011).

Metodología

Para el desarrollo de este trabajo se siguió la siguiente metodología:

1.4 Alcance de la investigación

El proyecto adoptó un enfoque mixto para su desarrollo, por lo que se aplicaron métodos cualitativos para observar y describir cómo se ajusta el controlador en respuesta a los cambios en

la inclinación del panel, y cuantitativos para medir la potencia generada por el panel solar en diferentes condiciones de inclinación.

El banco experimental tiene un alcance de tipo explicativo al querer establecer una causa efecto entre sus variables, siendo la variable dependiente la potencia generada, y la independiente el grado de inclinación, recordando que el objetivo es obtener un banco experimental que sirva como herramienta académica, ya sea para complementar el estudio de energías renovables, como la implementación de estrategias de control.

Este banco estará equipado con un panel fotovoltaico, con dimensiones aproximadas de 19x25 cm, diseñado para evaluar la influencia del ángulo de inclinación en la captación de radiación solar y la generación de potencia eléctrica. El sistema incluirá una placa de desarrollo con un microcontrolador, encargado de gestionar el control automatizado del sistema. Adicionalmente, se integrarán sensores de luz, los cuales permitirán monitorear las variaciones de radiación solar y ajustar el ángulo del panel en función de estas mediciones. La regulación del ángulo de inclinación será llevada a cabo mediante actuadores capaces de generar el torque necesario para girar el panel de forma estable y controlada, garantizando así una respuesta eficiente del sistema.

1.5 Desarrollo del Montaje del sistema mecánico

1.5.1 Descripción detallada del sistema

El sistema está compuesto por un bastidor de soporte, un panel solar, actuadores, un sistema de transmisión, un potenciómetro lineal, un conjunto de sensores de luz y una fuente de alimentación.

El bastidor será el encargado de soportar las cargas del panel, asegurando la estabilidad y el correcto funcionamiento. Esta estructura proporciona rigidez y resistencia, permitiendo mantener la alineación del sistema.

El panel solar consiste en un conjunto de celdas fotovoltaicas dispuestas sobre él, el marco está conectado al sistema de transmisión, permitiendo el movimiento de orientación del panel respecto al eje: elevación (inclinación).

Los actuadores principales del sistema tienen como función regular la inclinación del panel, estos son alimentados por una fuente de voltaje.

El sistema incluirá un potenciómetro lineal instalado sobre el bastidor, este mide de forma continua el ángulo de inclinación del panel, proporcionando una señal analógica proporcional al desplazamiento mecánico.

1.6 Planteamiento de alternativas

1.6.1 Alternativa 1. Seguidor solar con cilindros hidráulicos

Se describe un seguidor solar que consta de un pedestal en el que se monta un soporte estructural para un panel solar. Este sistema incluye una base que se fija al suelo y sobre esta se encuentra un mecanismo giratorio de eje vertical, anclado al pedestal. Adicionalmente, cuenta con un cilindro accionador para el giro azimutal que se une al suelo mediante un anclaje. El otro extremo de este cilindro está conectado al mecanismo giratorio, permitiendo que, al accionarse, este último gire. La [Figura 8](#) muestra un esquema representativo de esta alternativa de diseño.

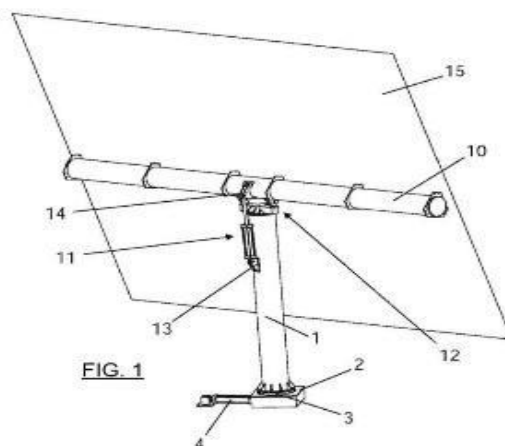
Ventajas:

- El diseño del pedestal ocupa poco espacio y facilita un movimiento continuo
- Ofrece una larga durabilidad.

Desventajas:

- Requiere instalaciones especializadas para los cilindros accionadores.
- El mantenimiento puede ser complicado.
- La instalación del sistema implica costos elevados.

Figura 8 Alternativa 1



Nota: tomado de:(SEGUIDOR SOLAR. (41) (1 de octubre de 2012) : Patentados, n.d.)

1.6.2 Alternativa 2. Robot seguidor

Esta opción presenta un seguidor solar automatizado y ligero, compuesto por un soporte vertical que ajusta el movimiento azimutal y la altura del panel solar mediante servomotores. Estos motores se gestionan a través de un Arduino MEGA, utilizando fotorresistencias como sensores de luz para alinear el panel hacia la posición de máxima luz solar. Un sistema de seguimiento solar (Tracking Solar) controla este proceso, proporcionando las coordenadas para optimizar el rendimiento del panel solar durante el día. Además, el sistema puede enviar señales para ajustar automáticamente grupos de paneles solares y maximizar la captación solar. La [Figura 9](#) muestra el prototipo correspondiente a esta propuesta.

Ventajas:

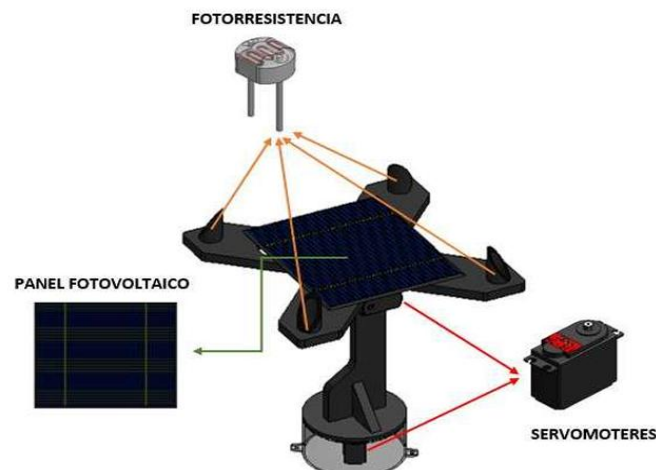
- Utiliza materiales económicos y accesibles.

- Totalmente automatizado, facilitando su uso.
- Alta eficiencia energética gracias a la precisión de los servomotores.
- Diseño del sistema es ligero, seguro y fácil de mantener.
- Contribuye al ahorro de energía al ajustar la posición de otros paneles.

Desventajas:

- Durabilidad limitada del robot, necesitando un sistema de movimiento más avanzado para uso industrial.
- Pérdida de energía si el terreno es muy inestable.
- No es adecuado para operar bajo condiciones de lluvia intensa.

Figura 9 Alternativa 2



Nota: tomado de:(García David & Viadero Carlos, 2018)

1.6.3 Alternativa 3.

Se describe un seguidor solar bidimensional que emplea una estructura metálica montada sobre una base fija. Esta estructura sostiene un panel solar que puede girar en dos ejes: horizontal (azimutal) y vertical (cenital). Para ello, se integran motores a pasos controlados por una placa Arduino, los cuales permiten el seguimiento automático del sol a lo largo del día. El sistema utiliza

un conjunto de sensores de luz (fotorresistencias) distribuidos en la parte superior del panel, que detectan la dirección de la mayor intensidad luminosa. A partir de esta información, el Arduino activa los motores para reorientar el panel hacia la posición óptima. La [Figura 10](#) presenta el diseño correspondiente a esta opción.

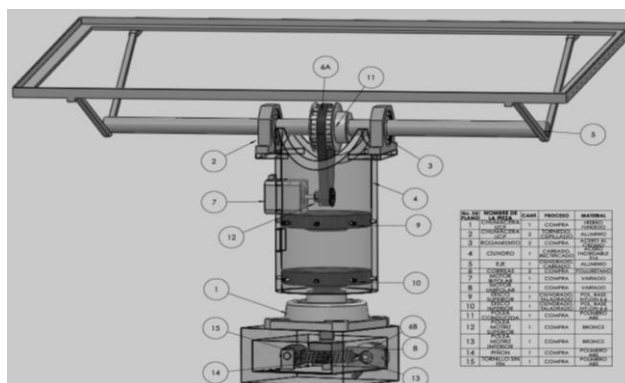
Ventajas:

- Permite un seguimiento solar automático en dos ejes, mejorando significativamente la eficiencia de captación energética.
- Usa componentes de bajo costo y ampliamente disponibles.
- El control electrónico es preciso y fácilmente reprogramable.

Desventajas:

- Requiere conocimientos de electrónica y programación para su implementación.
- La calibración inicial de los sensores y motores puede ser compleja.
- El sistema depende de energía eléctrica para operar los motores, lo que puede limitar su autonomía si no está bien gestionado.

Figura 10 Alternativa 3



Nota: tomado de:(Seguidor Solar Con Motores a Paso, n.d.).

1.7 Selección de alternativas del sistema

La selección de sistema se realizó mediante el uso de la matriz de Pugh con tres alternativas propuestas, cada sistema es evaluado con 8 criterios, que se encuentran en la columna izquierda, con una prioridad. Luego, para cada sistema, hay una columna de puntuación ponderada, que multiplicará la prioridad por una calificación asignada como se observa en la [Tabla 3](#).

Tabla 3 Matriz Pugh del sistema

Criterio	Prioridad	Cilindros hidráulicos	Ponderado	Robot seguidor	Ponderado	Seguidor biaxial	Ponderado
Eficiencia energética	9						
Costo de implementación	8						
Mantenimiento	7						
Durabilidad	6						
Automatización	5						
Facilidad de instalación	4						
Seguridad	3						
Peso del sistema	2						
TOTAL							

1.8 Selección de elementos del sistema de control

1.8.1 Microcontrolador

Para seleccionar el microcontrolador a utilizar en el montaje electrónico, se empleó una matriz PUG, como se muestra en [Tabla 4](#).

Tabla 4 Matriz PUG de selección del microcontrolador

		Criterios de selección					Suma
		Costo	Tiempo de entrega	Funciones	Espacio y aspecto	Plataforma de desarrollo	
Opción		Pesos de los criterios					
		25%	10%	25%	15%	25%	100%
A.	NOTA PUNTAJE						
B.	NOTA PUNTAJE						
C.	NOTA PUNTAJE						

La matriz contó con varias columnas. La primera corresponde a la columna "Opción", en la cual se presentaron las distintas alternativas. A continuación, se incluyeron las columnas correspondientes a los criterios de selección, cada una acompañada del porcentaje de peso asignado. Estos criterios y sus respectivos porcentajes fueron definidos según las necesidades.

En este caso, se requirió que el microcontrolador tuviera un buen costo (25%), un tiempo de entrega adecuado (10%), funciones apropiadas para el proyecto (25%), que el tamaño y aspecto físico no fueran excesivos (15%), y que la plataforma de desarrollo fuera amigable y fácil de usar (25%).

A cada alternativa se le asignaron valores entre 1 y 5 según su desempeño en cada criterio. Estos valores fueron multiplicados por el peso correspondiente y luego sumados. La opción que obtuvo el mayor puntaje fue la seleccionada para el proyecto.

1.8.2 Panel Solar

Al igual que se hizo con el microcontrolador, para la selección del panel solar se definieron los criterios de evaluación junto con sus respectivos pesos, los cuales se presentan en la [Tabla 5](#):

Tabla 5 Matriz PUG de selección del panel solar

		Criterios de selección			Suma
		Costo	Tiempo de entrega	Dimensiones	
Opción		Pesos de los criterios			
		25%	35%	40%	100%
A.	NOTA PUNTAJE				
B.	NOTA PUNTAJE				
C.	NOTA PUNTAJE				

Dado que el objetivo principal del banco experimental no fue la generación ni el almacenamiento de potencia, sino su uso con fines académicos como herramienta de laboratorio, la capacidad de generación del panel no se consideró un factor relevante en la elección de la referencia.

Por lo tanto, se definieron tres criterios de selección: costos (25%), tiempo de entrega (35%) y dimensiones (40%).

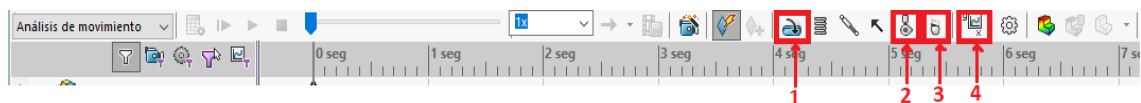
1.8.3 Motor DC

Los actuadores encargados de variar el ángulo de inclinación del panel fueron motores DC, por lo que al ser estos los responsables de controlar la variable física deben tener la capacidad adecuada (Torque necesario) para mover el sistema. Para el proyecto se recibió la donación de dos motores VEX 393, por lo que, al contar ya con los actuadores, se procedió a realizar ingeniería inversa con el fin de verificar su capacidad para cumplir con las exigencias del sistema.

Dado que el fabricante no proporciona las curvas características de los motores, se optó por instalarlos y analizar el comportamiento del panel en funcionamiento, observando y tomando datos de su movimiento (posición angular en función del tiempo).

Con estos datos, y haciendo uso del módulo SolidWorks Motion (Ver [Figura 11](#)), se realizaron simulaciones que permitieron analizar el comportamiento dinámico del sistema y validar si el par motor era suficiente para cumplir con los requerimientos del proyecto.

Figura 11 Herramientas análisis de movimiento Solidworks motion



Se hizo uso de la opción “contacto 2”, “gravedad 3” y finalmente la opción “añadir motor 1”, el cual permite ingresar los datos de desplazamiento angular con los tiempos medidos. El mismo software permite ver gráficas de Torque y Potencia (4), y se evidenció de forma numérica (por medio del software) y física (probándolos en la planta) si los actuadores cumplen.

1.8.4 Componentes de acondicionamiento de señal.

Para los componentes restantes, como el puente H, el potenciómetro y las fotorresistencias, no se elaboró una matriz de selección, ya que estos corresponden a circuitos de acondicionamiento de señal.

1.9 Identificación de los parámetros adecuados del controlador

Para llevar a cabo esta etapa, primero fue necesario establecer cuál variable se deseaba controlar. Una vez definida, se procede a determinar las estrategias de control a implementar. Con base en ello, es posible identificar los parámetros requeridos para el diseño de cada sistema de control.

1.10 Desarrollo del montaje de componentes electrónicos y generación del sistema de control

1.10.1 Comprobación del estado y funcionamiento de los componentes.

En primer lugar, se comprobó el estado y funcionamiento de los motores VEX 393, realizando la conexión de los módulos puente H (Ver [Figura 12](#)). Luego, se verificaron los datos de voltaje obtenidos a través del potenciómetro (Ver [Figura 13](#)), así como los valores registrados por las fotorresistencias (Ver [Figura 14](#)). Todos estos componentes estuvieron conectados a una protoboard y fueron comandados mediante una placa de microcontrolador. Las pruebas concluyen una vez se garantizó el correcto funcionamiento de cada elemento que conformará el sistema.

Figura 12 Conexiones para probar motores DC.

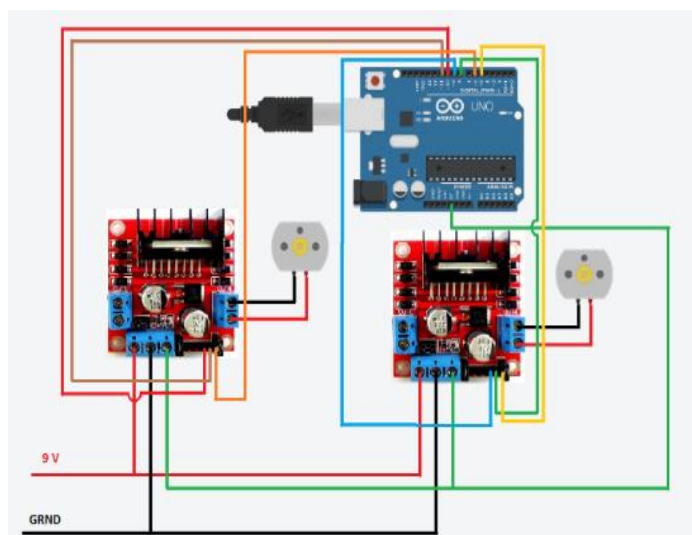
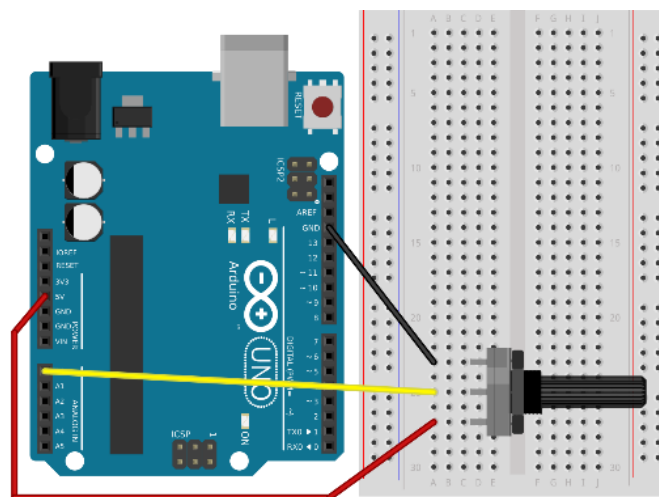


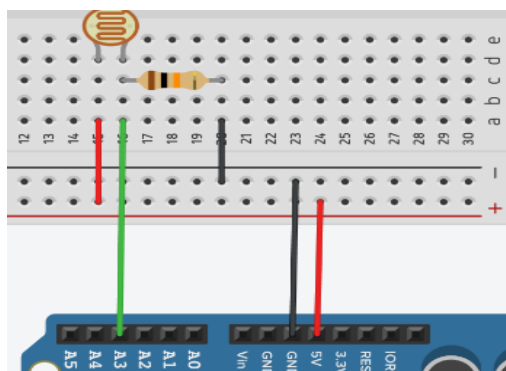
Figura 13 Conexiones para probar el potenciómetro



Nota: tomada de: [https://shop.complubot.com/potenciometro-circular-de-10k-lin-2-uidades-p-1-](https://shop.complubot.com/potenciometro-circular-de-10k-lin-2-uidades-p-1-50-191/)

50-191/

Figura 14 Conexiones para probar fotorresistencias.

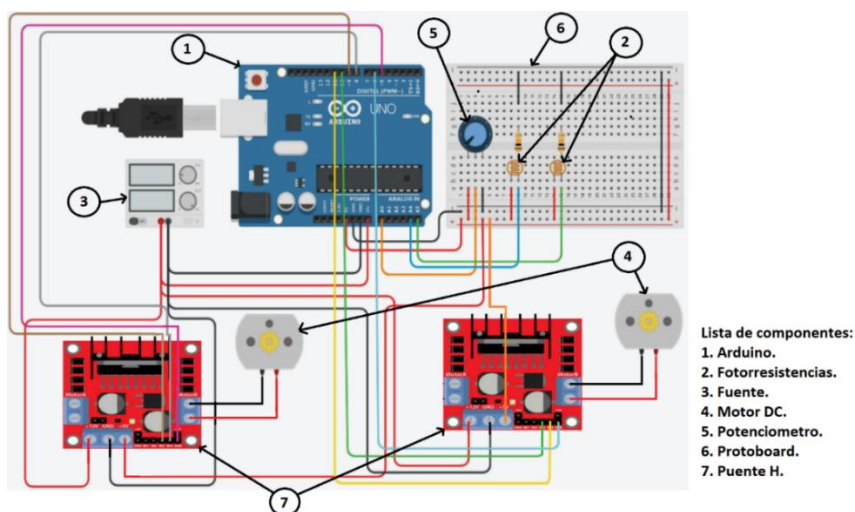


Nota: tomado de: <https://paraarduino.com/sensores/fotorresistencias/valor-maximo-de-una-fotorresistencia/>

1.10.2 Conexión de los componentes electrónicos.

Una vez realizada la comprobación individual, se procedió a la integración conjunta de todos los componentes electrónicos (Ver [Figura 15](#)). Aunque en primera instancia la ubicación de las fotorresistencias no fue relevante, en esta etapa se debe adecuar su lugar en la planta, de modo que, al girar el panel, estos sensores roten junto con él, permitiendo obtener mediciones en tiempo real.

Figura 15 Diagrama de conexiones del sistema



Nota: Revisar las conexiones físicas, con las declaradas en el programa de Arduino.

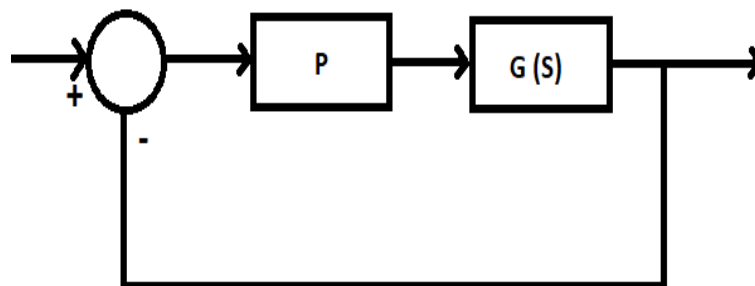
1.10.3 Obtención de la función de transferencia en lazo cerrado.

Lo primero que se obtuvo fue la función de transferencia en lazo cerrado. Para ello, se consideró como entrada un valor proporcionado por los sensores de luz. Dado que se planea implementar el sistema de control a partir de la diferencia entre las lecturas de dos fotorresistencias, se definió la entrada como el valor “deseado” de dicha diferencia.

Una vez establecida la entrada como esa diferencia deseada, la salida del sistema es entonces la diferencia real entre las lecturas de las fotorresistencias, es decir, el valor que el sistema debe corregir para alcanzar el objetivo de maximizar la captación de luz.

Para obtener la función de transferencia en lazo cerrado, se implementó un controlador proporcional (P) y se analizó la respuesta del sistema (Ver [Figura 16](#)). Se registró el tiempo que tardó la planta en estabilizarse, y el diagrama de bloques correspondiente se presenta a continuación:

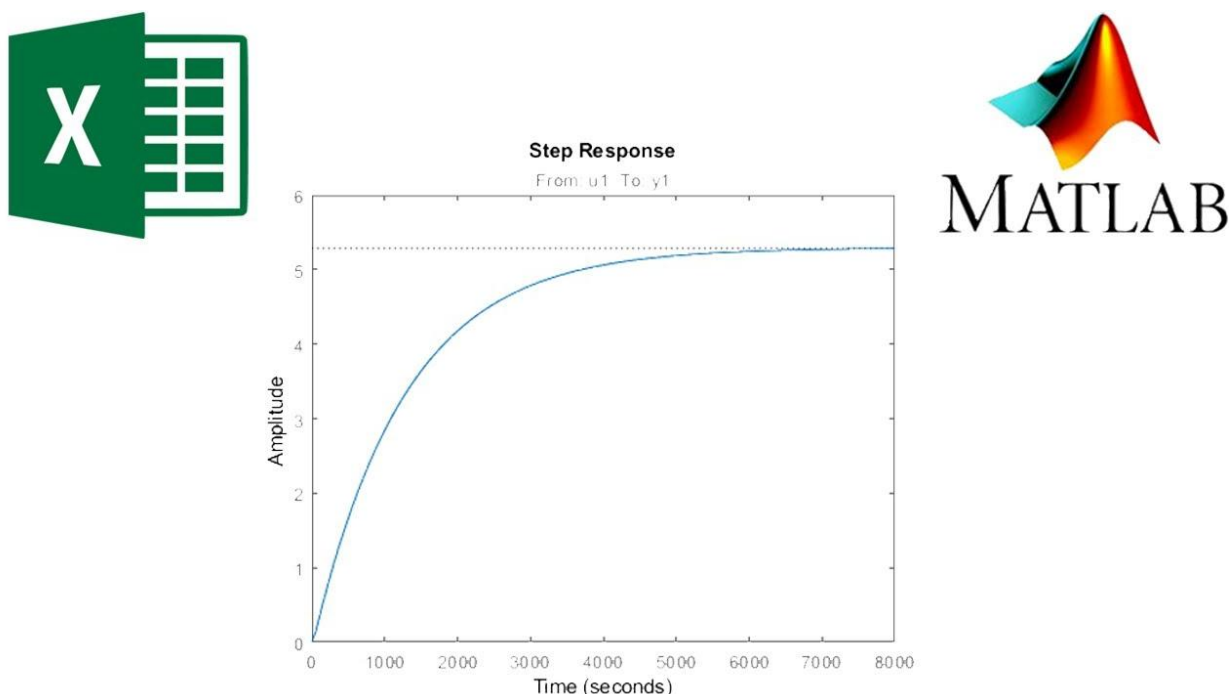
Figura 16 Control en lazo cerrado, con controlador P



1.10.4 Caracterización de la planta “LuzBot”

Luego de realizar las pruebas, se utilizó la herramienta MATLAB (Ver Figura 17) para obtener una función de transferencia en lazo cerrado. A partir de esta y del valor de la constante proporcional, se determinó la ecuación de transferencia de la planta.

Figura 17 ejemplo de cómo obtener una función de transferencia en MATLAB.



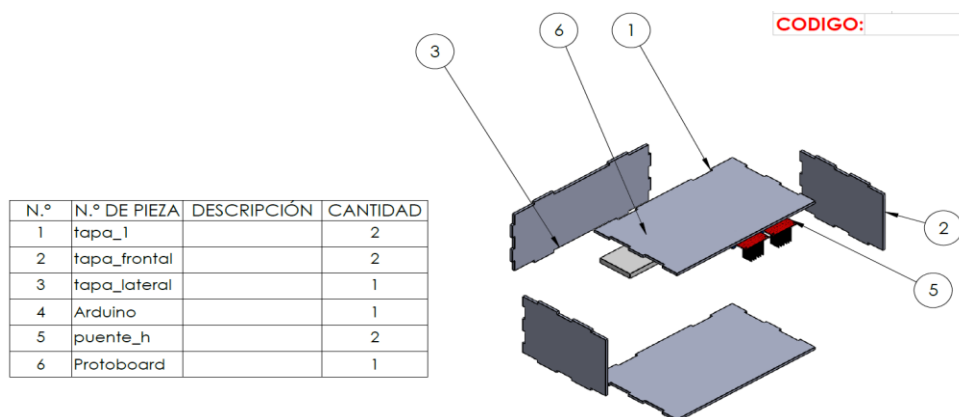
Nota: tomado de: <https://www.youtube.com/watch?v=0MdxsFBIYpg>

1.11 Integración del sistema mecánico con el sistema de control para regular el ángulo de inclinación a través de programación del panel fotovoltaico.

En esta etapa se integró lo ya diseñado y montado mecánicamente con los circuitos y componentes electrónicos. Dado que estos no podían quedar distribuidos de manera aleatoria, fue necesario asignarles un sitio específico que permitiera el transporte del panel, así como su posterior uso y exhibición. Para ello, se diseñó y ensambló una caja anclada al bastidor de los soportes del

panel (Ver [Figura 18](#)), además de contar con una tapa con bisagra para facilitar el acceso a la electrónica de forma sencilla y segura.

Figura 18 Caja de electrónica



1.12 Evaluación del funcionamiento del controlador del sistema de inclinación mediante pruebas experimentales.

La evaluación del funcionamiento se hizo mediante un protocolo de pruebas, como se muestra en la [Figura 19](#). Esto implicó seleccionar un lugar adecuado, preferiblemente con acceso directo a la radiación solar, evitando cualquier obstrucción que pudiera generar sombra sobre el panel fotovoltaico.

En el segundo paso, se posicionó el panel en tres posiciones iniciales distintas: izquierda, derecha y central. En cada posición se midió la potencia generada, registrando estos datos como referencia inicial. A continuación, se configuró el controlador (PID y ON/OFF), y se evaluó cómo variaba la potencia generada al modificar el ángulo de inclinación del panel.

Finalmente, se estudian y discuten las gráficas para evaluar el funcionamiento del banco experimental.

Figura 19 Protocolo de pruebas



Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a lo largo del desarrollo e implementación del sistema de seguimiento solar unidimensional. En primer lugar, se detalla el proceso de diseño y selección del sistema mecánico, desde la evaluación de alternativas hasta la fabricación y montaje final del soporte del panel fotovoltaico. Posteriormente, se expone la selección de los componentes electrónicos y mecánicos más adecuados para el sistema, incluyendo el microcontrolador, el panel solar y el motor. Asimismo, se identificaron y ajustaron los

parámetros del controlador, para posteriormente integrar el montaje electrónico con el sistema mecánico. Finalmente, se evaluó el desempeño del sistema mediante pruebas experimentales, enfocándose en el funcionamiento del controlador de inclinación y su efecto sobre la eficiencia en la generación de potencia del panel.

1.13 Desarrollo del sistema mecánico

1.13.1 Evaluación de alternativas

Al desarrollar la evaluación comparativa entre las tres alternativas, el sistema seleccionado fue el seguidor biaxial, esta alternativa destacó por su alta eficiencia energética, facilidad de mantenimiento y nivel de automatización, lo que la convierte en la opción más adecuada para el sistema, como se muestra en la [Tabla 6](#).

Tabla 6 Evaluación de alternativas

Criterio	Prioridad	Cilindros hidráulicos	Ponderado	Robot seguidor	Ponderado	Seguidor biaxial	Ponderado
Eficiencia energética	9	7	63	9	81	8	72
Costo de implementación	8	3	24	7	56	8	64
Mantenimiento	7	3	21	6	42	7	49
Durabilidad	6	9	54	6	36	4	24
Automatización	5	4	20	8	40	9	45
Facilidad de instalación	4	3	12	7	28	9	36
Seguridad	3	7	21	8	24	8	24
Peso del sistema	2	5	10	7	14	9	18
TOTAL			225		321		332

El banco está inspirado en la alternativa del seguidor solar biaxial; sin embargo, se implementaron modificaciones en su diseño, entre ellas, el tipo de transmisión y la simplificación del sistema con un solo grado de libertad, entre otras cosas. Estas adaptaciones buscan adecuar el sistema a los objetivos educativos y experimentales del proyecto. A continuación, se presenta la descripción detallada del sistema.

1.13.2 Descripción detallada del sistema.

El sistema consta de un bastidor de soporte, un panel solar, un sistema de transmisión por engranajes, dos motores de corriente directa (DC), un potenciómetro lineal, un conjunto de fotorresistencias (LDRs) y una fuente de alimentación externa.

El bastidor está construido de material metálico y presenta una configuración tipo caballete que proporciona soporte estructural y estabilidad. En su estructura incorpora soportes laterales con orificios para la instalación de ejes, motores y otros componentes de medición.

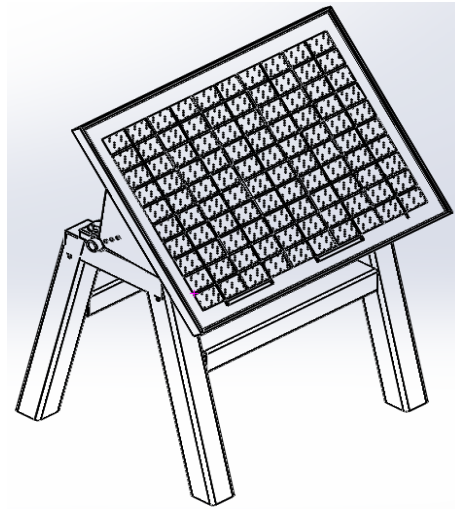
El panel solar consiste en un conjunto de celdas fotovoltaicas dispuestas sobre dos puntos de apoyo. Se conecta al sistema de transmisión, permitiendo el movimiento de orientación del panel respecto al eje: elevación (inclinación).

El sistema de transmisión comprende un conjunto de engranajes acoplados a los motores DC, cuyo objetivo es amplificar el par de fuerza y facilitar movimientos controlados y precisos del panel solar.

Los dos motores DC son los actuadores principales del sistema: ambos se encargan de regular la inclinación del panel (movimiento vertical) estos motores son alimentados por una fuente de voltaje.

El sistema incluye un potenciómetro lineal instalado sobre el eje de inclinación del panel solar. Este potenciómetro mide de forma continua el ángulo de inclinación del panel, proporcionando una señal analógica proporcional al desplazamiento, en la [Figura 20](#) se muestra un bosquejo del sistema.

Figura 20 Boceto del prototipo del banco



Además, el sistema cuenta con fotorresistencias (LDRs) ubicadas sobre el panel. Estas permiten detectar la intensidad de la luz incidente en diferentes inclinaciones. La comparación de los valores de resistencia se emplea para determinar que tanto deben girar los motores (y el sentido de giro).

1.14 Fabricación del soporte del panel fotovoltaico

El primer paso en la fabricación del sistema fue la construcción del bastidor, el cual constituye la estructura sobre la que se montarán todos los demás componentes del sistema. El diseño y las dimensiones de este bastidor son determinantes, ya que a partir de ellas se definen la disposición, el ajuste y el ensamblaje de los elementos mecánicos y electrónicos del seguidor (Ver [Figura 21](#)). Una vez construido y asegurado el bastidor, se continúa con la instalación y montaje de los componentes funcionales, como el eje, los engranajes y chumaceras.

Figura 21 Bastidor



1.14.1 Diseño y montaje del sistema de transmisión

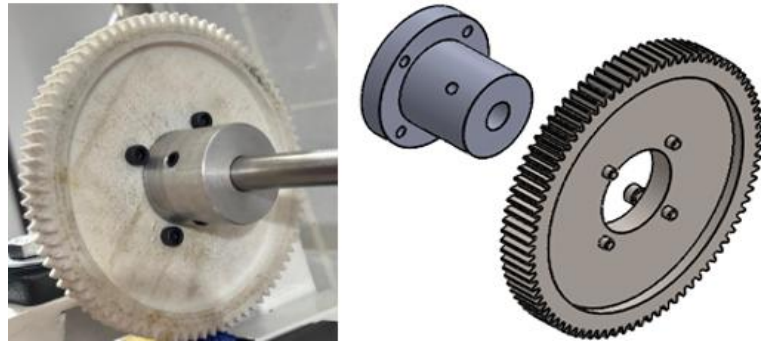
En el desarrollo del sistema de transmisión del seguidor solar, se diseñaron engranajes rectos mediante modelado CAD, a partir de cálculos que se presentan en el [apéndice F](#). Posteriormente, dichos engranajes fueron fabricados mediante impresión 3D en material PLA de alta resistencia, el cual es ideal para soportar cargas moderadas y permitir una fabricación rápida y económica, como se muestra en la [Figura 22](#).

Figura 22 Impresión de 3d de los engranajes



Para mejorar la rigidez estructural y la capacidad de transmisión de torque, se implementó una solución de ensamblaje mecánico reforzado (Ver [Figura 23](#)): una brida metálica fue acoplada firmemente entre el cubo del engranaje y la corona plástica del engranaje.

Figura 23 Engranajes



Esta brida actúa como un elemento intermedio de fijación, uniendo de forma sólida el eje de acero con la rueda dentada. La unión se aseguró mediante tornillos prisioneros (tipo Allen), distribuidos de manera simétrica, que garantizan un acople firme evitando deslizamientos relativos bajo carga.

1.14.2 Fabricación del eje de transmisión y selección de chumaceras

Se inició el diseño del eje mediante un análisis detallado de esfuerzos, con base en los principios de resistencia de materiales. En primer lugar, se identificaron las cargas externas a las que estaría sometido el eje durante la operación, tales como momentos torsionales y cargas radiales generadas por el acoplamiento de engranajes, con esta información, se procedió a realizar los cálculos de resistencia al eje, aplicando teorías de falla como el criterio de Von Mises. El proceso de fabricación del eje incluyó operaciones de torneado, para obtener los diámetros exteriores según las especificaciones de diseño, así como taladrado y roscado en puntos estratégicos.

Una vez determinadas las cargas que actúan sobre el eje se procedió a realizar la selección de las chumaceras (Ver [Figura 24](#)), esta se llevó a cabo considerando varios criterios técnicos, tales como el diámetro del eje, la carga dinámica y estática admisible de los rodamientos, el tipo de montaje (horizontal o vertical).

Figura 24 Selección de las chumaceras



Cabe destacar que todos los cálculos detallados del diseño del eje (diámetros, esfuerzos, factores de seguridad, longitudes, , etc.) se encuentran disponibles en el [apéndice D](#).

1.14.3 Fabricación del soporte del panel

Para permitir el montaje del panel solar sobre el eje, se diseñó y fabricó un soporte triangular reforzado, como se muestra en la [Figura 25](#), además este componente fue construido en lámina metálica y fijado al marco del panel. En la parte superior del soporte se incorporó un casquillo cilíndrico alineado con el eje, el cual permite el paso del eje principal y asegura la fijación mediante tornillos.

Figura 25 Soporte del panel



1.14.4 Montaje final del sistema

En la etapa final del ensamblaje, se procedió al montaje integral del panel solar sobre la estructura del sistema de seguimiento. El panel fue fijado mediante soportes metálicos, previamente diseñados para adaptarse con precisión al eje de rotación, asegurando una alineación adecuada con el sistema de transmisión mediante engranajes.

La estructura fue construida en perfiles metálicos soldados, proporcionando rigidez y estabilidad durante la operación. Se utilizaron chumaceras tipo pedestal para sostener el eje, lo cual facilita el movimiento de rotación y compensa posibles desalineaciones menores.

Entre las consideraciones clave del diseño, se contempló:

La distribución simétrica del peso del panel sobre el eje para evitar esfuerzos desequilibrados.

Un montaje accesible para el cableado de sensores y electrónica de control.

En la [Figura 26](#) se puede apreciar el sistema en sus tres vistas principales alzado lateral derecha y superior.

Figura 26 Fotografías del sistema final



1.15 Selección de componentes

1.15.1 Microcontrolador

Para la selección del microcontrolador se consideraron tres opciones: Arduino UNO, ESP32 y Teensy 3.6. Los valores asignados a cada opción según los criterios de selección se presentan en la [Tabla 7](#).

Tabla 7 Matriz PUG de selección del microcontrolador

		Criterios de selección					Suma
		Costo	Tiempo de entrega	Funciones	Espacio y aspecto	Plataforma de desarrollo	
Opción		Pesos de los criterios					
		25%	10%	25%	15%	25%	100%
A. Arduino	NOTA	3	5	4	4	5	84%
	PUNTAJE	0,75	0,5	1	0,6	1,25	4,1
B. ESP32	NOTA	4	5	5	3	3	80%
	PUNTAJE	1	0,5	1,25	0,45	0,75	3,95
C. Teensy 3.6	NOTA	2	3	5	5	4	76%
	PUNTAJE	0,5	0,3	1,25	0,75	1	3,8

Con base en los datos presentados en la matriz PUG anterior, se decidió incorporar un módulo Arduino UNO. Aunque no fue la opción más económica entre las tres consideradas, se destacó por su alta disponibilidad comercial (lo que permitió tiempos entrega reducidos), la gran variedad de funciones que trae consigo, y al ya ser uno de los más populares y usados del mundo (*Arduino: Así Es El Cerebro de Los Robots Más Populares Del Mundo | UDIT Universidad, n.d.*), lo hace más sencillo de usar.

1.15.2 Panel Solar

En esta sección se evaluaron dos paneles policristalinos y un panel monocristalino, cada uno con diferentes dimensiones y costos. Los valores asignados a cada opción, según los criterios de selección definidos previamente, se presentan en la [Tabla 8](#).

Tabla 8 Matriz PUG de selección del panel solar

		Criterios de selección			
		Costo	Tiempo de entrega	Dimensiones	Suma
Opción		Pesos de los criterios			
		25%	35%	40%	100%
A. Panel Solar de 20W Policristalino	NOTA	3	4	4	44%
	PUNTAJE	0,75	1,4	1,6	3,75
B. Panel solar de 10W monocristalino	NOTA	4	4	3	44%
	PUNTAJE	1	1,4	1,2	3,6
C. Panel solar de 5W Policristalino	NOTA	5	4	2	44%
	PUNTAJE	1,25	1,4	0,8	3,45

La opción seleccionada para incorporar en la planta fue el panel solar policristalino de 20 W. Dado que el criterio con mayor peso fue el de las dimensiones, se consideró que este panel ofrecía las características más favorables en ese aspecto, al presentar el mayor aprovechamiento de área sin exceder el tamaño permitido, y, además, a un precio competitivo.

1.15.3 Motor DC.

Para la comprobación de los motores se realizó un análisis de movimiento en SolidWorks utilizando el complemento SolidWorks Motion. En la simulación se aplicaron las opciones de “contacto” y “gravedad” (ver [Figura 11](#)) con el objetivo de replicar condiciones reales de operación.

Con el fin de estimar las condiciones de funcionamiento del motor, se empleó la herramienta “motor” para definir el movimiento, registrando datos de posición angular en función del tiempo (Ver [Figura B-2](#)). Los resultados de la simulación se presentan en la [Figuras B-3](#), donde se muestra el torque generado durante el movimiento.

Los resultados indican que es adecuado utilizar los motores con la configuración de engranajes estándar, ya que el torque máximo requerido por el sistema es de 0,92 N·m (sumando el esfuerzo de ambos motores), mientras que, según el fabricante, los VEX 393 son capaces de proporcionar hasta 1,67 N·m ([figura B-4](#), apéndice B). Por lo tanto, se concluye que estos motores son suficientes para mover el panel dentro de los parámetros operativos establecidos, y se consideran adecuados para su uso en el banco experimental.

1.16 Parámetros adecuados del controlador

Para llevar a cabo esta etapa, primero se estableció cuál variable se quería controlar. Una vez definida, se procedió a determinar las estrategias de control que se implementaron. Con base en esto, se identificaron los parámetros necesarios para el diseño del sistema de control.

Buscando información de un fabricante, como lo es la empresa Autosolar, la cual tiene presencia en Colombia, Perú y España, dicen esto acerca de la eficiencia de los Paneles: “Mayor captación de luz solar: Teniendo en cuenta que los paneles solares están diseñados para captar la mayor cantidad de luz solar posible, su correcta inclinación ayuda a maximizar la exposición de los paneles al sol, permitiendo que absorban más radiación solar directa, para generar más electricidad.” | Blog, n.d.) Por lo que se concluye que la variable física a controlar es el ángulo de inclinación, el cual depende de la posición del sol. No obstante, son los motores DC los encargados de generar dicho cambio, por lo que la variable a controlar en los actuadores es la señal que reciben.

En este punto se presentó una necesidad, si bien se tenían a los motores DC como actuadores, y las fotorresistencias eran las encargadas de medir la cantidad de luz que incide sobre el panel, no era posible medir la inclinación del panel, por lo que se optó por añadir un potenciómetro lineal, el cual ofrece un cambio uniforme de la resistencia en todo su rango de movimiento (*Potenciómetros - La Guía Completa | DigiKey*, n.d.) Teniendo este componente, se sabe la posición angular del panel, esto en términos de voltaje.

Las estrategias de control de control que se decidieron usar son: PID y ON/OFF.

PID: Los parámetros necesarios a calcular son la respuesta proporcional (K_p), la repuesta integral (K_i), y la respuesta derivativa (K_d), estos dependen y se calculan en función de la planta.

ON/OFF: Controlador Encendido/apagado, para este tipo de controlador el parámetro necesario se denomina setpoint, y la variable a controlar cambia en torno a este valor de entrada.

1.17 Desarrollo del montaje de componentes electrónicos y generación del sistema de control

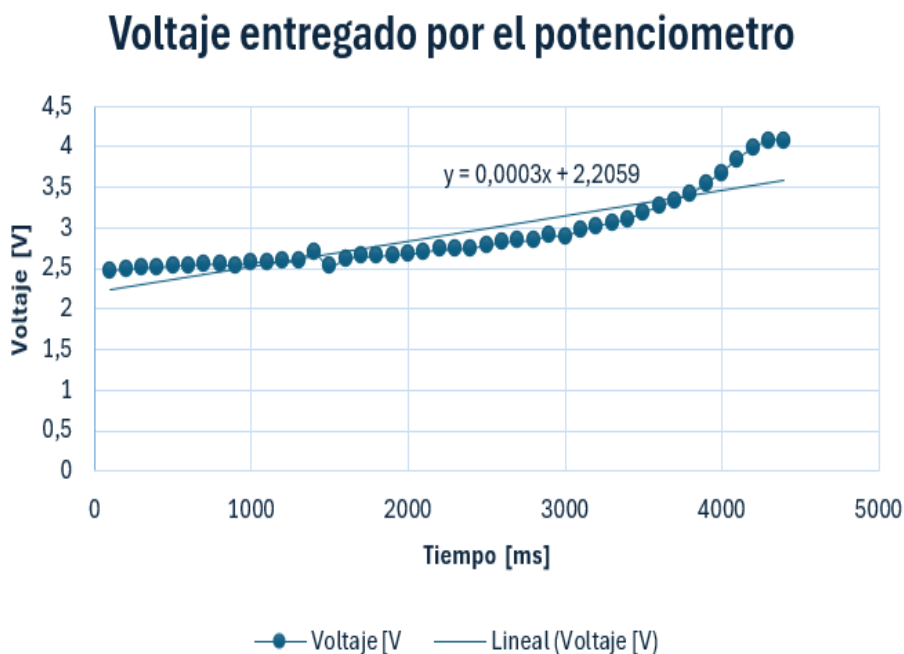
1.17.1 Comprobación del estado y funcionamiento de los componentes.

Los componentes que se comprobaron fueron los motores, el potenciómetro y las fotorresistencias.

Para realizar la prueba de los motores, los módulos puente H y el potenciómetro se llevó a cabo un montaje sencillo de prueba descrito en la metodología. Las conexiones realizadas se evidencian en las Figuras [12](#) y [13](#). Para la comprobación se utilizó programación en Arduino, el cual se encuentra disponible en el Apéndice (manual de usuario). De estas pruebas se obtuvieron las siguientes gráficas:

Gráfica de posición del panel: se representó el voltaje entregado por el potenciómetro en función del tiempo ([Ver Figura 27](#)).

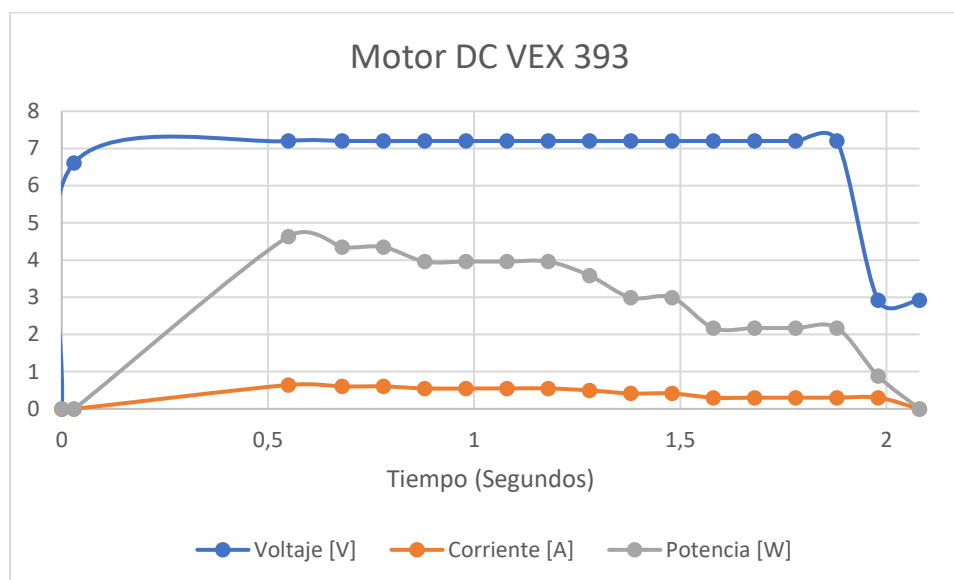
Figura 27 Voltaje entregado por el potenciómetro



La gráfica anterior muestra el correcto funcionamiento del potenciómetro, a medida que el panel gira, el potenciómetro da diferentes mediciones de voltaje en función del giro que se le transmita, con esta gráfica y definiendo los ángulos máximos y mínimos del panel, se puede programar para obtener la inclinación del panel.

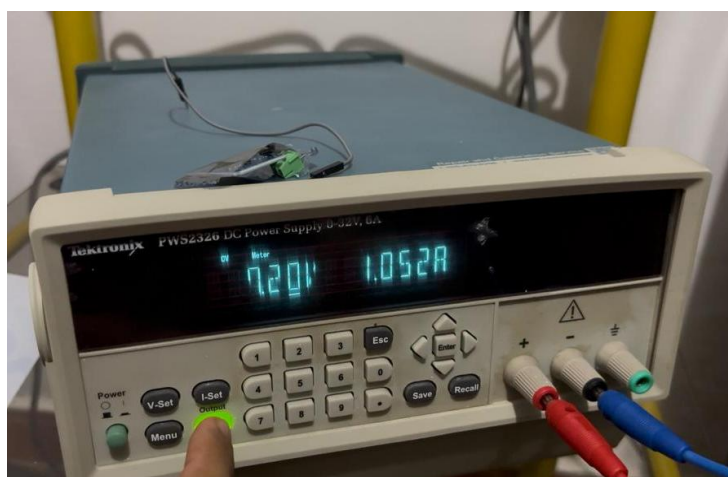
Dado que la función principal de los motores DC es transformar la energía eléctrica en energía mecánica (Motor DC, n.d.). Para comprobar su correcto funcionamiento en la práctica, se optó por medir la corriente y voltaje consumido por cada motor (Ver [Figura 28](#)), esto para asegurar que tengan un consumo adecuado (y asegurar su durabilidad).

Figura 28 Gráfica de voltaje y corriente de motores VEX 393



Los datos para crear la gráfica anterior fueron obtenidos de manera visual observando la fuente de poder (Ver [Figura 29](#)), esta muestra los valores de voltaje y corriente (de los dos motores)

Figura 29 Fuente de poder utilizada para probar y programar el banco experimental.



Después de verificar que los motores giraban correctamente el panel, y tras evidenciar datos normales de consumo, se llegó a un correcto funcionamiento tanto de los motores como del potenciómetro.

Para verificar el correcto funcionamiento de las fotorresistencias, se hizo el montaje descrito en la [Figura 14](#), además de usar el código detallado en el Apéndice H (manual de usuario). En la [Figura 30](#) se presenta una imagen con las lecturas obtenidas de las dos fotorresistencias:

Figura 30 Datos obtenidos por las fotorresistencias.

```

Output  Serial Monitor  X
Message (Enter to send message to 'Arduino Uno' on 'COM3')
-----
17:37:27.051 -> LDR1: 445 | LDR2: 377 | Diferencia: 68
17:37:27.591 -> LDR1: 444 | LDR2: 377 | Diferencia: 67
17:37:28.055 -> LDR1: 898 | LDR2: 387 | Diferencia: 511
17:37:28.557 -> LDR1: 969 | LDR2: 386 | Diferencia: 583
17:37:29.059 -> LDR1: 999 | LDR2: 386 | Diferencia: 613
17:37:29.595 -> LDR1: 997 | LDR2: 387 | Diferencia: 610
17:37:30.105 -> LDR1: 993 | LDR2: 386 | Diferencia: 607
17:37:30.577 -> LDR1: 995 | LDR2: 386 | Diferencia: 609
17:37:31.070 -> LDR1: 993 | LDR2: 386 | Diferencia: 607
17:37:31.570 -> LDR1: 998 | LDR2: 386 | Diferencia: 612

```

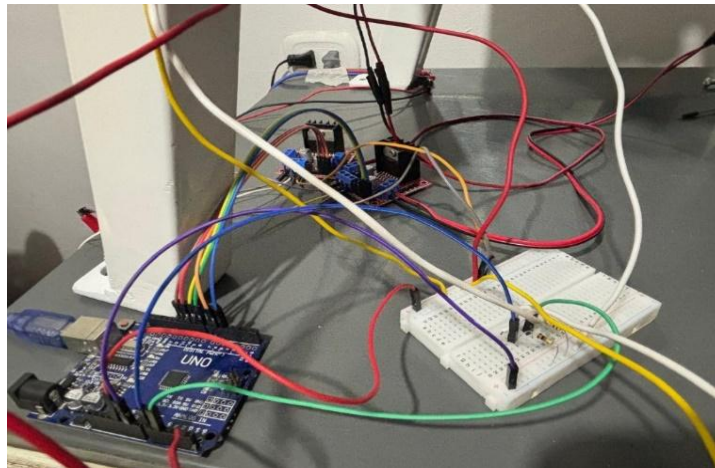
Para esto, se hizo uso de la linterna del móvil, la cual se acercaba y se alejaba cada una de las fotorresistencias. Las lecturas fueron normales y acordes a las variaciones de luz que presentaban los sensores.

1.17.2 Conexión de los componentes electrónicos.

Luego de comprobar el correcto funcionamiento de los componentes, se procedió a realizar la conexión final del sistema electrónico. Esta conexión incluyó el Arduino UNO, los módulos puente H, la protoboard, el potenciómetro y las fotorresistencias, siguiendo el esquema establecido (Ver [Figura 15](#)).

La disposición física de los componentes puede observarse en la [Figura 31](#), donde se muestra la conexión entre el Arduino, los módulos puente H y la protoboard:

Figura 31 *Conexión física del Arduino, puentes H y Protoboard*



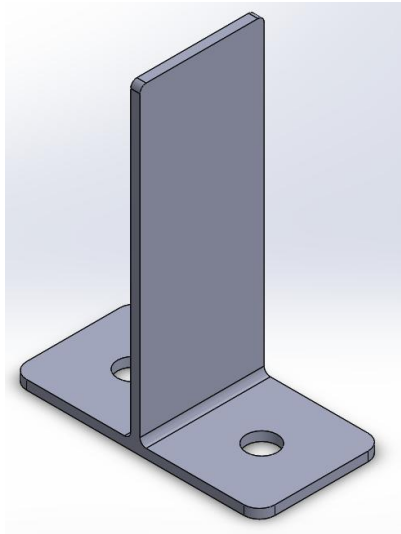
En la [Figura 32](#), se observan los cables provenientes del potenciómetro y de los dos motores VEX. Los motores DC se conectaron físicamente a los módulos puente H, mientras que el potenciómetro se conectó a la protoboard, y desde allí, un cable fue dirigido a un pin analógico del Arduino, con el fin de enviar los valores de voltaje censados correspondientes a la posición angular del panel.

Figura 32 *Conexión del Arduino con motores y potenciómetro*



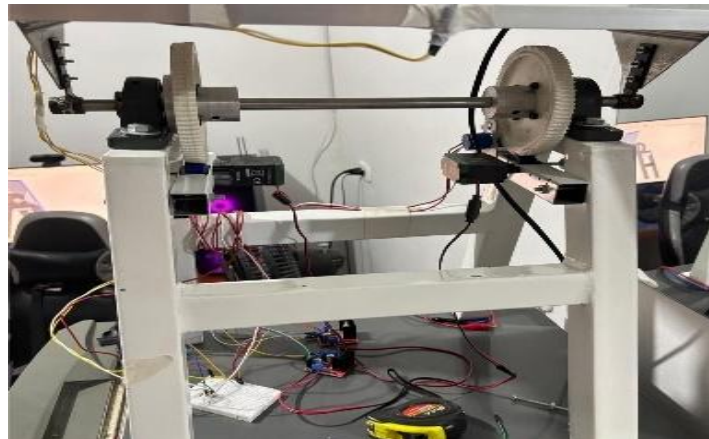
La [Figura 33](#) muestra el soporte para cada sensor, este se conectó en serie a una resistencia de 10 k Ω , formando un divisor de tensión que permite medir variaciones en la intensidad lumínica.

Figura 33 Fotorresistencias conectadas al sistema



En la [Figura 34](#) se muestra el sistema parcialmente ensamblado; aunque no corresponde a la versión final, ya cumple con las funciones básicas requeridas. A partir de este punto, se procede a la caracterización de la planta. Obtener su ecuación de transferencia permite simular su comportamiento frente a distintos tipos de controladores, tales como P, PI, PD y PID.

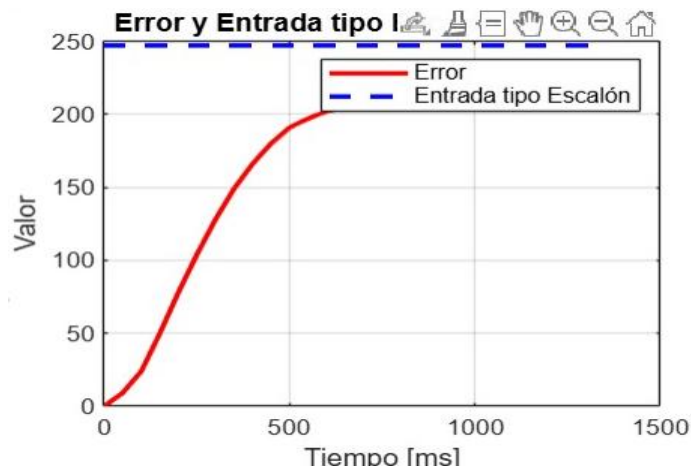
Figura 34 Sistema montado



1.17.3 Función de transferencia en lazo cerrado.

Las fotorresistencias son las encargadas de dar el valor de entrada, una vez aplicado el controlador P, en la [Figura 35](#) se muestra cómo reacciona el sistema.

Figura 35 Respuesta del sistema con controlador Proporcional.



Nota: Imagen realizada en Matlab

1.17.4 Caracterización de la planta “LuzBot”

Se hizo uso de la herramienta “System Identification Toolbox” de MATLAB para ajustar un modelo de segundo orden con un cero. La función de transferencia se muestra en la [Figura 36](#):

Figura 36 Función de transferencia obtenida con Toolbox de MATLAB

```

Data/model Info: tf1
Model name: tf1
Color: [0.14902,0.54902,0.86667]

From input "θ" to output "-.":
    38.71
-----
s^2 + 11.9 s + 45.38

Name: tf1
Continuous-time identified transfer function.

Parameterization:
  Number of poles: 2  Number of zeros: 0

Diary and Notes

% Details about Estimation Data
% Import mydata

% Transfer function estimation
Options = tfestOptions;
Options.Display = 'on';
Options.EnforceStability = true;

tf1 = tfest(mydata, 2, 0, Options)

```

Al momento de obtener el modelo, se obtuvo un ajuste de 97,06%; La función de transferencia en lazo cerrado para un sistema con controlador $C(s)$ y planta $G(s)$ se modela como:

$$T(s)[1 + C(s)G(s)] = C(s)G(s) \quad (6)$$

$$T(s) + T(s)C(s)G(s) = C(s)G(s) \quad (7)$$

$$T(s) = C(s)G(s) - T(s)C(s)G(s) \quad (8)$$

$$T(s) = G(s)[C(s) - T(s)C(s)] \quad (9)$$

$$G(s) = \frac{T(s)}{C(s) - T(s)C(s)} \quad (10)$$

Sustitución numérica.

Con un $K_p=1$ y la función $T(s)$ anterior se tiene:

$$G(s) = \frac{T(s)}{C(s)(1 - T(s))} \quad (11)$$

$$G(s) = \frac{\frac{38,71}{s^2 + 11,9s + 45,38}}{1 \left(1 - \frac{38,71}{s^2 + 11,9s + 45,38} \right)} \quad (12)$$

La función de transferencia identificada para la planta “LuzBot” fue:

$$G(s) = \frac{38,71}{s^2 + 11,9s + 6,67} \quad (13)$$

La obtención de esta función de transferencia abre la posibilidad de estudiar el comportamiento de la planta en entornos de simulación como MATLAB/ System Identification Toolbox. Esto permite analizar la respuesta del sistema frente a distintos tipos de controladores clásicos (P, PI, PD y PID), brindando así una herramienta educativa útil. Los estudiantes pueden

comparar los resultados obtenidos en las simulaciones con el comportamiento real de la planta, favoreciendo el entendimiento de las diferencias entre el modelo teórico y el sistema físico.

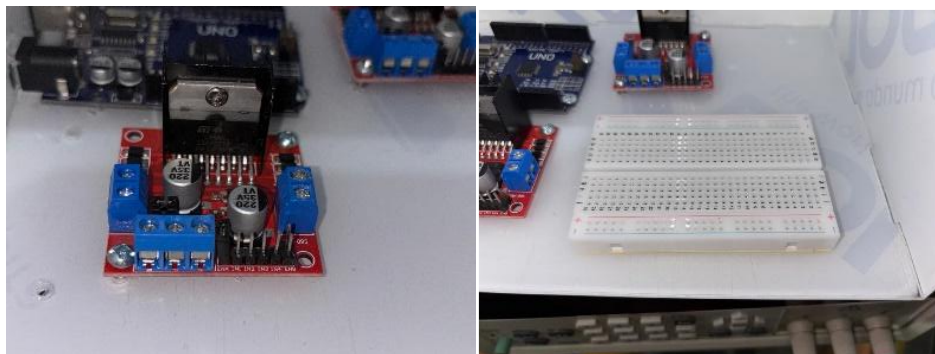
1.17.5 Integración del sistema mecánico con el electrónico

Una vez diseñada la caja en SolidWorks y verificado que el espacio destinado para la electrónica era suficiente para realizar las conexiones, se procedió a efectuar el corte con láser y el posterior armado de la caja (Ver [Figura 37.](#)) Los componentes electrónicos fueron fijados a la estructura utilizando tornillos de 3 mm. El resultado final del anclaje de la parte electrónica a la caja se muestra en la [Figura 38.](#)

Figura 37 Caja cortada y armada en acrílico

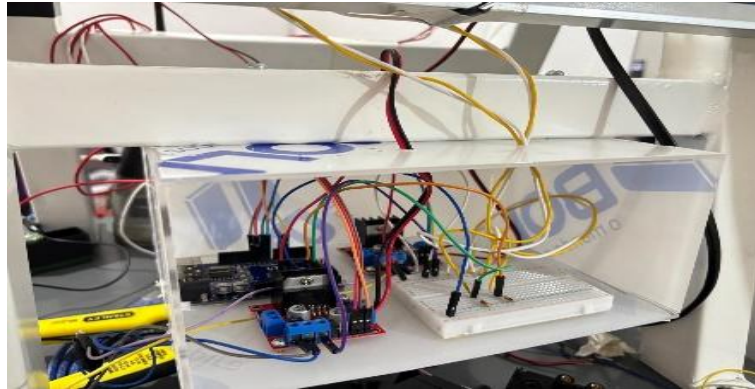


Figura 38 Componentes electrónicos anclados a la caja



Posteriormente, una vez que la electrónica fue anclada a la caja y esta se fijó al bastidor (véase en [Figura 39](#)), se realizaron las conexiones correspondientes y se verificó el correcto funcionamiento del banco experimental.

Figura 39 Integración del sistema mecánico y electrónico.



1.18 Evaluación de funcionamiento del controlador del sistema de inclinación mediante pruebas experimentales

Siguiendo el protocolo de pruebas dado en la [Figura 19](#), se ubicó el panel sin ninguna estrategia de control, el panel como tal si no tiene ninguna carga conectada, solo da lecturas de voltaje, debido a la necesidad de obtener valores de potencia, se optó por conectar una resistencia de cerámica de $20\ \Omega$, para 20 W, como se muestra en la [Figura 40](#).

De igual forma para poder despejar la potencia, se usó la siguiente ecuación:

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (14)$$

Se comprobó el valor de la resistencia haciendo uso del multímetro para tener claridad de cuanto era este valor (Ver [Figura 41](#)).

Figura 40 Panel fotovoltaico conectado con una resistencia de $20\ \Omega$

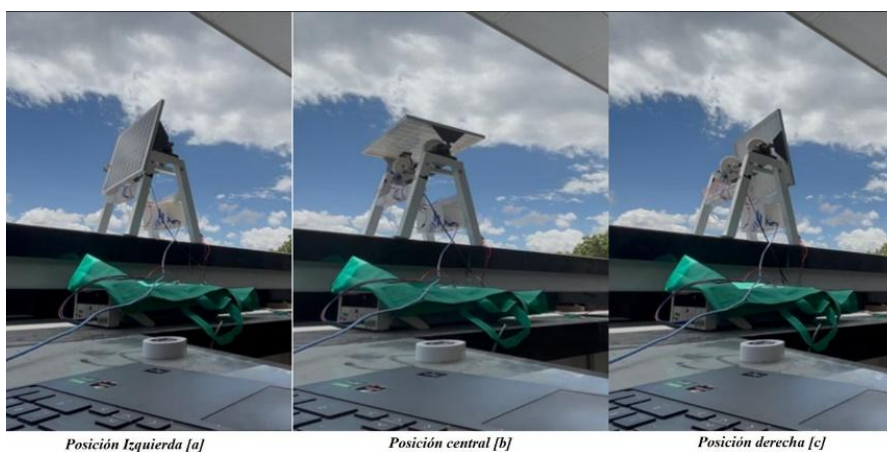


Figura 41 Medición de la resistencia de cerámica.



Los valores de potencia se midieron haciendo uso de un multímetro, se hicieron las mediciones de la potencia generada teniendo el panel en diferentes posiciones iniciales, estas se pueden apreciar en la [Figura 42](#).

Figura 42 Posición Izquierda [a], central [b] y derecha [c] del panel para probar el banco.



Posición Izquierda [a]

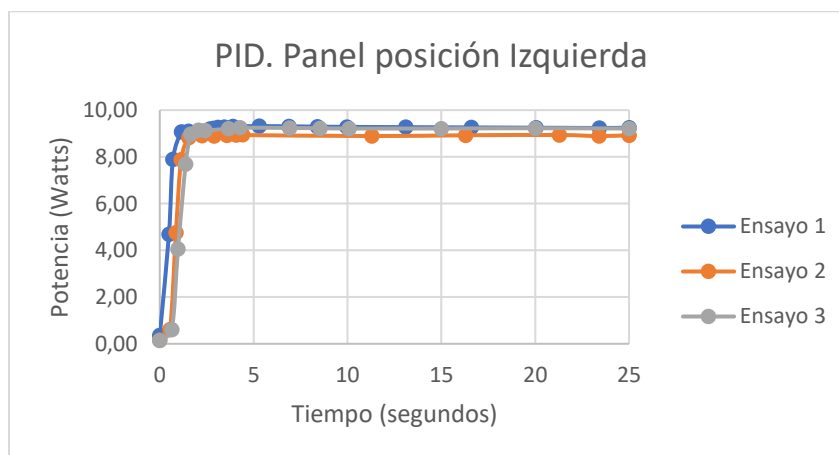
Posición central [b]

Posición derecha [c]

Para evaluar el banco, primero se registró el dato inicial de potencia y se procedió a aplicar el controlador PID y ON/OFF, esto sirve también para evidenciar si realmente el panel se orientaba hacia el sol. De estas pruebas se obtuvo lo siguiente:

En la [Figura 43](#), se aplica una estrategia de control PID y la posición inicial es Izquierda (caso [a]). Se observa que la potencia inicial era bastante baja, debido a que las pruebas se realizaron a las 10 a.m, momento en el cual el panel estaba orientado en dirección opuesta al sol. Sin embargo, al aplicar la estrategia de control, el aumento en la potencia generada es evidente. En promedio, la potencia más baja registrada en los tres ensayos fue de 0,22 Watts, mientras que la potencia máxima alcanzada fue de 9,17 Watts.

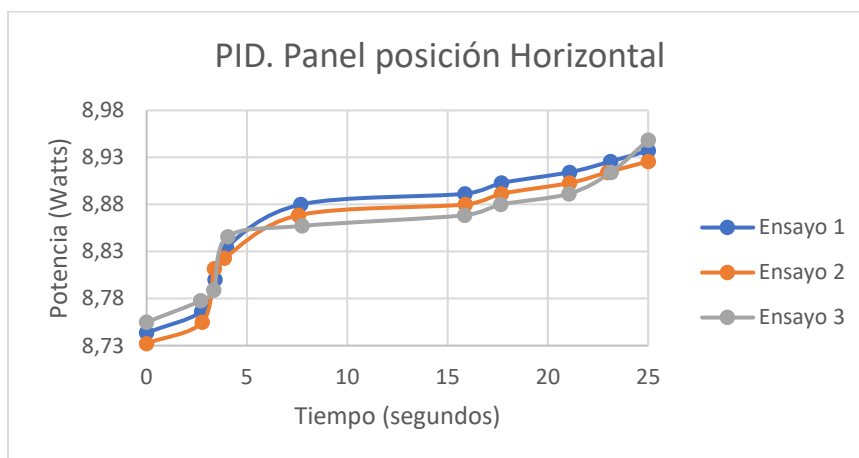
Figura 43 Potencia generada por el panel estando en la posición izquierda aplicando PID como estrategia de control



Por otro lado, en el ensayo donde la posición inicial del panel era horizontal (caso [b]), el cambio en la potencia generada no fue tan significativo como en el caso mostrado en la [Figura 44](#). En esta orientación, el panel ya se encontraba mejor alineado con la dirección del sol, lo que explica el valor inicial elevado de generación. Aun así, se observa un ligero incremento en la

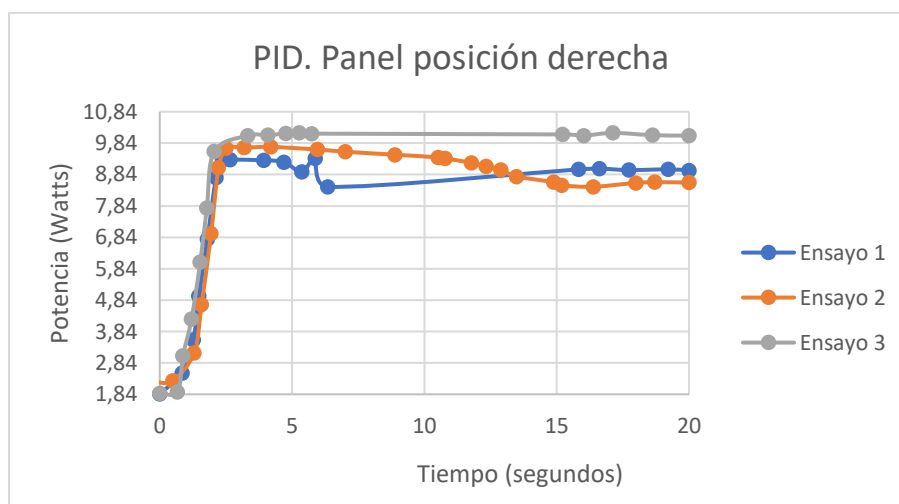
generación de potencia, con una media de la potencia mínima registrada de 8,74 Watts y 8,94 Watts de potencia máxima.

Figura 44 Potencia generada por el panel estando en la posición horizontal



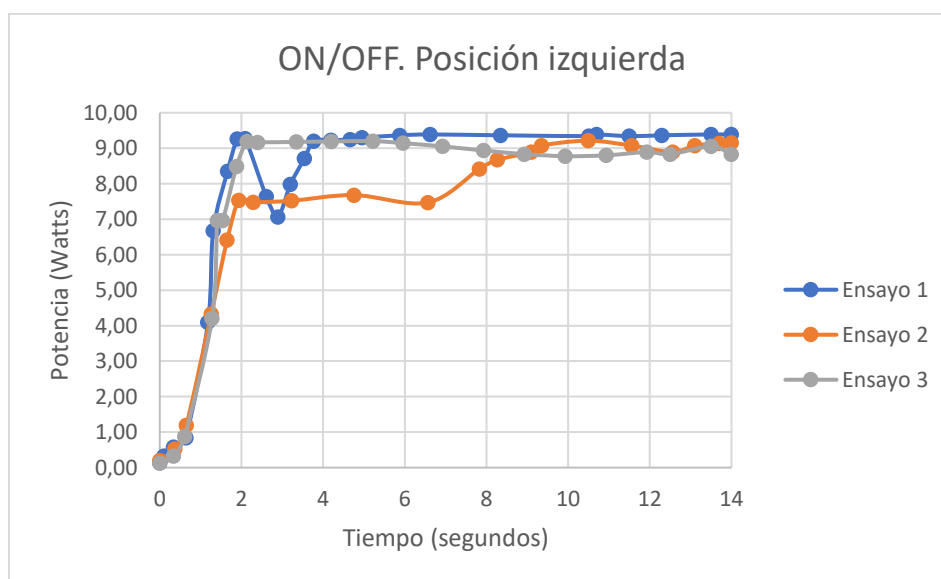
En la siguiente [Figura 45](#), se muestra el comportamiento de la generación de energía cuando el panel se encontraba inicialmente orientado hacia la derecha (caso [c]). Se observa un incremento notable en la potencia generada. La prueba comenzó con un promedio de la potencia mínima registrada de 1,88 Watts y 9,75 Watts de potencia máxima, lo que evidencia la efectividad del sistema de control para mejorar la captación solar al corregir la orientación del panel.

Figura 45 Potencia generada por el panel estando en la posición derecha



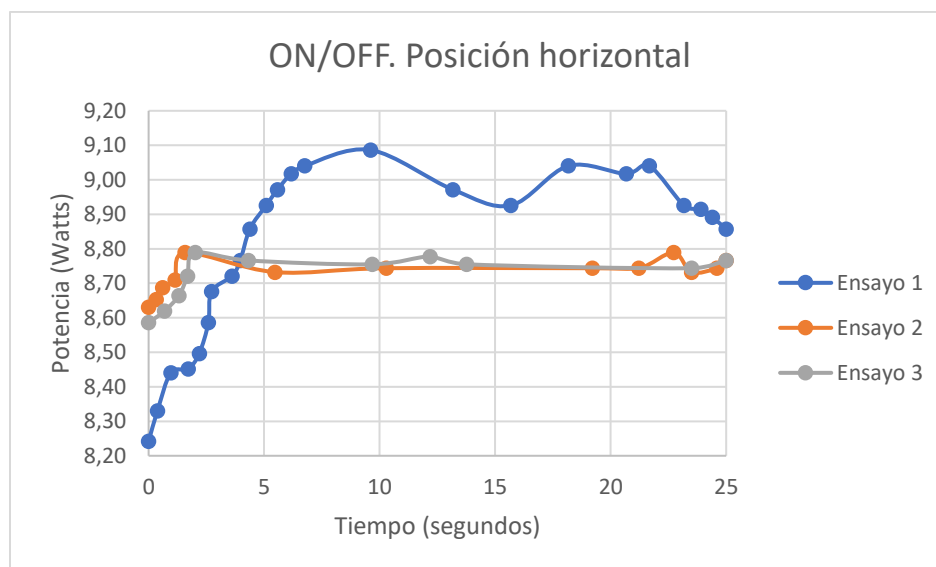
De igual forma, se procedió a generar las gráficas del controlador ON/OFF. La [Figura 46](#) que se presenta enseguida evidencia que, al estar el panel inicialmente orientado en dirección opuesta a la posición del sol, la generación de potencia fue baja al comienzo del ensayo. Por esta razón, la gráfica inicia con un valor medio de potencia mínima registrada de 0,16 Watts y 9,27 Watts de potencia máxima tras la aplicación del controlador.

Figura 46 Potencia generada por el panel estando en la posición izquierda aplicando ON/OFF



En la evaluación, representada en la [Figura 47](#), se observa una variación notable debido a la presencia de nubes durante la toma de datos. Además, debido a la posición inicial del panel, el incremento en la potencia generada no fue especialmente significativo, registrándose un promedio de la potencia mínima de 8,49 Watts y alcanzando 8,89 Watts como potencia máxima.

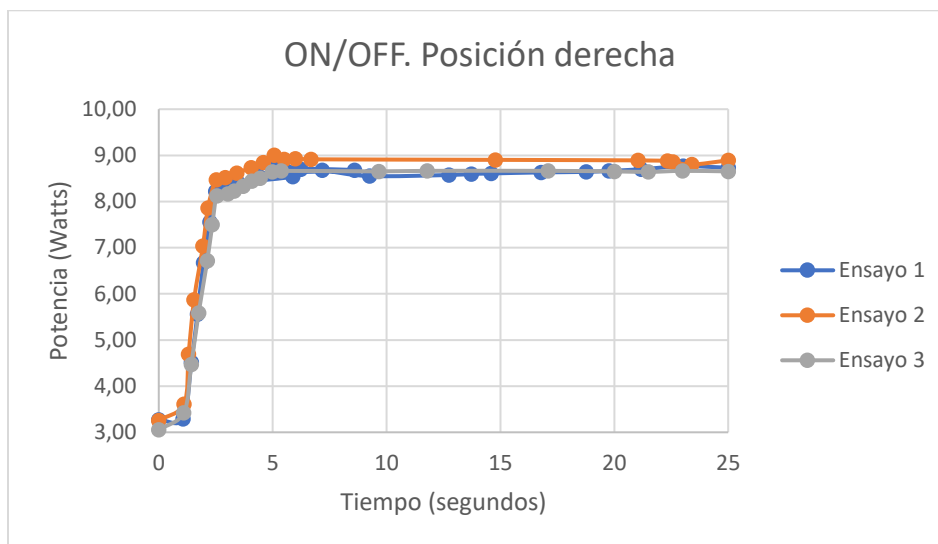
Figura 47 Potencia generada por el panel estando en la posición horizontal aplicando ON/OFF



Por último, al ubicar el panel en la posición derecha, como se muestra en la [Figura 48](#), y aplicar la estrategia de control ON/OFF, se observó un incremento en la generación de potencia, con una media de la potencia mínima registrada de 3,19 Watts a 8,82 Watts como máximo.

Aunque en las pruebas realizadas con el banco experimental mostrado en la [Figura 47](#) se presentó una perturbación en el sistema debido a variaciones en la radiación solar, producto de condiciones climáticas nubladas, el sistema respondió adecuadamente y cumplió con su función. Esta respuesta se evidenció a través de una variación observable en el ángulo del panel, lo que indica que el sistema de seguimiento actuó correctamente.

Figura 48 Potencia generada por el panel estando en la posición derecha aplicando ON/OFF



En todos los ensayos realizados, para todas las posiciones se evidencia con claridad que el ángulo de inclinación del panel efectivamente influye en la generación de energía.

Nota: Los valores de las gráficas se muestran en las del [apéndice C](#).

Conclusiones

Se logró construir un banco experimental didáctico que permite la implementación de estrategias de control, como el PID y el control ON-OFF. Estas técnicas hicieron posible regular el ángulo de inclinación del panel, evidenciando así su influencia directa en la generación de potencia.

Se consiguió seleccionar las estrategias para regular el ángulo, siendo estas el control PID y el ON/OFF, además durante las pruebas experimentales, se evidenció que el controlador ON/OFF generaba fluctuaciones cuando se configuraba con un umbral pequeño, lo que afectaba la estabilidad del sistema.

En contraste, el controlador PID ofreció una respuesta más precisa y estable, permitiendo un ajuste continuo del ángulo y un seguimiento más suave del punto de máxima incidencia solar.

-Se desarrollo un banco de pruebas funcional que permite ajustar el ángulo de un panel fotovoltaico de manera precisa, minimizando el error entre las lecturas de las fotorresistencias mediante el uso de controladores PID y ON/OFF.

Los resultados obtenidos demostraron que el sistema permite regular efectivamente el ángulo, lo cual impacta positivamente en la generación de potencia del panel al aumentar la incidencia de luz solar.

En el escenario más desfavorable, donde el panel partía de una orientación inicial inadecuada, el control activo permitió incrementar la potencia generada en 9,11 W, pasando de 0,16 W sin corrección a 9,27 W con corrección.

En contraste, en el mejor de los casos, donde el ángulo de inclinación ya favorecía una buena exposición solar, la potencia aumentó ligeramente en 0,19 W, de 8,74 W a 8,94 W (estos datos de generación son valores promedio de los ensayos realizados) tras la aplicación del control.

Recomendaciones

Validar experimentalmente el ahorro energético obtenido: Comparar el desempeño del seguidor solar frente a un panel fijo durante varios días bajo diferentes condiciones climáticas para cuantificar el beneficio real en términos de eficiencia energética.

Recomendación para protección contra condiciones ambientales: Dado que el presente proyecto se desarrolló como un banco experimental y no como un sistema orientado a la máxima generación de potencia en campo abierto, no se consideraron inicialmente medidas específicas para la protección contra condiciones ambientales adversas, como la lluvia o la humedad. Sin embargo, para futuras implementaciones o pruebas prolongadas en exteriores, se recomienda adaptar el sistema para hacerlo resistente al agua.

Estudiar la eficiencia energética del sistema completo: Analizar si el consumo energético del sistema de seguimiento (motores, electrónica, control) justifica el incremento en captación solar, especialmente en regiones con baja irradiación.

Evaluar el uso de energías híbridas para alimentar el sistema: Incorporar una celda auxiliar o pequeña batería alimentada por el propio panel para garantizar la autonomía energética del sistema de seguimiento, evitando la dependencia de fuentes externas.

Integrar inteligencia artificial o machine learning: En fases futuras, aplicar modelos predictivos para ajustar el comportamiento del seguidor según patrones climáticos o históricos de radiación, aumentando la eficiencia del sistema.

Referencias Bibliográficas

Arduino: así es el cerebro de los robots más populares del mundo | UDIT Universidad. (n.d.). Retrieved May 26, 2025, from <https://udit.es/actualidad/arduino-asi-es-el-cerebro-de-los-robots-mas-populares-del-mundo/>

Ariel Cárdenas Martínez, J., & Jesús Hernández Ortiz, E. (2014). *Diseño e implementación de un seguidor solar empleando un controlador PID con modo deslizante*. <https://ciencia.lasalle.edu.co/>

Arturo Pelayo López, J., Luna Soto, A., Bernabe Ramos, F., & Guzmán Flores, B. (2017). Comparativa entre la eficiencia de un sistema fotovoltaico con seguimiento solar y la de un sistema fotovoltaico fijo Comparison between a photovoltaic solar tracker efficiency and a fixed photovoltaic system. In *Núm* (Vol. 6).

Aurora, C., & Larocca, M. (2022). Sustentabilidad Energética: un panorama en la industria petrolera global. *LOGINN Investigación Científica y Tecnológica*, 6(1), 2590–7441. <https://doi.org/10.23850/25907441.4741>

Chin, C. S., Babu, A., & McBride, W. (2011). Design, modeling and testing of a standalone single axis active solar tracker using MATLAB/Simulink. *Renewable Energy*, 36(11), 3075–3090. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.026>

Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación. (n.d.). *Energía Solar Fotovoltaica*. www.coit.es

Controlador PID - Wikipedia, la enciclopedia libre. (n.d.). Retrieved May 25, 2025, from https://es.wikipedia.org/wiki/Controlador_PID

¿Cuál es la inclinación y orientación óptima de los paneles solares en Colombia | Blog. (n.d.). Retrieved May 25, 2025, from <https://autosolar.co/aspectos-tecnicos/que->

orientacion-e-inclinacion-tienen-los-paneles-solares-en-
colombia?srsItd=AfmBOooJ7QK3ZMKsz437KgTGxNEgdZtjZSD26DYfGLmliRdIKoEI
VHEC

Dierman Ralph. (2024, January 12). *Las energías renovables representarán más de un tercio de la generación mundial de electricidad en 2025 – pv magazine Latin America*.
<https://www.pv-magazine-latam.com/2024/01/24/las-energias-renovables-representaran-mas-de-un-tercio-de-la-generacion-mundial-de-electricidad-en-2025/>

ENGI. (2020, March 19). *Energía solar en Colombia: elementos esenciales para su implementación*. <https://engi.co/componentes-energia-solar/>

Funcionamiento energía solar fotovoltaica - Iberdrola. (n.d.). Retrieved May 26, 2025, from <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/que-es-energia-fotovoltaica>

García Alviades David Samuel, & Viadero Suárez Carlos Michell. (2018). *ROBOT SEGUIDOR*.

Indice de tutoriales Arduino – Prometec. (n.d.). Retrieved August 16, 2025, from <https://www.prometec.net/indice-tutoriales/>

Matteo Carmen. (2022). *Vista de Sustentabilidad Energética_ un panorama en la industria petrolera global _ LOGINN Investigación Científica y Tecnológica*.

Méndez Muñiz Javier María, C. G. R. (n.d.). *energia-solar-fotovoltaica_compress (1)*.

Ministerio TIC. (2022). *Más de 10 mil estudiantes beneficiados con laboratorios de innovación educativa en Colombia*. <https://www.mintic.gov.co/portal/inicio/Sala-de-prensa/Noticias/273468:Mas-de-10-mil-estudiantes-beneficiados-con-laboratorios-de-innovacion-educativa-en-Colombia>

Motor DC. (n.d.). Retrieved May 26, 2025, from <https://harmonicdrive.de/es/glosario/motor-dc>

Narciso Moro Garrido. (n.d.). *DISEÑO DE PLANTA SOLAR TERMOELÉCTRICA BASADA EN TECNOLOGÍA.*

Potenciómetros - La guía completa | DigiKey. (n.d.). Retrieved May 25, 2025, from <https://www.digikey.es/es/articles/the-complete-guide-to-potentiometers>

¿Qué es un sistema de control de movimiento? - Urany®. (n.d.). Retrieved May 26, 2025, from <https://urany.net/blog/sistemas-de-control>

Quispe Morales, L. A., & Paredes Anchatipán, A. D. (2024). Análisis comparativo de las tecnologías de inversores On Grid utilizados en sistemas conectados a la Red. *Tesla Revista Científica*, 4(1), e286. <https://doi.org/10.55204/trc.v4i1.e286>

SectorElectricidad. (n.d.). *Ángulos Solares y su importancia para el diseño de Sistemas Fotovoltaicos - Sector Electricidad | Profesionales en Ingeniería Eléctrica.* Retrieved March 28, 2024, from <https://www.sectorelectricidad.com/36130/angulos-solares-y-su-importancia-para-el-diseno-de-sistemas-fotovoltaicos/>

SEGUIDOR SOLAR. (41) (1 de Octubre de 2012) : Patentados.com. (n.d.). Retrieved March 31, 2025, from <https://patentados.com/2012/seguidor-solar.41>

Seguidor Solar Con Motores a Paso + Arduino : 11 Steps - Instructables. (n.d.). Retrieved April 11, 2025, from <https://www.instructables.com/Stepper-Motor-Solar-Tracker-Seguidor-Solar-con-mot/>

Stolik Novygrod Daniel. (2014). *La energía FV: oportunidad y necesidad para Cuba.* http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S0252-85842014000200005&script=sci_arttext&tlng=pt

Urrea Quiroga, G., Niño Navia, J., García Sepúlveda, J., Alvarado Perilla, J., Barragán de los Ríos, G., & Hazbón Álvarez, O. (2022). *DEL AULA A LA REALIDAD. LA IMPORTANCIA DE LOS LABORATORIOS EN LA FORMACIÓN DEL INGENIERO. CASO DE ESTUDIO: INGENIERÍA AERONÁUTICA-UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA.*

What is PID Controller? - Electrical Volt. (n.d.). Retrieved July 4, 2025, from <https://www.electricalvolt.com/what-is-pid-controller/>

Zipa Bermudez Carlos Augusto, F. E. Y. lorena. (2021). *Proyecto V. Final.*

Apéndices

En esta sección se incluyen los apéndices, los cuales constituyen un del presente proyecto. Cada uno de ellos reúne información técnica, cálculos específicos, registros experimentales, análisis de componentes y documentos de referencia que, por su extensión o nivel de detalle, se han separado del cuerpo principal del texto para facilitar su consulta.

En primer lugar, se abordan los aspectos de diseño y análisis estructural, seguidos por las comprobaciones de funcionamiento, la recopilación de datos experimentales y los cálculos mecánicos. Posteriormente, se incluyen las selecciones de componentes, tanto mecánicos como electrónicos, así como los manuales de operación, el presupuesto detallado y, finalmente, los planos del sistema. Esta estructura permite que el lector acceda fácilmente a la información complementaria cuando desee profundizar en un apartado específico del proyecto.

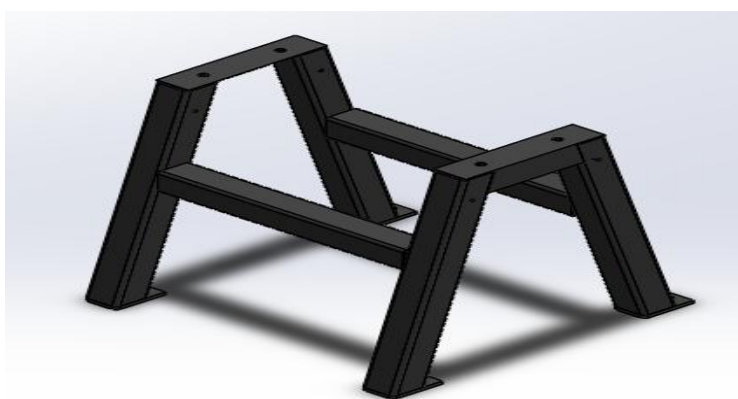
En esta parte, el lector encontrará los siguientes apéndices:

- [Apéndice A: Diseño y análisis estructural.](#)
- [Apéndice B: Comprobación del funcionamiento de los motores.](#)
- [Apéndice C: Datos experimentales, evaluación del panel.](#)
- [Apéndice D: Estimación de la energía neta del sistema](#)
- [Apéndice E: Dimensionamiento del eje.](#)
- [Apéndice F: Selección de las chumaceras.](#)
- [Apéndice G: Selección del sistema de potencia.](#)
- [Apéndice H: Cálculo del mecanismo de engranajes.](#)
- [Apéndice I: Manual instructivo de funcionamiento del banco.](#)
- [Apéndice J: Presupuesto.](#)
- [Apéndice K: Planos.](#)

Apendice A. Diseño y análisis estructural

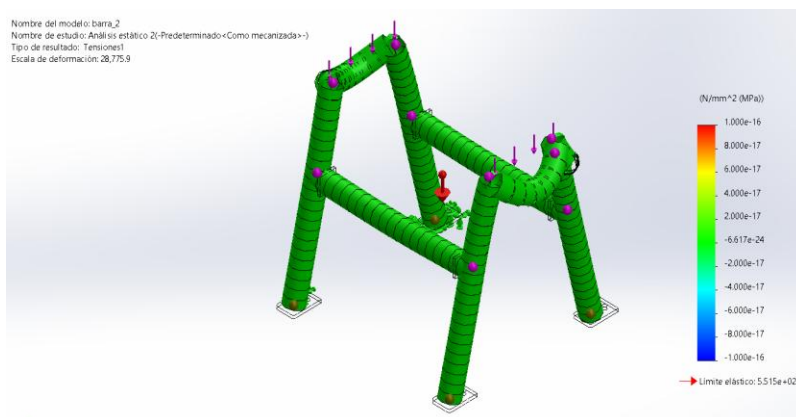
El bastidor del banco de pruebas fue realizado en perfiles metálicos estructurales como tubería que mide 1 1/2", ángulo con calibre de 1/4" y de 18, se diseñó de tal manera que el transporte, acoplo y montaje de éste fuera fácil y versátil, las chumaceras se aseguraban con tornillería galvanizada de 1/4". La estructura final del bastidor se muestra en la [figura A-1](#).

figura A-1 Bastidor del banco



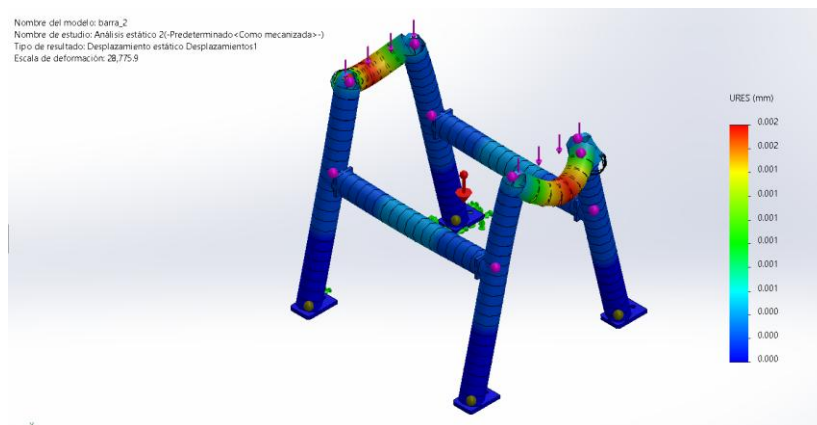
El análisis estático de tensiones del bastidor, basado en el criterio de Von Mises, permitió evaluar las zonas críticas de esfuerzo en la estructura. La [figura A-2](#) presenta la distribución de tensiones resultante del análisis.

figura A-2 Análisis estático de tensiones, (Von Mises).



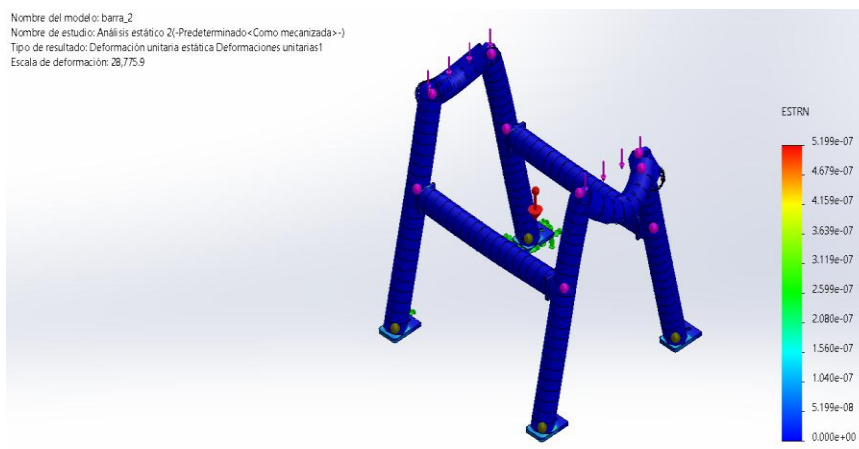
En la [figura A-3](#) se puede ver que el máximo de desplazamiento observado es de 0,002 mm, el que es coherente con el esperado en el diseño, dentro de los rangos de tolerancia requeridos para el material y a las cargas de aplicación.

figura A-3 *Análisis de desplazamiento lineal a partir del estudio estático*



Se puede ver en la [figura A-4](#) que la deformación dominante ocurre en la parte superior de la estructura, principalmente en la zona de la curva lejos de los puntos de apoyo. Al ser más alejada de los principales puntos de apoyo, la zona tiene una mayor debilidad frente a la carga aplicada, con un máximo de deformación de aproximadamente 0,002 mm en la escala de colores del análisis.

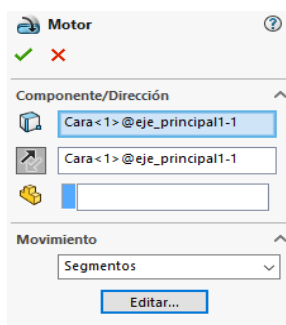
figura A-4 *Análisis de deformaciones*



Apéndice B. Comprobación del funcionamiento de los motores

Para verificar el funcionamiento de los motores de corriente directa (DC), se instalaron en el banco de pruebas, se pusieron en marcha y se registraron los valores de ángulo en función del tiempo. Los datos obtenidos se emplearon al utilizar la herramienta “motor”, lo que permitió definir el movimiento como se muestra en la [Figura B-1](#).

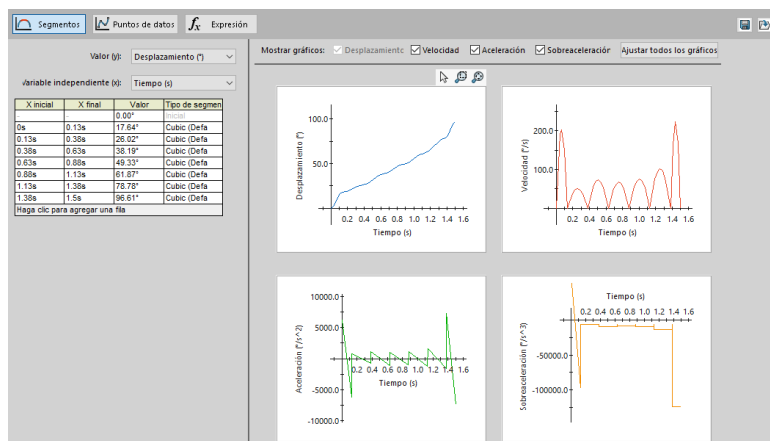
figura B-1 Herramienta motor



Nota: Imagen tomada de Solidworks

Los resultados de la simulación incluyen los datos de posición angular en función del tiempo, los cuales describen el comportamiento del panel durante su movimiento. Estos se muestran en la [figura B-2](#).

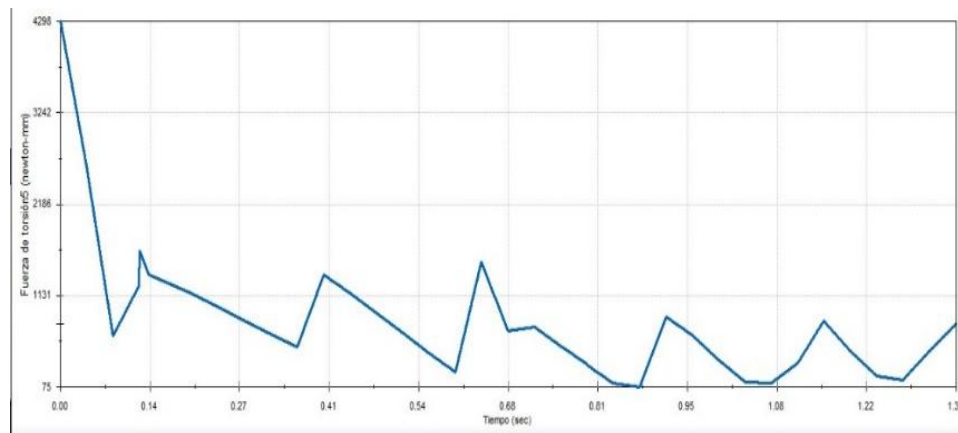
figura B-2 Datos de posición angular vs tiempo que describen el movimiento del panel



Nota: Imagen tomado de Solidworks

Durante el análisis de la torsión generada en el movimiento del panel, se registraron los valores de torque en función del tiempo. La gráfica resultante se presenta en la [figura B-3](#), donde se observa el comportamiento de la torsión a lo largo del ciclo de operación.

figura B-3 Gráfica de Torsión en el movimiento del panel



Nota: Imagen toda de Solidworks

El torque más alto se presentó al inicio del movimiento y fue de 4298 N·mm, lo que equivale a 4,298 N·m. Dado que la relación de engranajes es de 4,67 (se consideró una eficiencia de transmisión igual a 1 para simplificar cálculos), se determinó que los motores debían generar, en conjunto, con un torque aproximado de 0,92 N·m.

Los motores VEX 393 cuentan con engranajes internos intercambiables, los cuales permiten modificar la relación entre velocidad y torque. Para el banco experimental en cuestión, se utilizó la configuración de engranajes estándar, la cual proporciona el mayor torque disponible entre las tres opciones, a costa de una velocidad angular más baja. (Ver [figura B-4](#))

figura B-4 Modos de operación VEX 393

	Output Stage Driving Gear	Output Stage Driven Gear	Output Speed (RPM)	Output Stall Torque (N*m)	IME Ticks per Revolution
Standard Motor 393 Gearing	10t	32t	100	1.67	627.2
High Speed Option (included with Motor 393)	14t	28t	160	1.04	392
Turbo Gear Set (sold separately)	18t	24t	240	0.7	261.333

Nota: Tomado de: <https://www.vexrobotics.com/393-motors.html>

Apendice C. Datos experimentales, evaluación del panel

figura C-1 PID. Panel posición Izquierda

Ensayo 1			
Tiempo	Voltaje V	Resistencia ohm	Pot
0	3,136	27,3	0,36
0,49	11,31	27,3	4,69
0,7	14,68	27,3	7,89
1,16	15,74	27,3	9,08
1,53	15,76	27,3	9,10
2,08	15,79	27,3	9,13
2,67	15,84	27,3	9,19
2,85	15,87	27,3	9,23
3,09	15,9	27,3	9,26
3,43	15,92	27,3	9,28
3,89	15,94	27,3	9,31
5,3	15,95	27,3	9,32
6,88	15,94	27,3	9,31
8,4	15,93	27,3	9,30
9,96	15,92	27,3	9,28
13,1	15,91	27,3	9,27
16,6	15,9	27,3	9,26
20,04	15,89	27,3	9,25
23,42	15,88	27,3	9,24
25	15,89	27,3	9,25

Ensayo 2			
Tiempo	Voltaje V	Resistencia ohm	Pot
0	2,089	27,3	0,16
0,54	4,053	27,3	0,60
0,86	11,39	27,3	4,75
1,14	14,67	27,3	7,88
1,55	15,52	27,3	8,82
2,25	15,59	27,3	8,90
2,89	15,58	27,3	8,89
3,58	15,61	27,3	8,93
4,4	15,63	27,3	8,95
4,07	15,62	27,3	8,94
11,29	15,58	27,3	8,89
16,29	15,61	27,3	8,93
21,29	15,62	27,3	8,94
23,4	15,58	27,3	8,89
25	15,61	27,3	8,93

Ensayo 3			
Tiempo	Voltaje V	Resistencia ohm	Pot
0	1,985	27,3	0,14
0,64	4,093	27,3	0,61
0,97	10,52	27,3	4,05
1,38	14,49	27,3	7,69
1,65	15,65	27,3	8,97
2,05	15,8	27,3	9,14
2,41	15,78	27,3	9,12
3,66	15,86	27,3	9,21
4,27	15,89	27,3	9,25
6,92	15,88	27,3	9,24
8,54	15,87	27,3	9,23
10,08	15,86	27,3	9,21
15	15,86	27,3	9,21
20	15,87	27,3	9,23
25	15,86	27,3	9,21

figura C-2 PID. Panel posición Horizontal

Ensayo 1			
Tiempo	Voltaje V	Resistencia ohm	Pot
0	15,45	27,3	8,74
2,74	15,47	27,3	8,77
3,41	15,5	27,3	8,80
3,98	15,53	27,3	8,83
7,69	15,57	27,3	8,88
15,87	15,58	27,3	8,89
17,69	15,59	27,3	8,90
21,08	15,6	27,3	8,91
23,12	15,61	27,3	8,93
25	15,62	27,3	8,94

Ensayo 2			
Tiempo	Voltaje V	Resistencia ohm	Pot
0	15,44	27,3	8,73
2,78	15,46	27,3	8,76
3,38	15,51	27,3	8,81
3,88	15,52	27,3	8,82
7,58	15,56	27,3	8,87
15,88	15,57	27,3	8,88
17,68	15,58	27,3	8,89
21,08	15,59	27,3	8,90
22,98	15,6	27,3	8,91
25	15,61	27,3	8,93

Tiempo	Voltaje V	Resistencia ohm	Pot
0	15,46	27,3	8,76
2,7	15,48	27,3	8,78
3,35	15,49	27,3	8,79
4,05	15,54	27,3	8,85
7,75	15,55	27,3	8,86
15,85	15,56	27,3	8,87
17,65	15,57	27,3	8,88
21,05	15,58	27,3	8,89
23,15	15,6	27,3	8,91
25	15,63	27,3	8,95

figura C-3 PID. Panel posición derecha:

Ensayo 1			
Tiempo	Voltaje V	Resistencia ohm	Pot
0	7,12	27,3	1,86
0,85	8,29	27,3	2,52
1,27	9,88	27,3	3,58
1,48	11,65	27,3	4,97
1,8	13,61	27,3	6,79
2,13	15,45	27,3	8,74
2,38	15,94	27,3	9,31
2,66	15,95	27,3	9,32
3,93	15,93	27,3	9,30
4,69	15,88	27,3	9,24
5,37	15,61	27,3	8,93
5,88	15,98	27,3	9,35
6,35	15,19	27,3	8,45
15,83	15,68	27,3	9,01
16,62	15,7	27,3	9,03
17,73	15,66	27,3	8,98
19,22	15,68	27,3	9,01
20	15,65	27,3	8,97

Ensayo 2			
Tiempo	Voltaje	Resistencia ohm	Pot
0	7,23	27,3	1,91
0,8	7,29	27,3	1,95
1,55	7,38	27,3	2,00
2,09	7,48	27,3	2,05
2,73	7,58	27,3	2,10
3,34	7,63	27,3	2,13
-0,78	7,74	27,3	2,19
-0,18	7,8	27,3	2,23
0,5	7,88	27,3	2,27
1,3	9,29	27,3	3,16
1,58	11,32	27,3	4,69
1,94	13,78	27,3	6,96
2,22	15,73	27,3	9,06
2,51	16,26	27,3	9,68
3,2	16,27	27,3	9,70
4,2	16,29	27,3	9,72
5,97	16,22	27,3	9,64
7,02	16,16	27,3	9,57
8,89	16,08	27,3	9,47
10,52	16,01	27,3	9,39
10,79	15,98	27,3	9,35
11,78	15,86	27,3	9,21
12,34	15,76	27,3	9,10
12,9	15,66	27,3	8,98
13,49	15,48	27,3	8,78
14,89	15,32	27,3	8,60
15,19	15,23	27,3	8,50
16,39	15,19	27,3	8,45
18	15,3	27,3	8,57
18,71	15,32	27,3	8,60
20	15,31	27,3	8,59

Ensayo 3			
Tiempo	Voltaje V	Resistencia ohm	Pot
0	7,15	27,3	1,87
0,67	7,22	27,3	1,91
0,88	9,15	27,3	3,07
1,2	10,76	27,3	4,24
1,53	12,85	27,3	6,05
1,78	14,57	27,3	7,78
2,06	16,17	27,3	9,58
3,33	16,59	27,3	10,08
4,09	16,6	27,3	10,09
4,77	16,65	27,3	10,15
5,28	16,66	27,3	10,17
5,75	16,64	27,3	10,14
15,23	16,62	27,3	10,12
16,02	16,59	27,3	10,08
17,13	16,66	27,3	10,17
18,62	16,6	27,3	10,09
20	16,59	27,3	10,08

figura C-4 ON/OFF. Posición izquierda

Ensayo 1			
Tiempo	Voltaje V	Resistencia ohm	Pot
0	1,956	27,3	0,14
0,1	2,988	27,3	0,33
0,34	3,988	27,3	0,58
0,64	4,787	27,3	0,84
1,18	10,57	27,3	4,09
1,31	13,5	27,3	6,68
1,66	15,1	27,3	8,35
1,9	15,9	27,3	9,26
2,09	15,91	27,3	9,27
2,61	14,44	27,3	7,64
2,89	13,89	27,3	7,07
3,2	14,76	27,3	7,98
3,54	15,42	27,3	8,71
3,77	15,85	27,3	9,20
4,19	15,87	27,3	9,23
4,66	15,89	27,3	9,25
4,95	15,93	27,3	9,30
5,88	15,99	27,3	9,37
6,62	16,01	27,3	9,39
8,35	15,99	27,3	9,37
10,51	15,97	27,3	9,34
10,7	16,01	27,3	9,39
11,5	15,97	27,3	9,34
12,3	15,99	27,3	9,37
13,5	16,01	27,3	9,39
14	16,01	27,3	9,39

Ensayo 2			
Tiempo	Voltaje V	Resistencia ohm	Pot
0	2,348	27,3	0,20
0,37	3,791	27,3	0,53
0,65	5,711	27,3	1,19
1,26	10,87	27,3	4,33
1,65	13,23	27,3	6,41
1,94	14,34	27,3	7,53
2,29	14,29	27,3	7,48
3,23	14,33	27,3	7,52
4,76	14,48	27,3	7,68
6,57	14,28	27,3	7,47
7,83	15,16	27,3	8,42
8,27	15,39	27,3	8,68
9,1	15,58	27,3	8,89
9,35	15,74	27,3	9,08
10,49	15,86	27,3	9,21
11,56	15,74	27,3	9,08
12,56	15,58	27,3	8,89
13,1	15,74	27,3	9,08
13,7	15,79	27,3	9,13
14	15,81	27,3	9,16

Ensayo 3			
Tiempo	Voltaje V	Resistencia ohm	Pot
0	1,877	27,3	0,13
0,34	2,973	27,3	0,32
0,61	4,896	27,3	0,88
1,28	10,71	27,3	4,20
1,41	13,79	27,3	6,97
1,54	13,79	27,3	6,97
1,88	15,22	27,3	8,49
2,14	15,84	27,3	9,19
2,4	15,82	27,3	9,17
3,35	15,83	27,3	9,18
4,2	15,84	27,3	9,19
5,22	15,85	27,3	9,20
5,96	15,8	27,3	9,14
6,93	15,72	27,3	9,05
7,93	15,62	27,3	8,94
8,93	15,53	27,3	8,83
9,93	15,48	27,3	8,78
10,93	15,5	27,3	8,80
11,93	15,58	27,3	8,89
12,5	15,53	27,3	8,83
13,5	15,72	27,3	9,05
14	15,53	27,3	8,83

figura C-5 ON/OFF. Posición horizontal

Ensayo 1			
Tiempo	Voltaje V	Resistencia ohm	Pot
0	15	27,3	8,24
0,38	15,08	27,3	8,33
0,96	15,18	27,3	8,44
1,71	15,19	27,3	8,45
2,19	15,23	27,3	8,50
2,59	15,31	27,3	8,59
2,72	15,39	27,3	8,68
3,61	15,43	27,3	8,72
3,97	15,47	27,3	8,77
4,38	15,55	27,3	8,86
5,09	15,61	27,3	8,93
5,58	15,65	27,3	8,97
6,17	15,69	27,3	9,02
6,76	15,71	27,3	9,04
9,6	15,75	27,3	9,09
13,17	15,65	27,3	8,97
15,67	15,61	27,3	8,93
18,17	15,71	27,3	9,04
20,67	15,69	27,3	9,02
21,67	15,71	27,3	9,04
23,17	15,61	27,3	8,93
23,9	15,6	27,3	8,91
24,4	15,58	27,3	8,89
25	15,55	27,3	8,86

Ensayo 2			
Tiempo	Voltaje V	Resistencia ohm	Pot
0	15,35	27,3	8,63
0,33	15,37	27,3	8,65
0,6	15,4	27,3	8,69
1,14	15,42	27,3	8,71
1,58	15,49	27,3	8,79
5,47	15,44	27,3	8,73
10,28	15,45	27,3	8,74
19,21	15,45	27,3	8,74
21,22	15,45	27,3	8,74
22,72	15,49	27,3	8,79
23,5	15,44	27,3	8,73
24,6	15,45	27,3	8,74
25	15,47	27,3	8,77

Ensayo 3			
Tiempo	Voltaje V	Resistencia ohm	Pot
0	15,31	27,3	8,59
0,69	15,34	27,3	8,62
1,31	15,38	27,3	8,66
1,68	15,43	27,3	8,72
2,01	15,49	27,3	8,79
4,31	15,47	27,3	8,77
9,68	15,46	27,3	8,76
12,19	15,48	27,3	8,78
13,76	15,46	27,3	8,76
23,5	15,45	27,3	8,74
25	15,47	27,3	8,77

figura C-6 ON/OFF. Posición derecha

Ensayo 1			
Tiempo	Voltaje V	Resistencia ohm	Pot
0	9,45	27,3	3,27
1,07	9,48	27,3	3,29
1,43	11,11	27,3	4,52
1,7	12,32	27,3	5,56
1,96	13,5	27,3	6,68
2,24	14,36	27,3	7,55
2,5	14,98	27,3	8,22
2,85	15,02	27,3	8,26
3,19	15,09	27,3	8,34
3,48	15,15	27,3	8,41
5,88	15,27	27,3	8,54
4,29	15,33	27,3	8,61
8,59	15,39	27,3	8,68
4,98	15,44	27,3	8,73
5,4	15,49	27,3	8,79
6,24	15,41	27,3	8,70
7,18	15,39	27,3	8,68
9,25	15,28	27,3	8,55
12,74	15,3	27,3	8,57
13,73	15,32	27,3	8,60
14,59	15,33	27,3	8,61
16,78	15,35	27,3	8,63
18,77	15,36	27,3	8,64
19,77	15,38	27,3	8,66
21,18	15,41	27,3	8,70
23,03	15,47	27,3	8,77
25	15,44	27,3	8,73

Ensayo 2			
Tiempo	Voltaje	Resistencia ohm	Pot
0	9,43	27,3	3,26
1,11	9,93	27,3	3,61
1,31	11,32	27,3	4,69
1,55	12,66	27,3	5,87
1,94	13,86	27,3	7,04
2,16	14,65	27,3	7,86
2,52	15,21	27,3	8,47
2,92	15,25	27,3	8,52
3,42	15,34	27,3	8,62
4,06	15,44	27,3	8,73
4,59	15,54	27,3	8,85
5,07	15,68	27,3	9,01
5,51	15,6	27,3	8,91
6	15,61	27,3	8,93
6,69	15,6	27,3	8,91
14,78	15,59	27,3	8,90
21,05	15,58	27,3	8,89
22,33	15,57	27,3	8,88
22,57	15,55	27,3	8,86
23,4	15,5	27,3	8,80
25	15,58	27,3	8,89

Ensayo 3			
Tiempo	Voltaje V	Resistencia ohm	Pot
0	9,13	27,3	3,05
1,1	9,67	27,3	3,43
1,43	11,05	27,3	4,47
1,75	12,35	27,3	5,59
2,13	13,54	27,3	6,72
2,35	14,31	27,3	7,50
2,56	14,89	27,3	8,12
3,03	14,93	27,3	8,17
3,32	14,99	27,3	8,23
3,7	15,08	27,3	8,33
4,09	15,18	27,3	8,44
4,45	15,24	27,3	8,51
4,98	15,36	27,3	8,64
5,38	15,38	27,3	8,66
9,66	15,37	27,3	8,65
11,79	15,38	27,3	8,66
17,1	15,38	27,3	8,66
20	15,37	27,3	8,65
21,5	15,36	27,3	8,64
23	15,38	27,3	8,66
25	15,37	27,3	8,65

Apéndice D. Estimación de la energía neta del sistema de seguimiento solar

Se analizará el aumento de energía neta del panel en un periodo de una hora, es decir, la cantidad de energía que genera en ese lapso con o sin corrección, considerando un cálculo aproximado del consumo del sistema encargado de ajustar el ángulo.

Se asume que:

Las condiciones ambientales permanecen constantes. En otras palabras, los valores de potencia obtenidos durante el protocolo de pruebas se mantienen durante una hora.

Con una reducción de 4,67, los motores son capaces de mantener el panel en cualquier posición incluso estando apagados. Por lo tanto, una vez alcanzada la posición final, el panel no requiere consumo adicional. Además, dado que el intervalo de medición es pequeño, se desprecia el consumo asociado a los microajustes que pueda realizar el controlador.

$$\Delta E_{net} = (E_{panel,after} - E_{panel,before}) - (E_{motors} + E_{Arduino}) \quad (15)$$

Siendo:

$$\Delta E_{net} = \text{Energía neta}$$

$E_{panel,after} = \text{Energía del panel en 1 hora (después de corregir)}$

$E_{panel,before} = \text{Energía del panel en 1 hora (antes de corregir)}$

$E_{motors} = \text{Energía de los 2 motores} + 2 \text{ Puentes H}$

$E_{Arduino} = \text{Energía de Arduino UNO}$

Procedimiento por seguir:

Haciendo uso de la [Figura 28](#) (y por medio del método trapecio), se estima la energía que consumen los 2 motores DC y 2 puente H para mover el panel y dejarlo en su posición final.

El delta de energía (ΔE_{panel}) es la ganancia bruta de la potencia del panel, por lo que se resta a esta misma la energía que consume el banco, es decir la energía de los motores y puentes H, se usa un valor de energía común para el Arduino UNO (*Indice de Tutoriales Arduino – Prometec, n.d.*), y con esto se obtiene la energía neta, es decir la cantidad de energía generada por un sistema menos la energía que éste consume para funcionar.

Ejemplo para posición izquierda PID:

El panel pasó de generar 0,22 W a 9,17 W, por lo que:

$$\Delta E_{panel} = (E_{panel,after} - E_{panel,before}) \quad (16)$$

$$\Delta E_{panel} = 8,95 \text{ Wh (para 1 hora)}$$

$$E_{motors} = 0,0025181 \text{ Wh (para dos motores y 2 puente H)}$$

$$E_{Arduino} = 0,25 \text{ Wh}$$

$$E_{net} = 8,6975 \text{ Wh}$$

Posición Horizontal PID:

El panel pasó de generar 8,74 W a 8,94 W, por lo que:

$$E_{panel} = 0,20 \text{ Wh (para 1 hora)}$$

$$E_{motors} = 0,000306 \text{ Wh (para dos motores y 2 puente H)}$$

$$E_{Arduino} = 0,25 \text{ Wh}$$

$$E_{net} = -0,0503 \text{ Wh}$$

Posición Derecha PID:

El panel pasó de generar 1,88 W a 9,75 W, por lo que:

$$E_{panel} = 7,87 \text{ Wh (para 1 hora)}$$

$$E_{motors} = 0,002124 \text{ Wh (para dos motores y 2 puente H)}$$

$$E_{Arduino} = 0,25 \text{ Wh}$$

$$E_{net} = 7,6179 \text{ Wh}$$

De igual forma se hizo con los ensayos del protocolo de pruebas del control ON/OFF.

Ejemplo para posición izquierda ON/OFF:

El panel pasó de generar 0,16 W a 9,27 W, por lo que:

$$\Delta E_{panel} = (E_{panel,after} - E_{panel,before}) \quad (17)$$

$$\Delta E_{panel} = 9,11 \text{ Wh (para 1 hora)}$$

$$E_{motors} = 0,0025181 \text{ Wh (para dos motores y 2 puente H)}$$

$$E_{Arduino} = 0,25 \text{ Wh}$$

$$E_{net} = 8,8575 \text{ Wh}$$

Posición Horizontal ON/OFF:

El panel pasó de generar 8,49 W a 8,89 W, por lo que:

$$E_{panel} = 0,4 \text{ Wh (para 1 hora)}$$

$$E_{motors} = 0,000306 \text{ Wh (para dos motores y 2 puente H)}$$

$$E_{\text{Arduino}} = 0,25 \text{ Wh}$$

$$E_{\text{net}} = 0,1497 \text{ Wh}$$

Posición Derecha ON/OFF:

El panel pasó de generar 3,19 W a 8,82 W, por lo que:

$$E_{\text{panel}} = 5,63 \text{ Wh (para 1 hora)}$$

$$E_{\text{motors}} = 0,002124 \text{ Wh (para dos motores y 2 puente H)}$$

$$E_{\text{Arduino}} = 0,25 \text{ Wh}$$

$$E_{\text{net}} = 5,3779 \text{ Wh}$$

Los resultados se presentan en la [Tabla 9](#) y Tabla 10.

Tabla 9 Posición inicial (PID) y Energía Neta (Wh)

Posición inicial (PID)	Energía Neta (Wh)
Izquierda	8,6975
Horizontal	-0,0503
Derecha	7,6179

Tabla 10 Posición inicial (ON-OFF) y Energía Neta (Wh)

Posición inicial (ON/OFF)	Energía Neta (Wh)
Izquierda	8,8575
Horizontal	0,1497
Derecha	5,3779

De las estimaciones realizadas, se observa un aumento de energía neta en todos los casos, excepto en la posición *PID Horizontal*. Esto indica que, con los datos utilizados para el cálculo, el sistema consumió más energía de la que generó. La razón principal es que, como ya se mencionó, el panel partía de una posición con buena incidencia solar, por lo que el incremento de energía bruta fue reducido. Además, el consumo aproximado del Arduino tuvo un peso significativo en este resultado.

En contraste, en los demás casos se obtuvieron energías netas positivas, destacando la posición izquierda y derecha para el control PID, con valores de 8,6975 Wh y 7,6179 Wh, respectivamente. Para el control ON/OFF, los resultados fueron de 8,8575 Wh y 5,3779 Wh, respectivamente.

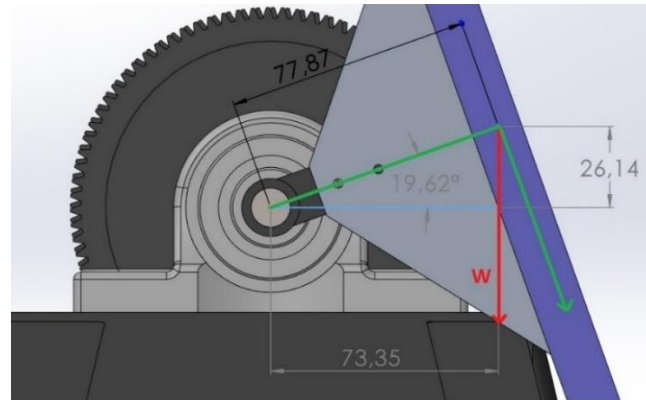
Cabe recalcar que, si bien al analizar los datos podría pensarse que los seguidores solares son más eficientes de lo que en realidad son, en términos generales pueden llegar a incrementar la eficiencia de un panel fijo hasta en un 25,8%, esto después de analizar la generación de los dos tipos de configuraciones por varios días, mientras que en el caso del banco “Luzbot”, solo se hizo calculó para 1 hora.

Cabe recalcar que, si bien al analizar los datos podría pensarse que los seguidores solares son más eficientes de lo que en realidad son, en términos generales pueden incrementar la eficiencia de un panel fijo hasta en un 25,8%, según estudios realizados a partir de la generación de ambos tipos de configuraciones durante varios días (Arturo Pelayo López et al., 2017) .En contraste, en el caso del banco “Luzbot”, el cálculo se realizó únicamente para un intervalo de 1 hora, y para la mayoría de casos planteados (excepto uno), la energía neta fue positiva, es decir, es rentable energéticamente hablando.

Apendice E. Dimensionamiento del eje

Para dimensionar el eje se tiene la siguiente geometría la cual describe la ubicación del centro de masa del panel junto con las placas en la [figura E-1](#).

figura E-1 Ubicación del centro de masa



Dada las condiciones dadas por “Solidworks” se calcula el torque que genera el peso del panel de la siguiente forma:

La masa del panel con todo y la estructura es de:

$$Masa_{panel} = 1,73 \text{ kg}$$

$$T_{panel} = 0,07787 \text{ m} * 1,73 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * \cos (19,62^\circ)$$

$$T_{panel} = 1,245 \text{ Nm}$$

El material del eje es acero inoxidable 304 y se tienen estas propiedades:

$$S_{ut} = 550 \text{ Mpa}$$

$$S_y = 137,9 \text{ Mpa}$$

Nota: datos Tomados de la biblioteca de Solidworks

Datos tomados de la tabla:

$$Dp = Z_f \times M \tag{18}$$

Tabla 11 Datos del piñón y la rueda

Datos piñón	Datos rueda
$\theta_p = 20^\circ$	$\theta_p = 20^\circ$
$M_p = 1,5 \text{ mm}$	$M_p = 1,5 \text{ mm}$
$Z_p = 18 \text{ dientes}$	$Z_p = 84 \text{ dientes}$
$D_p = 27 \text{ mm}$	$D_p = 126 \text{ mm}$

Relación de engranajes

$$i = \frac{Z_f}{Z_p} \quad (19)$$

$$i = 4,67$$

Se analizan los engranajes rectos:

Lo primero es calcular las fuerzas radiales y tangenciales de los engranajes, dado que son rectos no generan fuerzas sobre el eje (axiales), el cálculo se da la siguiente manera:

Tomando en cuenta que para mover el panel se requiere 4,298 N·m, cada engranaje ofrece la mitad, es decir 2,149 N·m.

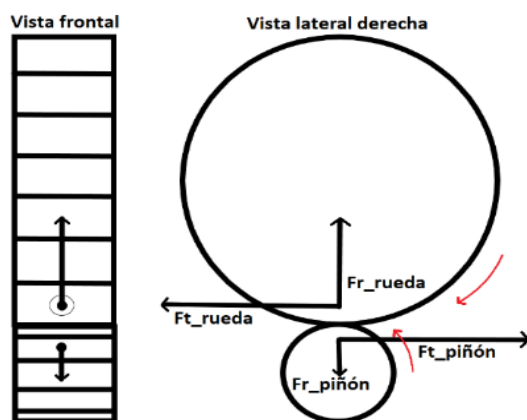
$$F_{tF} = \frac{T_{max}}{r_F} = \frac{2,149 \text{ Nm}}{0,063 \text{ m}} \quad (20)$$

$$F_{tF} = 34,1 \text{ N}$$

$$F_{rF} = F_{tF} * \tan\theta = 12,41 \text{ N} \quad (21)$$

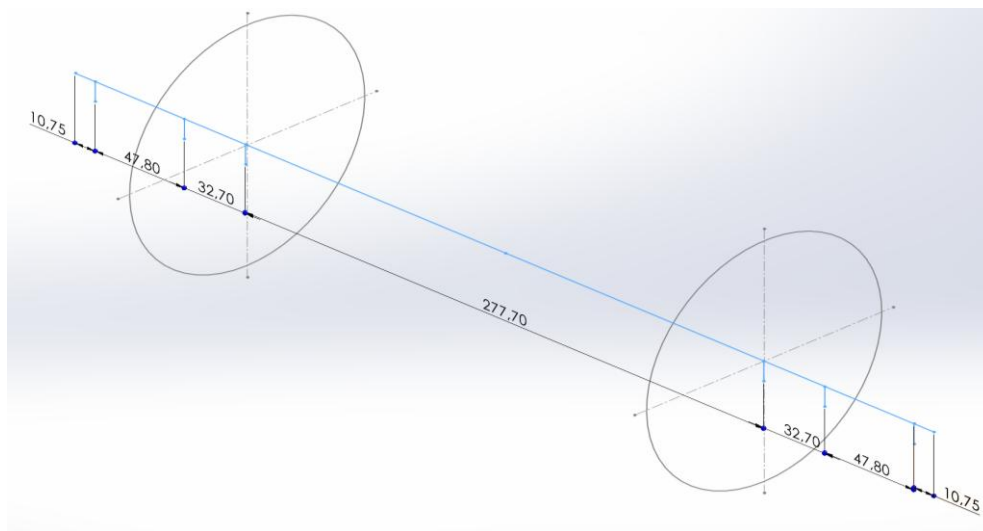
Para comprender la transmisión de potencia en los engranajes rectos, es necesario identificar las direcciones de las fuerzas generadas durante el contacto. [La figura E-2](#) ilustra la orientación de las fuerzas tangenciales y radiales que actúan sobre los engranajes piñón y rueda.

figura E-2 Orientación de las fuerzas en los engranajes rectos



Se definen los puntos sobre el eje con sus distancias, mostradas en la [figura E-3](#).

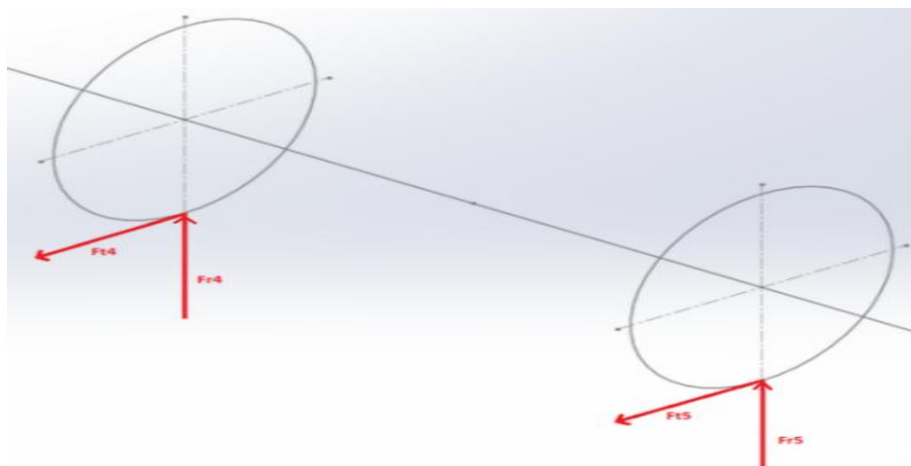
figura E-3 Distancias



Nota: “Medidas en milímetros”

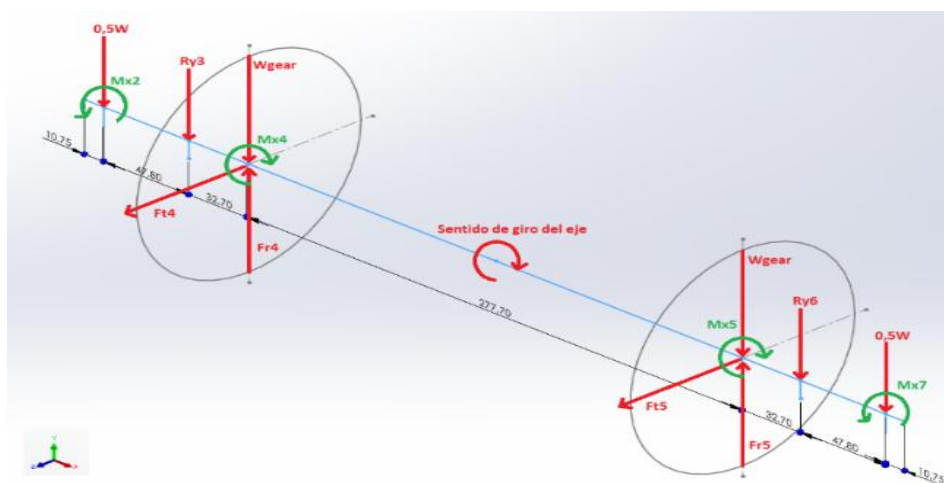
Primero se representan las fuerzas aplicadas antes de ser transferidas. Estas se muestran en la [figura E-4](#).

figura E-4 Fuerzas que actúan sobre el eje



Al proyectar estas fuerzas sobre el eje, se obtiene la distribución de cargas y torques que afectan la transmisión de potencia, como se observa en la [figura E5](#).

figura E-5 Fuerzas y torques ejercidos en el eje



Se calcula tanto el peso de los engranajes, como del “cubo” hecho en aluminio. (ver [Figura 23](#)).

$$W_{cubo} = 164,98 \text{ g} * \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}}$$

$$W_{engranaje} = 119,59 \text{ g} * \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}}$$

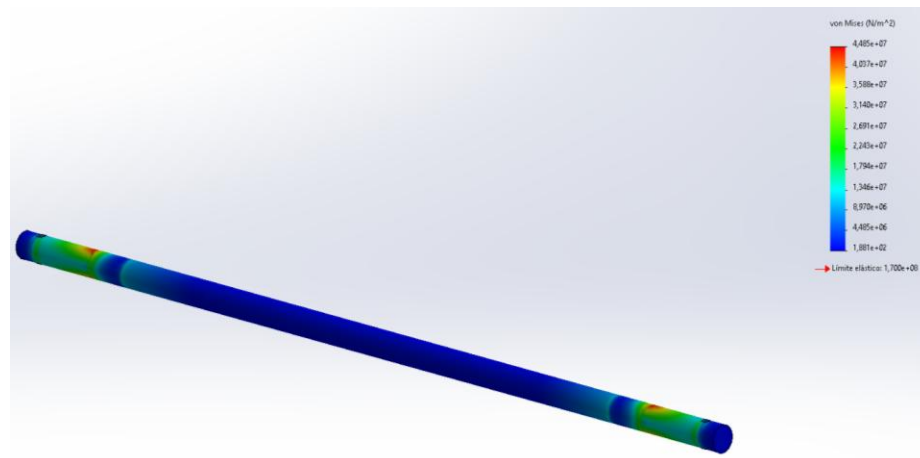
$$W_{gear} = (W_{cubo} + W_{engranaje}) * 9,81 \frac{m}{s^2} \quad (22)$$

$$W_{gear} = 2,79 N$$

El cálculo de fuerzas realizado fue fundamental para llevar a cabo el análisis estático y de fatiga mediante la herramienta SolidWorks. En este proceso, se definieron los torques de los engranajes como los valores máximos obtenidos en la simulación donde se evaluó si los motores donados eran adecuados para el banco experimental. Esto permitió establecer valores críticos que sirvieron como referencia durante el análisis del eje.

Durante el análisis estático, se identificaron las zonas del eje donde la tensión equivalente de Von Mises alcanzó sus valores máximos. La [figura E-6](#) correspondiente al estudio se presenta a continuación:

figura E-6 Análisis estático eje, tensión de Von Mises.



Nota: Realizado en Solidworks

Para determinar la seguridad del diseño, se realizó un análisis estático considerando el límite elástico del material, el cual es de 170 MPa. Los resultados de este análisis muestran la distribución del factor de seguridad (FS) a lo largo del eje, se presenta en la [figura E-7](#). El valor

mínimo de FS obtenido fue de 3,79, lo cual indica que el diseño cumple con los requisitos de seguridad.

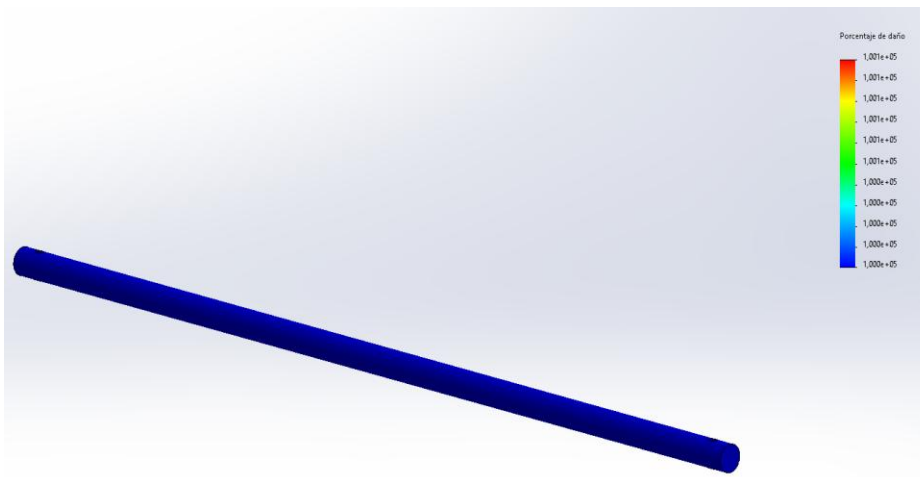
figura E-7 Análisis de factor de seguridad



Nota: Realizado en Solidworks

Se procede a realizar un análisis de fatiga, obteniendo un porcentaje de daño bajo en la pieza, la [figura E-8](#) se observa a continuación.

figura E-8 Análisis de fatiga del eje, factor daño



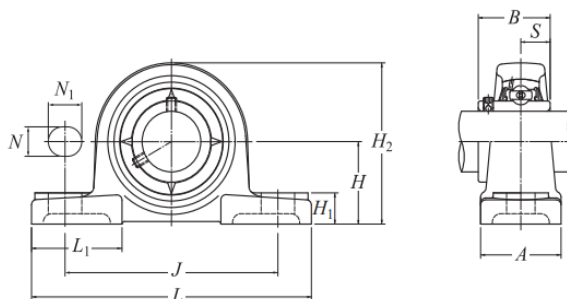
Nota: Realizado en Solidworks

Del análisis realizado se obtuvo un resultado satisfactorio: el eje de acero inoxidable no presenta indicios de falla bajo las condiciones de carga estática. Aunque el eje no opera a altas revoluciones, se realizó también un análisis de fatiga, asumiendo un régimen de rotación continua. Los resultados indican que, para un tiempo de vida infinito, no se evidencian daños estructurales en el eje.

Apéndice F. Selección de las chumaceras

La selección de la chumacera se realizó considerando el diámetro del eje, así como la forma de la chumacera que se muestra en la [figura F-1](#). Además, se tuvo en cuenta la posición de montaje y las cargas que la chumacera debe soportar durante el funcionamiento del sistema.

figura F-1 Especificaciones técnicas para chumacera NTN UCP201D1



Shaft diameter: 12–50 mm

Shaft dia. mm	Unit number ^{1) 2)}	Dimensions mm											Fixing bolt	Number	Bearing		
		H	L	J	A	N	N ₁	H ₁	H ₂	L ₁	B	S			Basic load rating dynamic kN C _r	static kN C _{0r}	Fatigue load limit kN C _u
12	UCP201	30.2	127	95	38	13	16	14	62	42	31	12.7	M10	UC201D1	14.2	6.65	0.505
15	UCP202	30.2	127	95	38	13	16	14	62	42	31	12.7	M10	UC202D1	14.2	6.65	0.505
17	UCP203	30.2	127	95	38	13	16	14	62	42	31	12.7	M10	UC203D1	14.2	6.65	0.505
20	UCP204	33.3	127	95	38	13	16	14	65	42	31	12.7	M10	UC204D1	14.2	6.65	0.505

Nota: Tomado de CHUMACERAS (p. 27), por NTN, 2009, <https://www.ntn-snr.com/es>

Los rodamientos utilizados en el modelo presentan una resistencia a carga dinámica de 14.2 KN y 6.65 KN, En aplicaciones estacionarias, donde los rodamientos giran a velocidades

reducidas (por ejemplo, 10 RPM) o experimentan movimientos oscilantes leves, se recomienda considerar únicamente la carga estática como criterio de diseño.

La capacidad básica de carga estática requerida en el sistema se determina mediante la siguiente expresión:

$$C_0 = P_{\text{omax}} \cdot S_0 \quad (23)$$

Donde P_{omax} es la carga radial del sistema [N], S_0 el factor seguridad. El factor de seguridad en rodamientos de bolas se relaciona con las condiciones de operación se pueden ver en la [figura F-2](#).

figura F-2 Factor de seguridad para rodamientos de bolas según condiciones de operación

Condiciones de operación	Rodamientos de bolas
Requerida una precisión de alta rotación	2
Requerida una precisión normal de rotación (aplicaciones generales)	1
Permite deterioro por precisión rotacional ligera (Velocidad baja, cargas grandes, etc.)	0.5

Nota: Tomado de CHUMACERAS (p. 27), por NTN, 2009, <https://www.ntn-snr.com/es>

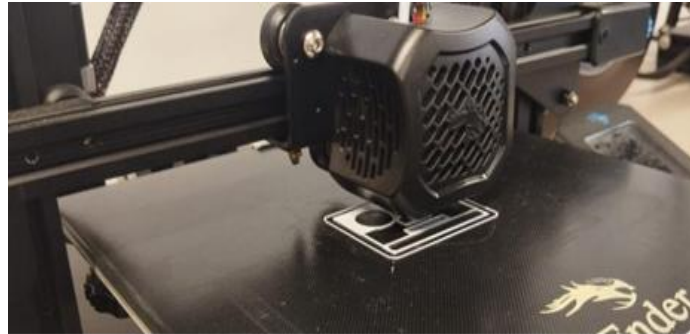
De acuerdo con la Figura 14, para una aplicación que requiere una precisión de rotación estándar como ocurre en la mayoría de los casos generales se puede utilizar un factor igual a 1.

Apendice G. Selección del sistema de potencia

Para el diseño del sistema de seguimiento solar se seleccionó un conjunto de cuatro engranajes que permite transmitir el movimiento del motor al eje de rotación del panel de forma eficiente y precisa. Esta configuración fue elegida por varias razones: además de garantizar una adecuada reducción de velocidad y un incremento del torque, permiten un movimiento suave y controlado del panel en función de la posición del sol. Asimismo, se descartó el uso de correas, ya que existe el riesgo por deslizamiento, perdiendo su función de transmisión. Los engranajes fueron

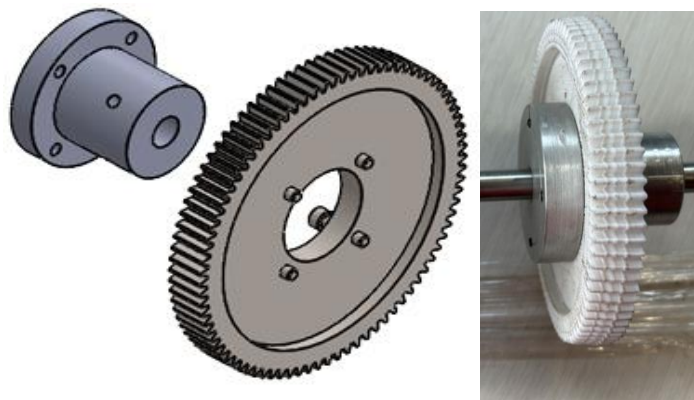
fabricados en material PLA mediante impresión 3D, lo cual facilitó su prototipado, adaptación y redujo significativamente los costos de manufactura en la [figura G-1](#) se puede apreciar la impresora usada.

figura G-1 Impresión 3d de las piezas en PLA



No obstante, para asegurar la durabilidad y resistencia mecánica, especialmente en la zona de acople con el eje, el cubo central de los engranajes fue fabricado en aluminio, dado que este material proporciona mayor resistencia al torque transmitido. Para lograr una sujeción firme y confiable, la fijación del cubo al eje se realiza mediante tornillos prisioneros, al igual que la unión entre la corona del engranaje y el cubo, lo cual garantiza el movimiento sin deslizamientos. Este conjunto se puede apreciar en la [figura G-2](#).

figura G-2 Diseño de engranajes: Modelado CAD y prototipo físico



Apendice H. Cálculo del mecanismo de engranajes

En el siguiente anexo se presenta una serie de ecuaciones que guían el proceso de selección de engranajes para el sistema de transmisión. El primer paso es establecer los datos iniciales para el cálculo de los engranajes necesarios para garantizar un ajuste adecuado sin que el conjunto resulte excesivamente voluminoso.

Datos Iniciales:

- Módulo: 1,5
- Número de dientes (z): 18

Estos datos se seleccionaron considerando las especificaciones del motor EDR 393 y las dimensiones de la estructura mecánica. Se realizaron los cálculos necesarios para asegurar que todos los componentes encajen de manera adecuada y funcionen eficientemente.

$$m = \frac{d}{z} \quad (24)$$

Esta fórmula se usa para determinar el módulo, lo cual es clave para obtener medidas esenciales en el diseño de los componentes de transmisión, como el piñón y la cremallera.

$$P = \pi \cdot m \quad (25)$$

Donde:

P: Paso diametral

$$De = m \cdot (Z + 2) \quad (26)$$

Donde:

De: Diámetro exterior

m: modulo

Z: número de dientes

$$Df = d - (2 \cdot m \cdot 1.167) \quad (27)$$

Donde:

Df: Diámetro de fondo

m: modulo

$$e = \frac{P}{2} \quad (28)$$

Donde:

P: Paso diametral

e: Espesor del diente

$$h = m \cdot 2.167 \quad (29)$$

Donde:

h: altura total del diente (adendum)

m: modulo

$$ha = m \quad (30)$$

Donde:

ha: altura de cabeza del diente (dedendum)

$$hf = m \cdot 1.16 \quad (31)$$

Tabla 12 Número de dientes recomendados

Ángulo de presión (grados)	Número mínimo de dientes
14.5	32
20	18
25	12

Nota: La Tabla 11 muestra los números mínimos de dientes recomendados para evitar la interferencia entre un piñón y una cremallera de profundidad total, según el ángulo de presión. Estos valores son fundamentales

para garantizar una operación eficiente y evitar el desgaste prematuro de los dientes en engranajes sometidos a diferentes cargas y velocidades. La configuración de los dientes y el ángulo de presión adecuados son críticos para mantener la integridad estructural y la funcionalidad del engranaje. La [Tabla 11](#) ha sido adaptada del libro "Diseño de máquinas Norton", publicado en 2011,

Tabla 13 Cálculos realizados para el engranaje motriz y conductor

Datos	Motriz	Conductor	Unidad
Módulo (m)	2	2	mm
Paso diametral (P)	6.28	6.28	mm
Número de dientes (z)	18	84	dientes
Diámetro primitivo (d)	36	168	mm
Diámetro exterior (De)	40	172	mm
Diámetro de fondo (Df)	31.33	163.33	mm
Espesor del diente (e)	3.14	3.14	mm
Altura total del diente (h)	2	2	mm
Altura de la cabeza del diente (addendum)	2	3	mm
Altura del pie del diente (dedendum)	2.334	2.334	mm
Diámetro interior eje	7	8	mm
Ángulo de presión	20°	20°	

Nota: En la Tabla 11 se presentan los valores calculados usando las ecuaciones seleccionadas para el diseño de engranajes motriz y conductor.

Apendice I. Manual Instructivo de funcionamiento del banco



BANCO EXPERIMENTAL DIDÁCTICO PARA LA EVALUACIÓN DE LA
GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE UN PANEL FOTOVOLTAICO EN
FUNCIÓN DE SU ANGULO DE INCLINACIÓN CON SISTEMA DE
CONTROL PROGRAMABLE

José Fernando Suarez Botello. Cod: 2200460

Camilo Andrés Chaparro Pérez. Cod: 2194212

Ingeniería Mecánica-Universidad Industrial de Santander

Bucaramanga, Santander

2025

Tabla de Contenido

Introducción		110
1	Descripción general del sistema.....	111
1.1	Estructura mecánica	111
1.2	Sistema de transmisión	111
1.3	Actuadores: motores DC.....	112
1.4	Sensor de posición: potenciómetro lineal	112
1.5	Sistema de censado de luz: LDRs.....	112
1.6	Unidad de control y procesamiento	112
2	Componentes y materiales	113
2.1	Componentes electrónicos	113
2.2	Componentes mecánicos.....	114
3	Ensamble del banco de pruebas	115
3.1	Esquema de conexión	115
3.2	Ubicación de componentes	116
4	Funcionamiento del sistema.....	117
4.1	Cómo opera el sistema paso a paso.....	117
4.2	Función de transferencia en lazo cerrado.....	118
4.2.1	Caracterización de la planta	119
4.3	Explicación básica del control PID implementado.....	121
4.4	Explicación básica del control ON/OFF implementado	121
5	Instrucciones de uso	122
5.1	Paso a paso, para el uso del banco experimental:	122

5.2	Prueba del sistema:	123
6	Mantenimiento y seguridad.....	124
6.1	Mantenimiento	124
6.2	Seguridad	124
7	Solución de problemas comunes.....	125
7.1	El panel no gira al activar la estrategia de control	125
7.2	El panel emite rechinos durante el movimiento.....	125
8	Glosario.....	126
9	Códigos	127
9.1	Código para probar los motores.....	127
9.1.1	Breve explicación del código “probar los motores”.	127
9.2	Código para probar las fotorresistencias.....	129
9.2.1	Breve explicación del código “probar las fotorresistencias”	129
9.3	Código para probar el potenciómetro.	130
9.3.1	Breve explicación del código “probar el potenciómetro”	130
10	Código control PID.....	132
10.1	Breve explicación control PID.....	132
10.2	Código control ON/OFF.	137
10.2.1	Breve explicación control ON/OFF	137

Introducción

Este manual ha sido desarrollado como una guía práctica para la utilización del banco experimental diseñado en el presente proyecto de grado. El banco consiste en un sistema de seguimiento solar automatizado, que implementa estrategias de control PID y ON/OFF mediante la plataforma Arduino. El sistema está conformado por dos motores DC controlados a través de puentes H, dos fotorresistencias (LDR) y un potenciómetro. Esta configuración, junto con la programación del microcontrolador, permite ajustar de forma automática la orientación de un panel fotovoltaico en función de la intensidad luminosa detectada.

Este banco experimental permite observar en tiempo real el comportamiento de un sistema de control programable, facilitando el análisis de su respuesta frente a condiciones variables de iluminación. Su propósito es servir como herramienta educativa para apoyar el aprendizaje práctico en áreas como energías renovables, control automático y sistemas embebidos.

El manual está dirigido a estudiantes de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander que deseen profundizar en los principios de la energía solar y los fundamentos del control aplicado. A lo largo del documento se detallan el ensamblaje, configuración, operación y recomendaciones generales del sistema, con el fin de garantizar su correcto funcionamiento y comprensión de uso.

Descripción general del sistema

El banco experimental desarrollado en este proyecto tiene como objetivo simular un sistema de seguimiento solar en un eje (elevación), con el fin de implementar, observar y comparar distintas estrategias de control, tales como ON/OFF y PID, para regular el ángulo de inclinación de un panel fotovoltaico. Este sistema está diseñado como una herramienta didáctica que facilite el aprendizaje práctico en asignaturas relacionadas con energías alternativas y sistemas de control.

1.19 Estructura mecánica

El sistema está montado sobre un bastidor metálico tipo caballete, diseñado para ofrecer estabilidad y soporte estructural. La estructura incluye orificios estratégicamente distribuidos para fijar los ejes de giro, motores, sensores y mecanismos de transmisión. Su configuración abierta permite observar de manera clara el comportamiento de cada componente durante la operación.

Panel fotovoltaico

El panel está conformado por un conjunto de celdas fotovoltaicas dispuestas sobre una base móvil con dos puntos de apoyo. Este conjunto puede inclinarse para ajustar su orientación respecto a la fuente de luz. El diseño busca evidenciar cómo el ángulo de inclinación afecta directamente la generación de potencia.

1.20 Sistema de transmisión

El movimiento del panel es posible gracias a un sistema mecánico de engranajes acoplados a los motores DC. Esta transmisión incrementa el torque útil disponible y permite un movimiento suave y controlado del panel. El sistema está diseñado para resistir las cargas estáticas y dinámicas generadas por el peso del panel y los ajustes de inclinación.

1.21 Actuadores: motores DC

Se emplean dos motores de corriente directa (DC) como actuadores del sistema. Ambos están conectados al sistema de transmisión para regular el ángulo de inclinación del panel. Los motores reciben las señales de control a través de módulos puente H (L298N), que permiten invertir su sentido de giro y ajustar su velocidad, según las instrucciones del controlador.

1.22 Sensor de posición: potenciómetro lineal

Un potenciómetro lineal está acoplado al eje de inclinación del panel y funciona como sensor de posición. Este componente convierte la rotación del eje en una señal analógica proporcional, que es leída por el microcontrolador para determinar con precisión el ángulo actual del panel.

1.23 Sistema de censado de luz: LDRs

El sistema incluye un conjunto de fotorresistencias (LDRs) posicionadas en una estructura (Ver [Figura 2](#)). Estos sensores permiten comparar la intensidad luminosa captada desde diferentes direcciones, lo cual sirve como criterio de decisión para orientar el panel hacia la zona de mayor incidencia solar.

1.24 Unidad de control y procesamiento










La lógica del sistema está programada en una placa Arduino UNO, que interpreta las señales provenientes de los sensores (potenciómetro y LDRs) y genera las señales de control para los motores. El software desarrollado incluye distintos modos de operación, permitiendo variar entre control ON/OFF y control PID.

Componentes y materiales

En la [Tabla 14](#) y [Tabla 15](#) se presenta la lista de componentes utilizados en el banco.






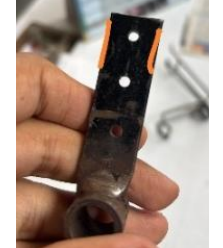


1.25 Componentes electrónicos

Tabla 14 Componentes electrónicos

Nº	Componente	Descripción técnica	Cant	Imagen
1	Arduino UNO R3	Microcontrolador que ejecuta el programa de control.	1	
2	Módulo Puente H L298N	Controlador de motores DC con entrada para señales PWM y control de sentido de giro.	2	
3	Motor DC	Motor de corriente directa para accionar el movimiento del panel.	2	
4	LDR (fotorresistencia)	Sensor que cambia su resistencia según la intensidad luminosa.	2	
5	Potenciómetro lineal	Sensor analógico que mide el desplazamiento angular del panel.	1	
6	Fuente de alimentación	Proporciona energía al sistema.	1	
7	Protoboard	Base para realizar conexiones eléctricas.	1	
8	Resistencias	Para protección y acondicionamiento de señales de sensores.	varias	
9	Cables jumper	Cables para conexiones entre componentes.	varios	

1.26 Componentes mecánicos

Tabla 15 Componentes mecánicos del sistema

N°	Componente	Descripción técnica	Cant	Imagen
1	Bastidor	Tiene un diseño tipo caballete fabricado en acero 1020.	1	
2	Engranajes	La corona se fabricada en plástico, el cubo en aluminio tipo brida.	5	
3	Eje y chumaceras	Eje fabricado en acero inoxidable, chumaceras NTN UCP201D1.	1, 2	
4	Ejes cuadrados	Ejes acoplados a los motores DC.	2	
5	Soportes	Son fabricados en aluminio.	2	
6	Orejas de soporte	Fabricadas en acero 1020.	2	
7	Panel	Tiene dimensiones 340x270x17 el marco es de aluminio.	1	
8	Caja para la electrónica	Fabricada en acrílico .	1	

1.28 Ubicación de componentes

Motores:

Es necesario instalar los motores en la estructura del panel. Los motores VEX 393 se fijan mediante dos tornillos, por lo que, una vez colocados, se puede añadir tanto el eje cuadrado como el engranaje de 18 dientes.

Potenciómetro:

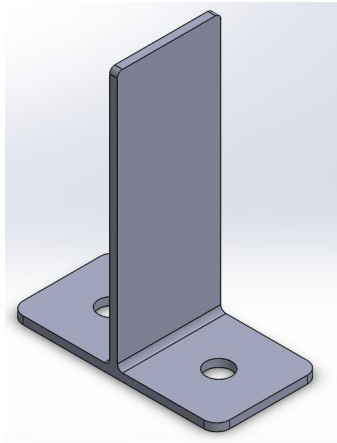
Antes de instalarlo, es necesario colocar el panel en su punto más alto (la mitad del giro que puede dar). Además, se debe asegurar que el sensor de posición está en la mitad de su rango (es un modelo de 10 vueltas). Para ello, gira el eje del componente hasta el tope, luego en sentido opuesto, realiza 5 vueltas completas; esto garantiza que quede en la posición central.

El potenciómetro se asegura a la estructura con dos tornillos de lámina, y gira a medida que un engranaje de 84 dientes le da giro, esta señal se interpola para transformar esos valores de voltaje al ángulo del panel.

LDR:

Las fotorresistencias van en una estructura adecuada para poder seguir el sol, la estructura se presenta en la [Figura 2](#).

Figura 50 Estructura donde van las fotorresistencias



Fuente de alimentación:

La fuente de alimentación debe ser capaz de dar 7.2 V y 1,5 A.

Nota: Para un correcto control y funcionamiento del banco, es necesario asegurar las conexiones y revisar el contacto adecuado en todos los puntos del sistema antes de utilizarlo.

Funcionamiento del sistema

1.29 Cómo opera el sistema paso a paso

Inicialización: Al encender el sistema, el Arduino ejecuta el código que configura los pines de entrada/salida y comienza a leer los sensores.

Lectura de sensores: Las fotorresistencias (LDRs) capturan la luz incidente y envían las señales correspondientes al Arduino.

El potenciómetro lineal, instalado en el eje de inclinación, mide el ángulo actual del panel.

Comparación de señales: Si hay diferencia de iluminación entre los dos sensores de luz, el sistema interpreta que el panel no está bien alineado.

Se calcula un error con la diferencia entre las lecturas de LDR.

Control y actuación: En función del error, el Arduino ejecuta una lógica de control (ON/OFF o PID) para decidir la dirección y velocidad del movimiento. El Arduino envía señales de control a los puentes H (L298N), los cuales activan los motores DC para inclinar el panel.

Retroalimentación: A medida que el panel se mueve, las fotorresistencias proporcionan nuevos valores de error. Mientras el panel gira, el potenciómetro muestra continuamente el valor del ángulo en tiempo real. El ciclo se repite hasta que el panel esté correctamente alineado o el error se acerque a cero.

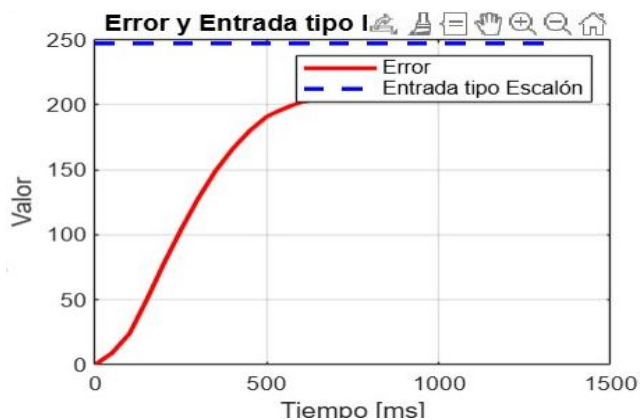
1.30 Función de transferencia en lazo cerrado.

Antes de implementar un controlador PID y ON/OFF, es necesario caracterizar la planta, Lo primero que se hace entonces, es obtener la función de transferencia en lazo cerrado. Para ello, se considera como entrada un valor proporcionado por los sensores de luz. Dado que se planea implementar el sistema de control a partir de la diferencia entre las lecturas de dos fotorresistencias, se define la entrada como el valor “deseado” de dicha diferencia.

Una vez establecida la entrada como esa diferencia deseada, la salida del sistema es entonces la diferencia real entre las lecturas de las fotorresistencias, es decir, el valor que el sistema debe corregir para alcanzar el objetivo de maximizar la captación de luz.

Para obtener la función de transferencia en lazo cerrado, se implementa un controlador proporcional (P) y se analiza la respuesta del sistema (Ver [Figura 3](#)).

Figura 51 Respuesta del sistema con controlador Proporcional.



Nota: Imagen realizada en Matlab.

Datos utilizados para hacer esta gráfica se aprecian en la [Tabla 3](#).

1.30.1 Caracterización de la planta

Se hace uso de la herramienta “System Identification Toolbox” de MATLAB para ajustar un modelo de segundo orden con un cero. La función de transferencia se muestra en la [Figura 4](#).

Figura 52 Función de transferencia obtenida con Toolbox de MATLAB

```

Data/model Info: tf1
Model name: tf1
Color: [0.14902,0.54902,0.86667]

From input "0" to output "-":
    38.71
-----
s^2 + 11.9 s + 45.38

Name: tf1
Continuous-time identified transfer function.

Parameterization:
Number of poles: 2 Number of zeros: 0

Diary and Notes

% Details about Estimation Data
% Import mydata

% Transfer function estimation
Options = tfestOptions;
Options.Display = 'on';
Options.EnforceStability = true;

tf1 = tfest(mydata, 2, 0, Options)

```

Al momento de obtener el modelo, se obtiene un ajuste de 97,06%; La función de transferencia en lazo cerrado para un sistema con controlador $C(s)$ y planta $G(s)$ se modela como:

$$T(s)[1 + C(s)G(s)] = C(s)G(s) \quad (32)$$

$$T(s) + T(s)C(s)G(s) = C(s)G(s)$$

$$T(s) = C(s)G(s) - T(s)C(s)G(s)$$

$$G(s) = \frac{T(s)}{C(s) - T(s)C(s)} \quad (33)$$

Sustitución numérica.

Con un $K_p=1$ y la función $T(s)$ anterior se tiene:

$$G(s) = \frac{T(s)}{C(s)(1 - T(s))} \quad (34)$$

$$G(s) = \frac{\frac{38,71}{s^2 + 11,9s + 45,38}}{1 \left(1 - \frac{38,71}{s^2 + 11,9s + 45,38} \right)}$$

Esta es la función de transferencia de la planta identificada:

$$G(s) = \frac{38,71}{s^2 + 11,9s + 6,67}$$

La obtención de esta función de transferencia abre la posibilidad de estudiar el comportamiento de la planta en entornos de simulación como MATLAB/System Identification Toolbox. Esto permite analizar la respuesta del sistema frente a distintos tipos de controladores clásicos (P, PI, PD y PID), brindando así una herramienta educativa útil. Los estudiantes pueden

comparar los resultados obtenidos en las simulaciones con el comportamiento real de la planta, favoreciendo el entendimiento de las diferencias entre el modelo teórico y el sistema físico.

1.31 Explicación básica del control PID implementado

Cuando se emplea el controlador PID (Proporcional, Integral, Derivativo), se logra un ajuste más preciso y estable del ángulo del panel. Este controlador actúa en base a tres componentes:

-Kp (Proporcional): Ajusta la velocidad del motor según la magnitud del error (mientras más lejos esté de la posición deseada, más rápido se moverá). Ki (Integral): Acumula los errores pasados para eliminar desajustes constantes, Kd (Derivativo): Anticipa cambios rápidos para suavizar el movimiento y evitar oscilaciones.

El PID se actualiza en cada ciclo de lectura, generando una señal de control más estable, precisa y eficiente que un simple encendido/apagado.

1.32 Explicación básica del control ON/OFF implementado

El sistema también puede operar bajo una lógica de control ON/OFF, una estrategia de control más sencilla en comparación con el método PID. En este modo, la operación se basa en la diferencia de intensidad de luz detectada por las fotorresistencias (LDRs). Se define un umbral de error aceptable: si la diferencia entre los valores de iluminación medidos por las LDRs se encuentra dentro de ese rango, se considera que la orientación del panel es adecuada y el sistema permanece apagado. Por el contrario, si la diferencia excede el umbral establecido, los actuadores se activan para reorientar el panel solar en busca del punto de máxima iluminación. De este modo, el sistema corrige la posición del panel únicamente cuando detecta una desviación significativa respecto a la alineación óptima con la fuente de luz.

Nota: Si el umbral es muy bajo (por ejemplo, 0), el ángulo del panel fluctuará alrededor del setpoint, lo cual es característico de los controladores ON/OFF.

Instrucciones de uso

1.33 Paso a paso, para el uso del banco experimental:

Para utilizar correctamente el banco experimental de seguimiento solar, siga los siguientes pasos:

Conexión de los motores a la fuente de alimentación:

Asegúrese de conectar correctamente los motores del sistema a la fuente de energía que los alimentará. Verifique la polaridad y los niveles de voltaje adecuados.

Encendido de la fuente de alimentación:

Una vez realizadas las conexiones, proceda a encender la fuente de alimentación que energiza los motores.

Conexión del Arduino a la computadora:

Conecte la tarjeta Arduino a un puerto USB de la computadora utilizando el cable correspondiente.

Carga del código de control:

Desde el entorno de desarrollo Arduino (IDE), cargue el programa deseado en la tarjeta Arduino. Puede escoger entre dos opciones: Código de control PID ó Código de control ON/OFF.

Espere a que el proceso de carga finalice correctamente antes de continuar.

1.34 Prueba del sistema:

Existen dos maneras de poner a prueba el funcionamiento del banco experimental:

Exposición a la luz solar natural: Coloque el sistema en un lugar expuesto a la luz del sol. El panel solar comenzará a orientarse automáticamente hacia la dirección del mayor nivel de iluminación. Utilizando un multímetro a las salidas del panel solar, se podrá observar el aumento del voltaje generado conforme el sistema se orienta adecuadamente.

Simulación con linterna (ambiente controlado): Si se realiza la prueba en interiores o sin luz solar, apague las luces del entorno y utilice una linterna como fuente de luz artificial. Al mover la linterna alrededor del sistema, el panel debe girar siguiendo la dirección de la luz emitida.

Mantenimiento y seguridad.

1.35 Mantenimiento

Revisión periódica de conexiones eléctricas: Verifique que no existan cables sueltos, sulfatados o con aislamiento dañado. Asegúrese de que todos los conectores estén firmemente ajustados.

Limpieza del panel solar: Mantenga limpia la superficie del panel solar utilizando un paño suave y seco o ligeramente humedecido con agua limpia. No utilice productos abrasivos ni detergentes agresivos.

Inspección de los motores: Revise que los motores no presenten ruidos anormales ni obstrucciones.

Lubricación: Se recomienda lubricar las partes móviles del banco en caso de escuchar sonidos anormales ocasionados por fricción.

Protección contra el clima: Si el banco experimental se encuentra en exteriores, procure protegerlo contra lluvias, polvo excesivo o humedad que puedan dañar los componentes electrónicos.

1.36 Seguridad

Evite manipulaciones con el sistema energizado: Siempre desconecte la fuente de alimentación y el Arduino antes de realizar cualquier cambio o mantenimiento.

Supervisión durante la operación: Se recomienda supervisar el funcionamiento del sistema durante las pruebas para prevenir fallos inesperados o movimientos bruscos del mecanismo.

Uso adecuado de herramientas: Utilice únicamente herramientas aisladas y en buen estado para ajustes componentes eléctricos o mecánicos.

Solución de problemas comunes

Es importante establecer un protocolo para identificar las causas que impidan el funcionamiento del sistema. A continuación, se detallan los pasos a seguir en caso de falla:

1.37 El panel no gira al activar la estrategia de control

- Verificar que la fuente de alimentación esté correctamente conectada.
- Revisar que los puentes H estén encendidos.
- Revisar todas las conexiones eléctricas del sistema.

Si todo lo anterior está en orden y el panel aún no gira se recomienda desacoplar los motores del sistema (dejarlos libres) y alimentarlos directamente desde la fuente para comprobar que funcionan correctamente. Si ambos motores giran normalmente, proceder a revisar las lecturas de las fotorresistencias:

- Cargar el código “probar sensores”.
- Verificar las lecturas de cada sensor.
- Acercar una fuente de luz individualmente a cada fotorresistencia y observar si el error de lectura varía de forma coherente.

1.38 El panel emite rechinos durante el movimiento

- En caso de ruidos anormales o rechinos, aplicar grasa a las chumaceras.
- También es recomendable engrasar ligeramente las zonas de contacto entre engranajes para reducir la fricción y el desgaste.

Glosario

Ángulo de Incidencia: Ángulo formado entre el haz de radiación solar y la normal de la superficie del panel.

Control PID: Estrategia de control en lazo cerrado basada en la acción proporcional, integral y derivativa para ajustar la respuesta de un sistema.

Control ON/OFF: Estrategia básica de control que activa o desactiva un sistema según si la variable de proceso supera o cae por debajo de un valor de referencia.

Controlador: Dispositivo o sistema que ajusta las salidas del sistema para mantener una variable en un valor deseado.

Potenciómetro: Dispositivo que varía su resistencia de forma controlada y proporciona señales de voltaje proporcional a un desplazamiento mecánico.

Tasa de Captación: Relación de energía solar capturada por el panel respecto a la energía disponible.

Torque: Momento de fuerza que permite la rotación de un objeto alrededor de un eje.

Trayectoria Solar: Movimiento aparente del sol a lo largo del día, determinante para optimizar la orientación de los paneles solares

Códigos

Los códigos utilizados se presentan a continuación, acompañados de un pseudocódigo y una breve explicación para mayor comprensión de este.

1.39 Código para probar los motores.

```
// Pines para el Motor A

const int ENA = 6; // PWM

const int IN1 = 11;

const int IN2 = 10;

// Pines para el Motor B

const int ENB = 5; // PWM

const int IN3 = 9;

const int IN4 = 8;

// Variable global para controlar el PWM

int velocidadPWM = 170; // Valor entre 0 y 255

void setup() {

  // Configuración de pines como salida

  pinMode(ENA, OUTPUT);

  pinMode(IN1, OUTPUT);

  pinMode(IN2, OUTPUT);
```

```

pinMode(ENB, OUTPUT);

pinMode(IN3, OUTPUT);

pinMode(IN4, OUTPUT);
}

void loop() {

// -----

// Movimiento hacia adelante

// -----

digitalWrite(IN1, HIGH);

digitalWrite(IN2, LOW);

analogWrite(ENA, velocidadPWM);

digitalWrite(IN3, HIGH);

digitalWrite(IN4, LOW);

analogWrite(ENB, velocidadPWM);

}

```

1.39.1 Breve explicación del código “probar los motores”.

El programa “Prueba_Motor.ino” tiene como objetivo controlar dos motores DC utilizando dos puentes H, L298N. Para ello, se definen los pines de dirección y velocidad mediante constantes, se configuran estos pines como salidas en la función setup(), y en la función loop() establece una secuencia de señales que hace que ambos motores giren hacia adelante a una velocidad determinada mediante PWM.

1.40 Código para probar las fotorresistencias.

```
int sensorLuz1 = A0; // LDR 1 conectada a A0

int sensorLuz2 = A1; // LDR 2 conectada a A1

int valorLuz1 = 0;

int valorLuz2 = 0;

int diferencia = 0;

void setup() {

  Serial.begin(9600); // Iniciar comunicación serial

}

void loop() {

  // Leer ambos sensores

  valorLuz1 = analogRead(sensorLuz1); // Valor de 0 a 1023

  valorLuz2 = analogRead(sensorLuz2);

  // Calcular diferencia absoluta

  diferencia = valorLuz1 - valorLuz2;

  // Imprimir resultados en el Monitor Serial

  Serial.print("LDR1: ");

  Serial.print(valorLuz1);
```

```

Serial.print(" | LDR2: ");
Serial.print(valorLuz2);
Serial.print(" | Diferencia: ");
Serial.println(diferencia);

delay(500); // Esperar medio segundo
}

```

1.40.1 Breve explicación del código “probar las fotorresistencias”

Este programa compara la cantidad de luz captada por dos sensores LDR (resistencias que varían su valor según la luz). Los sensores están conectados a los pines analógicos A0 y A1.

En la función setup(), se inicia la comunicación serial con la computadora para visualizar los datos. Luego, dentro de la función loop(), se leen los valores analógicos de los dos sensores mediante analogRead(). Estos valores varían entre 0 y 1023.

Posteriormente, se calcula la diferencia entre ambos sensores y se muestra por el Monitor Serial usando funciones como Serial.print() y Serial.println(). Finalmente, se introduce una pausa de 500 milisegundos para que la lectura se actualice dos veces por segundo.

1.41 Código para probar el potenciómetro.

```

void setup() {
    // Inicia la comunicación serial a 9600 bits por segundo
    Serial.begin(9600);
}

```

```

void loop() {

  // Lee el valor del pin A0

  int sensorValue = analogRead(A5);

  // Convierte el valor leído (0-1023) a voltaje (0-5V)

  float voltage = sensorValue * (5.0 / 1023.0);

  // Imprime el voltaje en la ventana del monitor serial

  Serial.print("Voltaje en A0: ");

  Serial.print(voltage);

  Serial.println(" V");

  // Espera un segundo antes de leer de nuevo

  delay(100);

}

```

1.41.1 Breve explicación del código “probar el potenciómetro”

El programa “sensor_de_tension.ino” tiene como objetivo la lectura y visualización de una señal analógica de voltaje utilizando una placa Arduino. Para ello, se emplea el pin A5 configurado como entrada analógica, desde el cual se obtiene un valor digital comprendido entre 0 y 1023 mediante la función `analogRead()`. Este valor representa una proporción del voltaje de entrada en el rango de 0 a 5V, por lo que se realiza una conversión a voltaje real utilizando una expresión de regla de tres. Los resultados se envían al monitor serial a través del puerto USB utilizando la

función `Serial.print()`, lo que permite observar en tiempo real el comportamiento del voltaje medido, este proceso se repite cada 100 milisegundos, lo que proporciona una lectura continua.

1.42 Código control PID

```
// Pines de los Motores

const int ENA = 6;

const int IN1 = 11;

const int IN2 = 10;

const int ENB = 5;

const int IN3 = 8;

const int IN4 = 9;

// Pines LDR y sensor de voltaje

const int ldrPin1 = A0;

const int ldrPin2 = A1;

const int pinSensor = A5;

// Calibración para ángulo ↔ voltaje

const float anguloMin = 12.0;

const float anguloMax = 156.0;

const float voltajeMin = 1.86;

const float voltajeMax = 3.27;
```

```
// PID

float Kp = 4;

float Ki = 0.4;

float Kd = 0.7;

float error = 0, errorAnterior = 0, integral = 0;

float control = 0;

int pwmMax = 255;

// Temporización

unsigned long intervalo = 100;

unsigned long tiempoAnterior = 0;

void setup() {

  Serial.begin(115200);

  pinMode(ENA, OUTPUT); pinMode(IN1, OUTPUT); pinMode(IN2, OUTPUT);

  pinMode(ENB, OUTPUT); pinMode(IN3, OUTPUT); pinMode(IN4, OUTPUT);

  detenerMotores();

}

void loop() {

  unsigned long ahora = millis();

  if (ahora - tiempoAnterior >= intervalo) {

    tiempoAnterior = ahora;
```

```
// Leer LDRs y voltaje

int ldr1 = analogRead(ldrPin1);
int ldr2 = analogRead(ldrPin2);
error = ldr1 - ldr2;

int adc = analogRead(pinSensor);
float voltaje = adc * (5.0 / 1023.0);
float angulo = interpolarAngulo(voltaje);

// PID

float dt = intervalo / 1000.0;
integral += error * dt;
float derivada = (error - errorAnterior) / dt;
control = Kp * error + Ki * integral + Kd * derivada;
control = constrain(control, -pwmMax, pwmMax);
errorAnterior = error;

// Control
if (abs(control) < 40) {
    detenerMotores();
} else if (control > 0) {
    girarDerecha(control);
}
```

```

    } else {
        girarIzquierda(-control);
    }

    // Debug
    Serial.print("V: "); Serial.print(voltaje, 2);
    Serial.print(" | Angulo: "); Serial.print(angulo, 1);
    Serial.print(" | E: "); Serial.print(error);
    Serial.print(" | C: "); Serial.println(control, 1);
}
}

// --- Interpolación de voltaje a ángulo ---
float interpolarAngulo(float v) {
    v = constrain(v, voltajeMin, voltajeMax);
    return anguloMin + ((v - voltajeMin) * (anguloMax - anguloMin)) / (voltajeMax -
voltajeMin);
}

// --- Control de motores ---
void detenerMotores() {
    analogWrite(ENA, 0);
    analogWrite(ENB, 0);
}

```

```

}

void girarDerecha(int pwm) {
    digitalWrite(IN1, HIGH); digitalWrite(IN2, LOW);
    analogWrite(ENA, constrain(pwm, 0, pwmMax));
    digitalWrite(IN3, LOW); digitalWrite(IN4, HIGH);
    analogWrite(ENB, constrain(pwm, 0, pwmMax));
}

void girarIzquierda(int pwm) {
    digitalWrite(IN1, LOW); digitalWrite(IN2, HIGH);
    analogWrite(ENA, constrain(pwm, 0, pwmMax));
    digitalWrite(IN3, HIGH); digitalWrite(IN4, LOW);
    analogWrite(ENB, constrain(pwm, 0, pwmMax));
}

```

1.43 Breve explicación control PID.

Este programa implementa un sistema de control PID en una placa Arduino, utilizando dos sensores LDR conectados a los pines analógicos A0 y A1, y un sensor de voltaje conectado al pin A5. En la función `setup()`, se configuran los pines de salida para el control de los motores y se establece la comunicación serial para monitorear el comportamiento del sistema. En la función `loop()`, que se ejecuta periódicamente cada 100 milisegundos, se leen los valores de los sensores LDR mediante `analogRead()`, y se calcula la diferencia entre ellos, que representa el error del

sistema. A continuación, se lee el voltaje del sensor y se convierte a un valor angular utilizando una función de interpolación lineal.

Con el dato del error de las fotorresistencias, se aplica el control PID, cuyo resultado determina la velocidad y dirección de los motores. Estos se controlan a través de funciones que escriben señales PWM en los pines correspondientes. Finalmente, los valores de voltaje, ángulo, error y señal de control se muestran en el Monitor Serial para facilitar el análisis del sistema en tiempo real.

1.44 Código control ON/OFF.

```
// Pines de los Motores

const int ENA = 6;

const int IN1 = 11;

const int IN2 = 10;

const int ENB = 5;

const int IN3 = 8;

const int IN4 = 9;

// Pines LDR y sensor de voltaje

const int ldrPin1 = A0;

const int ldrPin2 = A1;

const int pinSensor = A5;

// Calibración para ángulo ↔ voltaje

const float anguloMin = 12.0;
```

```
const float anguloMax = 156.0;

const float voltajeMin = 1.86;

const float voltajeMax = 3.27;

// Control ON/OFF

int error = 0;

int umbral = 10; // Valor mínimo de error para activar los motores

int pwmON = 200; // Valor fijo de PWM para encender los motores

// Temporización

unsigned long intervalo = 100;

unsigned long tiempoAnterior = 0;

void setup() {

  Serial.begin(115200);

  pinMode(ENA, OUTPUT); pinMode(IN1, OUTPUT); pinMode(IN2, OUTPUT);

  pinMode(ENB, OUTPUT); pinMode(IN3, OUTPUT); pinMode(IN4, OUTPUT);

  detenerMotores();

}

void loop() {

  unsigned long ahora = millis();

  if (ahora - tiempoAnterior >= intervalo) {
```

```
tiempoAnterior = ahora;

// Leer LDRs y voltaje
int ldr1 = analogRead(ldrPin1);
int ldr2 = analogRead(ldrPin2);
error = ldr1 - ldr2;

int adc = analogRead(pinSensor);
float voltaje = adc * (5.0 / 1023.0);
float angulo = interpolarAngulo(voltaje);

// Control ON/OFF
if (abs(error) < umbral) {
    detenerMotores();
} else if (error > 0) {
    girarDerecha(pwmON);
} else {
    girarIzquierda(pwmON);
}

// Debug
Serial.print("V: "); Serial.print(voltaje, 2);
Serial.print(" | Angulo: "); Serial.print(angulo, 1);
```

```

    Serial.print(" | E: "); Serial.println(error);
}
}

// --- Interpolación de voltaje a ángulo ---
float interpolarAngulo(float v) {
    v = constrain(v, voltajeMin, voltajeMax);
    return anguloMin + ((v - voltajeMin) * (anguloMax - anguloMin)) / (voltajeMax -
voltajeMin);
}

// --- Control de motores ---
void detenerMotores() {
    analogWrite(ENA, 0);
    analogWrite(ENB, 0);
}

void girarDerecha(int pwm) {
    digitalWrite(IN1, HIGH); digitalWrite(IN2, LOW);
    analogWrite(ENA, constrain(pwm, 0, 255));
    digitalWrite(IN3, LOW); digitalWrite(IN4, HIGH);
    analogWrite(ENB, constrain(pwm, 0, 255));
}

```

```

void girarIzquierda(int pwm) {
    digitalWrite(IN1, LOW); digitalWrite(IN2, HIGH);
    analogWrite(ENA, constrain(pwm, 0, 255));
    digitalWrite(IN3, HIGH); digitalWrite(IN4, LOW);
    analogWrite(ENB, constrain(pwm, 0, 255));
}

```

1.44.1 Breve explicación control ON/OFF

Este programa implementa un sistema de control ON/OFF de motores que actúa con base en diferencias de luz ambiental captada por sensores LDR. Usa un sensor de voltaje para convertir la señal en un ángulo. La lógica ON/OFF toma decisiones simples según el umbral de error, activando el giro a la izquierda o derecha según corresponda. El sistema también incluye temporización y monitoreo serial para facilitar el análisis.

Tabla 16 Datos experimentales para caracterizar la planta

Tiempo [ms]	Error
0	-240
50	-231
101	-216
151	-190
201	-162
251	-136
301	-112
351	-91
401	-74
451	-60
501	-49
551	-43
601	-38
651	-36
701	-35

751	-34
801	-33
851	-31
901	-31
951	-29
1001	-28
1051	-32
1101	-28
1151	-31
1201	-27
1251	-27
1301	-26
1351	-26

Apendice J. Presupuesto

El costo total de los materiales del proyecto asciende a \$767.000 COP, valor que contempla únicamente los insumos físicos y componentes electrónicos requeridos para la construcción del banco experimental. Este valor no incluye la mano de obra ni el costo del diseño, los cuales se contabilizan de forma independiente. Por lo tanto, el presente monto corresponde exclusivamente al costo de materiales utilizados en el desarrollo del proyecto.

Tabla 17 Presupuesto para el proyecto

PRESUPUESTO DEL PROYECTO					
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER					
BANCO EXPERIMENTAL DIDÁCTICO PARA LA EVALUACIÓN DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE UN PANEL FOTOVOLTAICO EN FUNCIÓN DE SU ÁNGULO DE INCLINACIÓN CON SISTEMA DE CONTROL PROGRAMABLE					
					
Descripción	Financiación	Unidad	Cantidad	Costo por unidad (COP)	Total (COP)
Materiales					
Rollo PLA alta resistencia	Estudiante	unidad	1	70.000	\$ 70.000
Eje en acero inoxidable	Estudiante	unidad	1	60.000	\$ 60.000
Cubos en aluminio	Estudiante	unidad	1	40.000	\$ 40.000
Placa metálica 10×10×0,5 cm	Estudiante	unidad	1	2.000	\$ 2.000
Chumaceras tipo pedestal	Estudiante	unidad	2	50.000	\$ 100.000
Tornillería	Estudiante	unidad	4	12.500	\$ 50.000
Componentes electrónicos					
Arduino UNO	Estudiante	unidad	1	70.000	\$ 70.000
Panel solar policristalino 20W	Estudiante	unidad	1	80.000	\$ 80.000
Potenciómetro lineal	Estudiante	unidad	1	30.000	\$ 30.000
Fotoresistencias (LDR)	Estudiante	unidad	2	3.000	\$ 6.000
Juego de cables Dupont y conexión	Estudiante	set	1	15.000	\$ 15.000
Puente H (L298N)	Estudiante	unidad	2	18.000	\$ 36.000
Fabricación					
Manufactura ejes	Estudiante	unidad	4	20.000	\$ 80.000
Soldadura	UIS	unidad	4	7000	\$ 28.000
Costo parcial del proyecto					667.000
Imprevistos					\$ 100.000
Costo total					767.000

Apendice K. Planos

ANTES DE INICIAR LA PRODUCCION POR FAVOR LEER DETENIDAMENTE EL PLANO. CUALQUIER DUDA COMUNICARLA

TORNO:

PROGRAMA:

CODIGO:





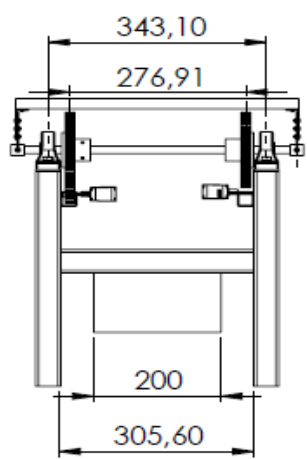
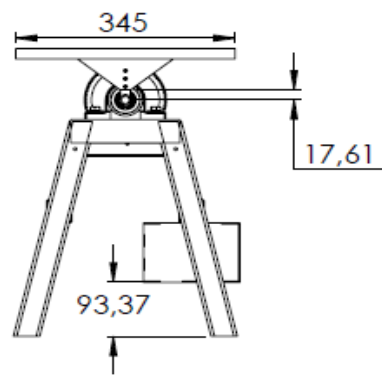
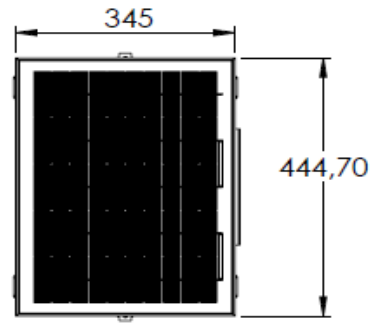


NOMBRE PARTE: proyecto		CLIENTE:	MÁQUINA/PROYECTO: SEGUIDOR SOLAR		CODIGO PLANO:			
MATERIAL:		COMENTARIO:	TRATAMIENTO TERMICO:	DUREZA:	REF. PIEZA: XX	ORDEN DISEÑO: XX		
DISEÑO: CAMILO CHAPARRO Y JOSE SUAREZ	REVISÓ: ING. YENNIFER YULIANA RIOS	APROBÓ: ING. CARLOS AMARIS	ESCALA: 1:10	CANTIDAD: 1	FECHA DIBUJO: 30/05/2025	FECHA FABRICADO: 30/05/2025	HOJA: 1	DE: 15

UBICACION: C:\Users\UM\INGENIERIA 2\Documents\CAMILO\ CODIGO:FO-025/REV.2

ANTES DE INICIAR LA PRODUCCION POR FAVOR LEER DETENIDAMENTE EL PLANO. CUALQUIER DUDA COMUNICARLA

TORNO:
 PROGRAMA:
 CODIGO:



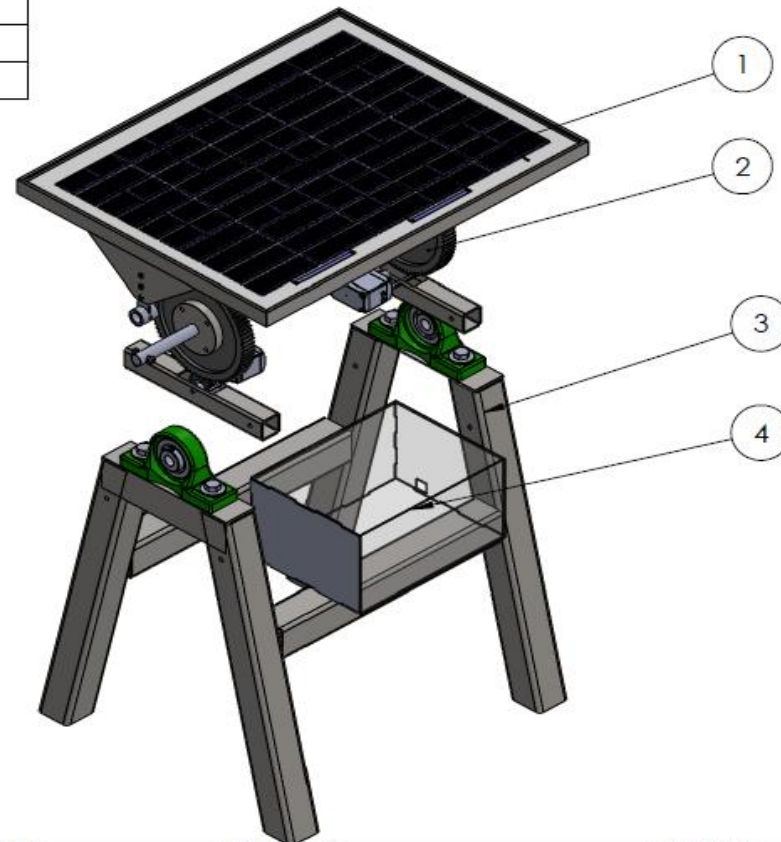
NOMBRE PARTE: proyecto		CLIENTE:		MÁQUINA/PROYECTO: SEGUIDOR SOLAR		CODIGO PLANO:	
MATERIAL:		COMENTARIO:		TRATAMIENTO TERMICO:		DUREZA:	
REF. PIEZA: XX		ORDEN DISEÑO: XX		HOJA: 2		DE: 15	
DISEÑO CAMILO CHAPARRO Y JOSE SUAREZ	REVISÓ ING. YENNIFER YULIANA RIOS	APROBÓ ING. CARLOS AMARIS	ESCALA: 1:10	CANTIDAD: 1	FECHA DIBUJO: 30/05/2025	FECHA FABRICADO: 30/05/2025	CODIGO: 025/REV.2

UBICACION: C:\Users\JM\INGENIERIA 2\Documents\CAMLO\

ANTES DE INICIAR LA PRODUCCION POR FAVOR LEER DETENIDAMENTE EL PLANO. CUALQUIER DUDA COMUNICARLA

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	Sub-ensamblaje Panel	1
2	Sub-ensamblaje transmision	1
3	Sub-ensamblaje Bastidor	1
4	Sub-ensamblaje electronica	2

TORNO: _____
 PROGRAMA: _____
 CODIGO: _____



NOMBRE PARTE: proyecto		CLIENTE:	MÁQUINA/PROYECTO: SEGUIDOR SOLAR		CODIGO PLANO:	
MATERIAL:	COMENTARIO:	TRATAMIENTO TERMICO:	DUREZA:	REF. PIEZA: XX	ORDEN DISEÑO: XX	
DISEÑO: CAMILO CHAPARRO Y JOSE SUAREZ	REVISÓ: ING. YENIFER YULIANA RIOS	APROBÓ: ING. CARLOS AMARIS	ESCALA: 1:10	CANTIDAD: 1	FECHA DIBUJO: 30/05/2025	FECHA FABRICADO: 30/05/2025
UBICACION: C:\Users\JM\INGENIERIA 2\Documents\CAMILO\				HOJA: 3	DE: 15	

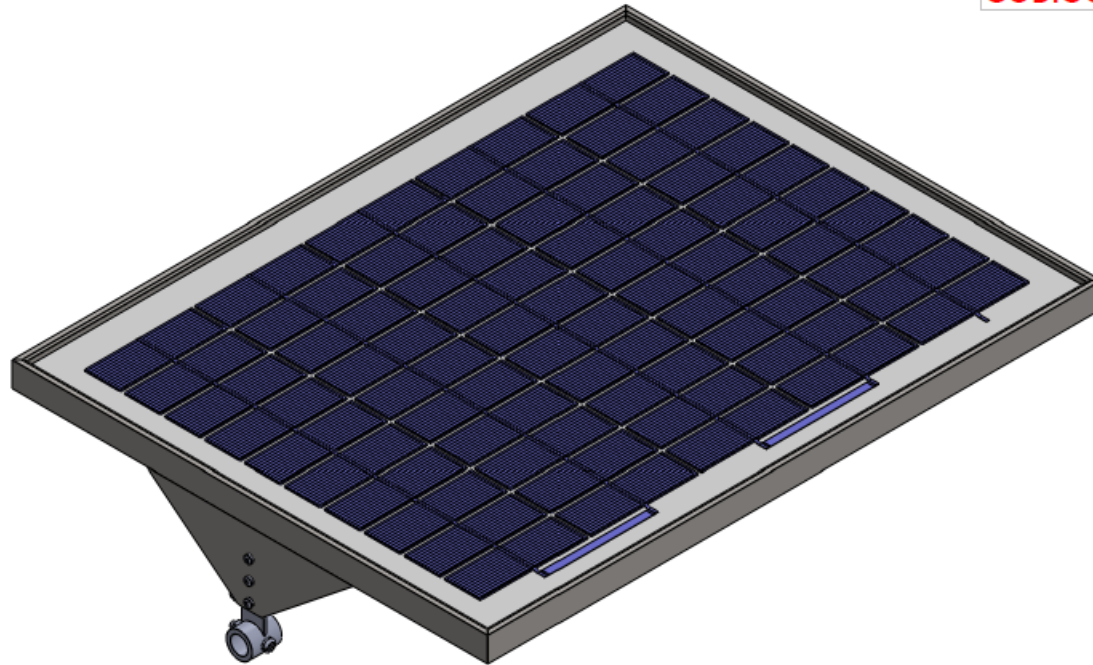
COIG-025/REV.2

ANTES DE INICIAR LA PRODUCCION POR FAVOR LEER DETENIDAMENTE EL PLANO. CUALQUIER DUDA COMUNICARLA

TORNO:

PROGRAMA:

CODIGO:

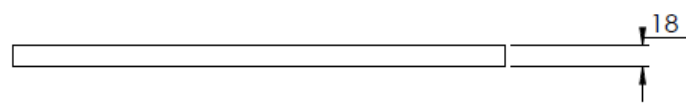
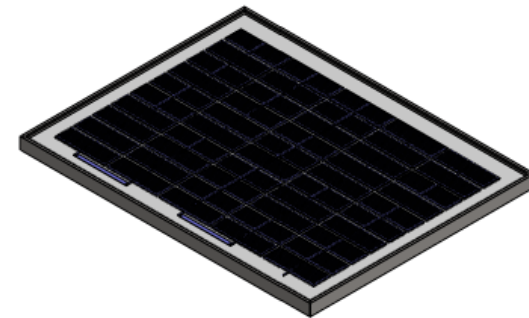
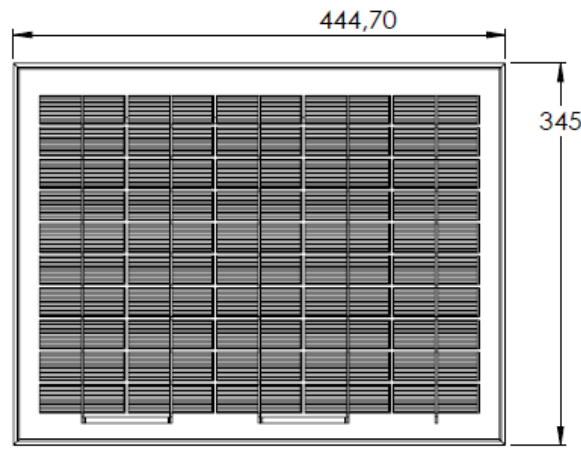


DISEÑO CAMILO CHAPARRO Y JOSE SUAREZ		REVISÓ ING. YENIFER YULIANA RIOS		APROBÓ ING. CARLOS AMARIS		ESCALA: 1:10	CANTIDAD: 1	FECHA DIBUJO: 30/05/2025	FECHA FABRICADO: 30/05/2025	HOJA: 4	DE: 15
NOMBRE PARTE: proyecto			CLIENTE:	MÁQUINA/PROYECTO SEGUIDOR SOLAR			CODIGO PLANO:		REF. PIEZA: XX	ORDEN DISEÑO: XX	
MATERIAL:			COMENTARIO:	TRATAMIENTO TERMICO:		DUREZA:			CODIGOFO-025/REV.2		

UBICACION: C:\Users\JM\INGENIERIA 2\Documents\CAMILLO\

ANTES DE INICIAR LA PRODUCCION POR FAVOR LEER DETENIDAMENTE EL PLANO. CUALQUIER DUDA COMUNICARLA

TORNO:
 PROGRAMA:
 CODIGO:

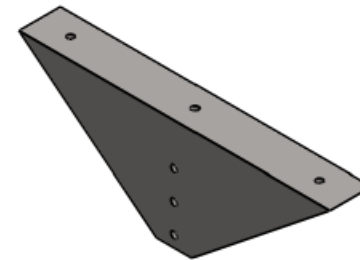
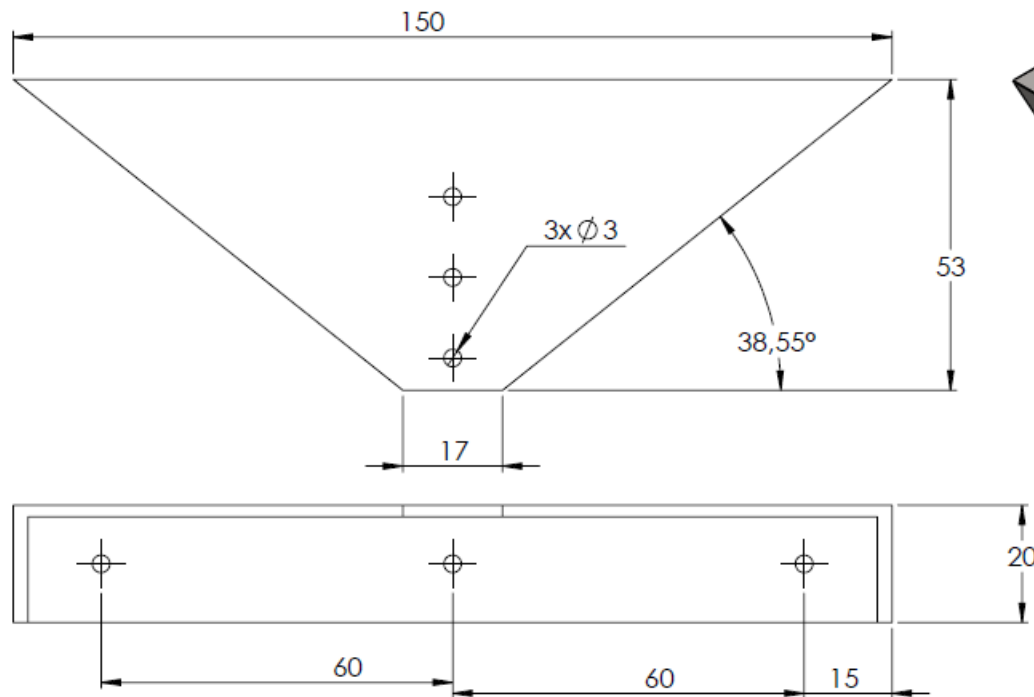


NOMBRE PARTE: PANEL SOLAR		CLIENTE:	MÁQUINA/PROYECTO: SEGUIDOR SOLAR		CODIGO PLANO:	
MATERIAL:		COMENTARIO:		TRATAMIENTO TERMICO:	DUREZA:	REF. PIEZA: XX
APROBÓ: ING. CARLOS AMARIS		ESCALA: 1:10	CANTIDAD: 1	FECHA DIBUJO: 30/05/2025	FECHA FABRICADO: 30/05/2025	ORDEN DISEÑO: XX
DISEÑO: CAMILO CHAPARRO Y JOSE SUAREZ		REVISÓ: ING. YENNIFER YULIANA RIOS		HOJA: 5	DE: 15	CODIGO: 050-025/REV.2

UBICACION: C:\Users\JM\INGENIERIA 2\Download\

ANTES DE INICIAR LA PRODUCCION POR FAVOR LEER DETENIDAMENTE EL PLANO. CUALQUIER DUDA COMUNICARLA

TORNO:	
PROGRAMA:	
CODIGO:	



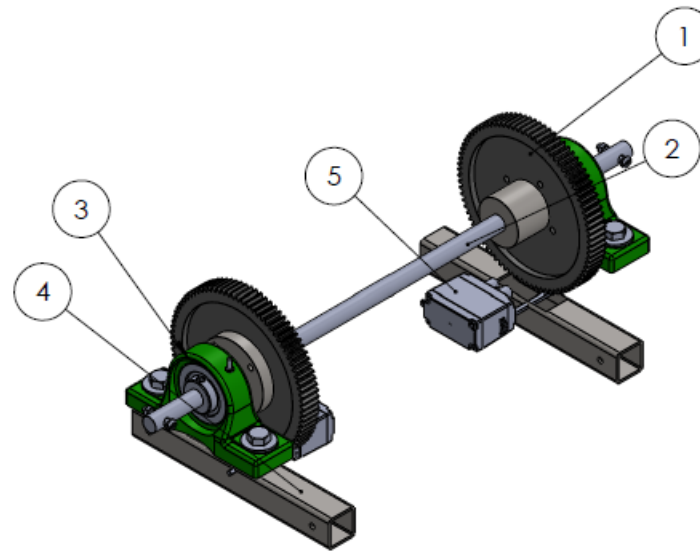
NOMBRE PARTE: pieza_triangular		CLIENTE:	MÁQUINA/PROYECTO:		CODIGO PLANO:	
MATERIAL:	COMENTARIO:	TRATAMIENTO TERMICO:	DUREZA:	REF. PIEZA: XX	ORDEN DISEÑO: XX	
DISEÑO: CAMILO CHAPARRO Y JOSE SUAREZ	REVISO: ING. YENINIFER YULIANA RIOS	APROBÓ: ING. CARLOS AMARIS	ESCALA: 1:10	CANTIDAD: 1	FECHA DIBUJO: 30/05/2025	FECHA FABRICADO: 30/05/2025
UBICACION: C:\Users\JM\INGENIERIA 2\Downloads\				HOJA: 6	DE: 15	

CODIGO:FO-025/REV.2

ANTES DE INICIAR LA PRODUCCION POR FAVOR LEER DETENIDAMENTE EL PLANO. CUALQUIER DUDA COMUNICARLA

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	Engranaje	2
2	Eje	1
3	Chumacera	2
4	Tubería cuadrada C3	2
5	Motores	2

TORNO: _____
 PROGRAMA: _____
 CODIGO: _____



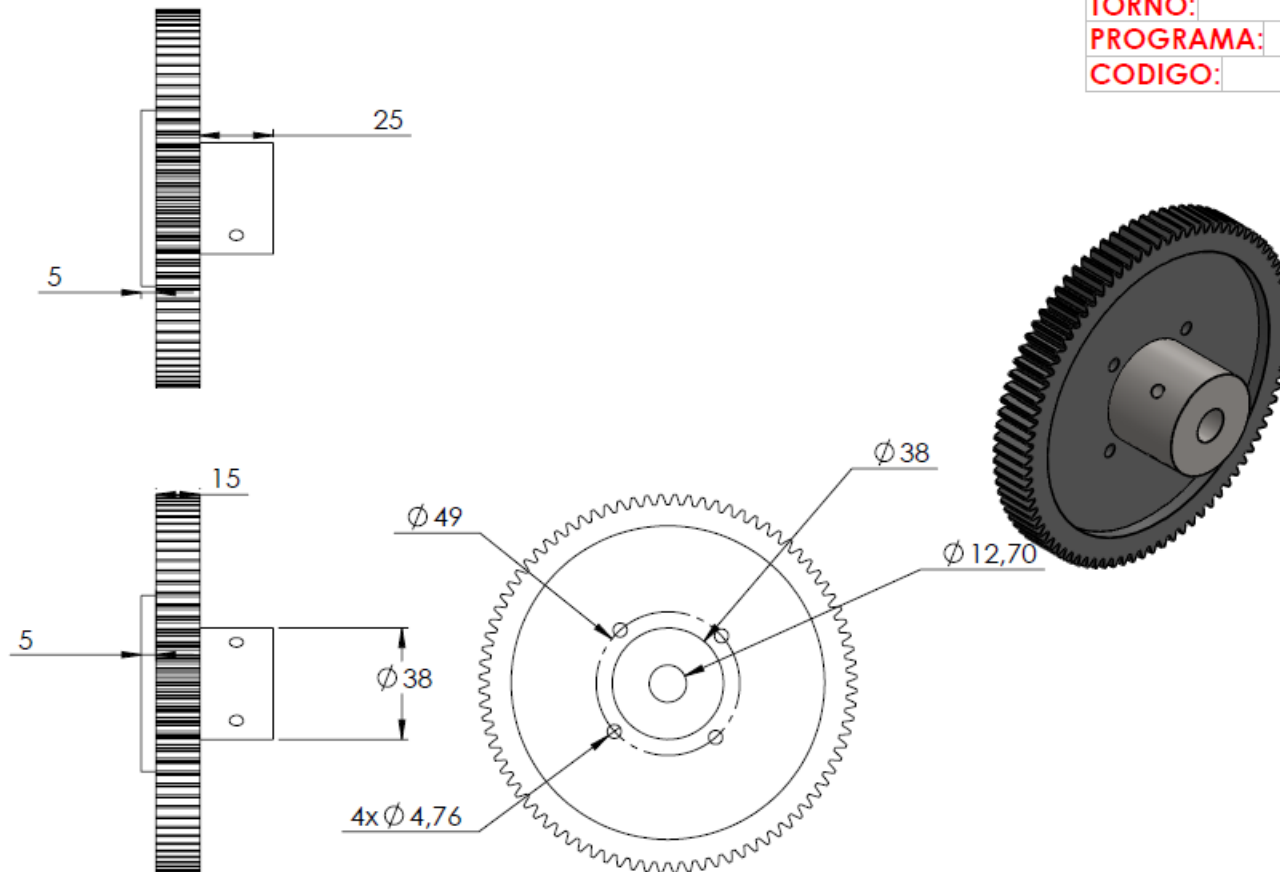
NOMBRE PARTE: proyecto		CLIENTE:	MÁQUINA/PROYECTO: SEGUIDOR SOLAR		CODIGO PLANO:	
MATERIAL:		COMENTARIO:	TRATAMIENTO TERMICO:	DUREZA:	REF. PIEZA: XX	ORDEN DISEÑO: XX
DISEÑO: CAMILO CHAPARRO Y JOSE SUAREZ	REVISÓ: ING. YENIFER YULIANA RIOS	APROBÓ: ING. CARLOS AMARIS	ESCALA: 1:10	CANTIDAD: 1	FECHA DIBUJO: 30/05/2025	FECHA FABRICADO: 30/05/2025
					HOJA: 7	DE: 15

UBICACION: C:\Users\JM\INGENIERIA 2\Documents\CAMLO\

CODIGO: 05/REV.2

ANTES DE INICIAR LA PRODUCCION POR FAVOR LEER DETENIDAMENTE EL PLANO. CUALQUIER DUDA COMUNICARLA

TORNO:
 PROGRAMA:
 CODIGO:



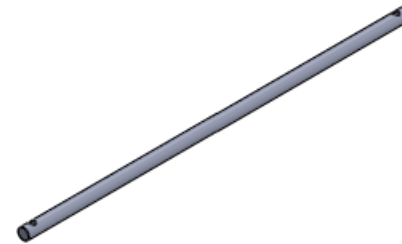
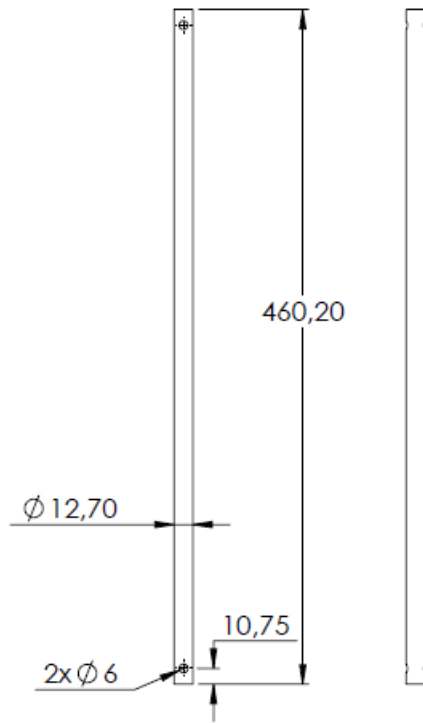
NOMBRE PARTE: ensamblaje de prueba		CLIENTE:	MÁQUINA/PROYECTO SEGUIDOR SOLAR		CODIGO PLANO:	
MATERIAL:		COMENTARIO:		TRATAMIENTO TERMICO:	DUREZA:	REF. PIEZA: XX
ORDEN DISEÑO: XX		DISEÑO: CAMILO CHAPARRO Y JOSE SUAREZ		FECHA DIBUJO: 30/05/2025	FECHA FABRICADO: 30/05/2025	HOJA: 8
REVISÓ: ING. YENNIFER YULIANA RIOS		AFROBÓ: ING. CARLOS AMARIS		ESCALA: 1:10	CANTIDAD: 1	DE: 15

UBICACION: C:\User\JM INGENIERIA 2\Download\

CODIGO:FO-025/REV.2

ANTES DE INICIAR LA PRODUCCION POR FAVOR LEER DETENIDAMENTE EL PLANO. CUALQUIER DUDA COMUNICARLA

TORNO:	
PROGRAMA:	
CODIGO:	



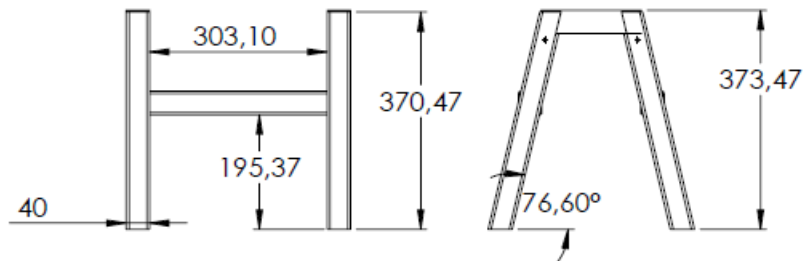
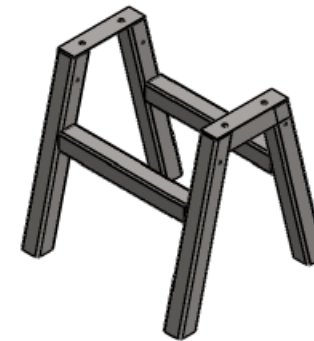
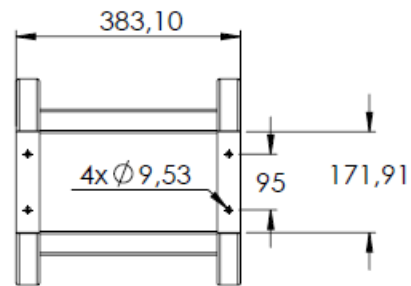
NOMBRE PARTE: EJE		CLIENTE:	MÁQUINA/PROYECTO: SEGUIDOR SOLAR		CODIGO PLANO:			
MATERIAL: Material <sin especificar>		COMENTARIO:	TRATAMIENTO TERMICO: N.A.	DUREZA: N.A.	REF. PIEZA: XX	ORDEN DISEÑO: XX		
DISEÑO: CAMILO CHAPARRO Y JOSE SUAREZ	REVISÓ: ING. YENNIFER YULIANA RIOS	APROBO: ING. CARLOS AMARIS	ESCALA: 1:10	CANTIDAD: 1	FECHA DIBUJO: 30/05/2025	FECHA FABRICADO: 30/05/2025	HOJA: 9	DE: 15

UBICACION: C:\Users\JM\INGENIERIA 2\Downloads\

CODIGO: 05/REV.2

ANTES DE INICIAR LA PRODUCCION POR FAVOR LEER DETENIDAMENTE EL PLANO. CUALQUIER DUDA COMUNICARLA

TORNO:
 PROGRAMA:
 CODIGO:



NOMBRE PARTE: bastidor		CLIENTE:	MÁQUINA/PROYECTO: SEGUIDOR SOLAR		CODIGO PLANO:	
MATERIAL: AISI 1020		COMENTARIO:	TRATAMIENTO TERMICO: N.A.	DUREZA: N.A.	REF. PIEZA: XX	ORDEN DISEÑO: XX
DISEÑO: CAMILO CHAPARRO Y JOSE SUAREZ	REVISÓ: ING. YENNIFER YULIANA RIOS	APROBÓ: ING. CARLOS AMARIS	ESCALA: 1:10	CANTIDAD: 1	FECHA DIBUJO: 30/05/2025	FECHA FABRICADO: 30/05/2025
					HOJA: 10	DE: 15

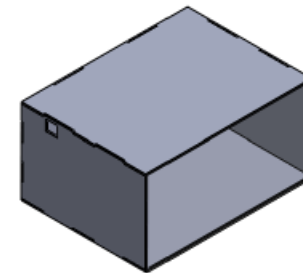
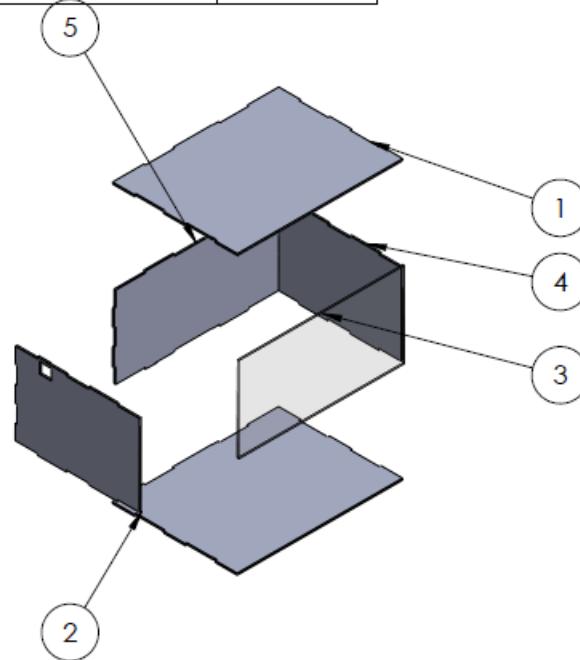
UBICACION: C:\Users\JM\INGENIERIA 2\Download\

CODIGO: 010-025/REV.2

ANTES DE INICIAR LA PRODUCCION POR FAVOR LEER DETENIDAMENTE EL PLANO. CUALQUIER DUDA COMUNICARLA

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	tapa_1	2
2	tapa_frontal	1
3	tapa	1
4	TAPA_FRONTAL_2	1
5	tapa_lateral	1

TORNO:	
PROGRAMA:	
CODIGO:	



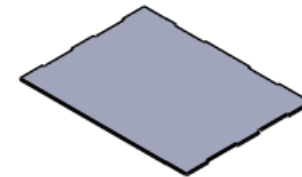
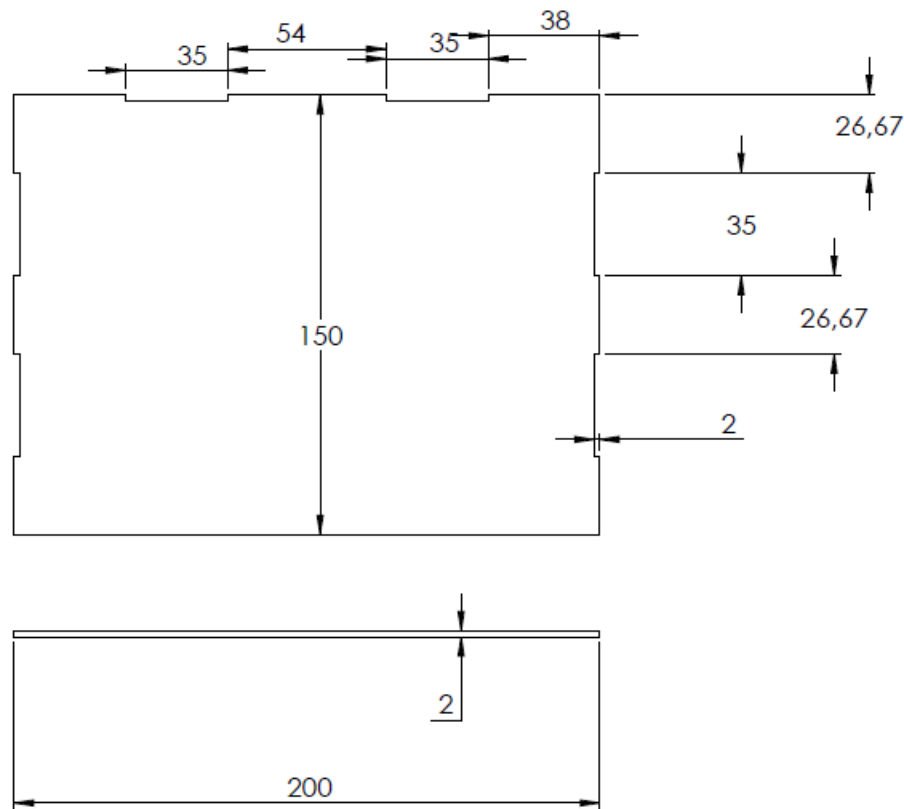
NOMBRE PARTE: ensamblaje_caja		CLIENTE:	MÁQUINA/PROYECTO:		CODIGO PLANO:			
MATERIAL:	COMENTARIO:	TRATAMIENTO TERMICO:	DUREZA:	REF. PIEZA: XX	ORDEN DISEÑO: XX			
DISEÑO: CAMILO CHAPARRO Y JOSE SUAREZ	REVISÓ: ING. YENIFER YULIANA RIOS	APROBÓ: ING. CARLOS AMARIS	ESCALA: 1:10	CANTIDAD: 1	FECHA DIBUJO: 30/05/2025	FECHA FABRICADO: 30/05/2025	HOJA: 11	DE: 15

UBICACION: C:\Users\JM\INGENIERIA 2\Downloads\

CODIGO: 05/REV.2

ANTES DE INICIAR LA PRODUCCION POR FAVOR LEER DETENIDAMENTE EL PLANO. CUALQUIER DUDA COMUNICARLA

TORNO:	
PROGRAMA:	
CODIGO:	



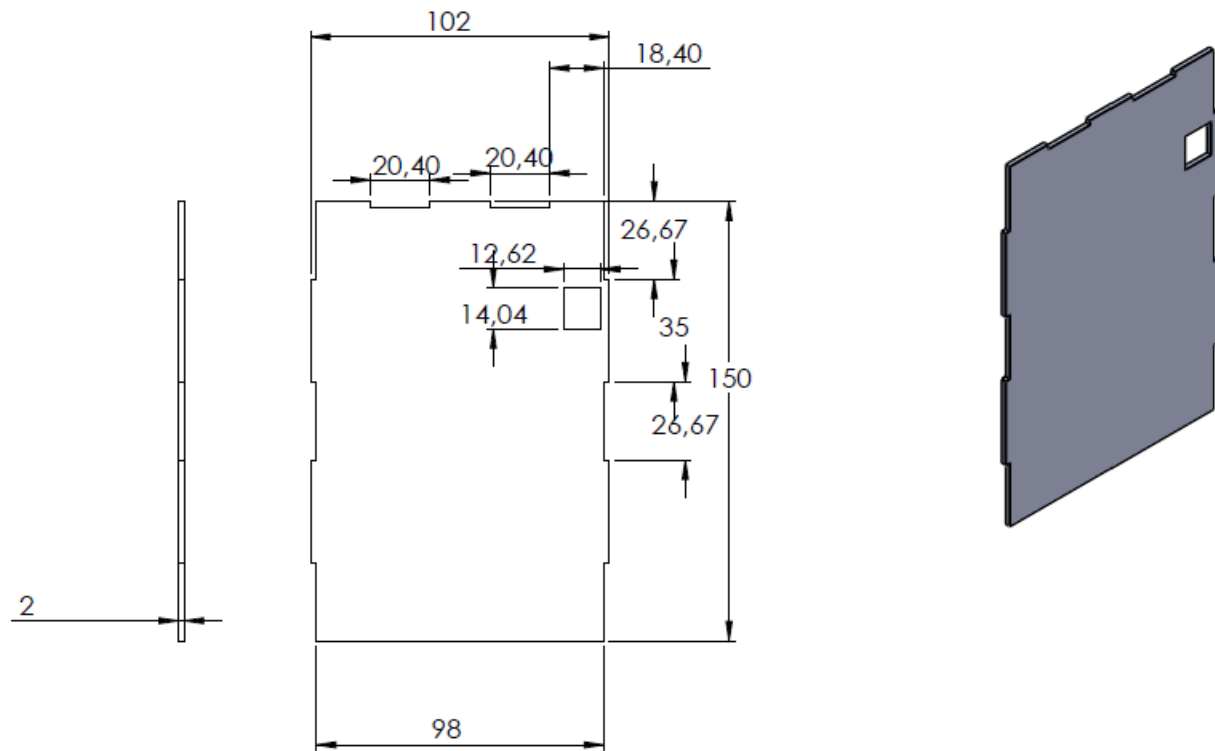
DISEÑO CAMILO CHAPARRO Y JOSE SUAREZ		REVISÓ ING. YENIFER YULIANA RIOS		APROBÓ ING. CARLOS AMARIS		ESCALA: 1:10	CANTIDAD: 1	FECHA DIBUJO: 30/05/2025	FECHA FABRICADO: 30/05/2025	HOJA: 12	DE: 15
---	--	-------------------------------------	--	------------------------------	--	-----------------	----------------	-----------------------------	--------------------------------	-------------	-----------

UBICACION: C:\Users\JM\INGENIERIA 2\Downloads\

CODIGO: 025/REV.2

ANTES DE INICIAR LA PRODUCCION POR FAVOR LEER DETENIDAMENTE EL PLANO. CUALQUIER DUDA COMUNICARLA

TORNO:
PROGRAMA:
CODIGO:



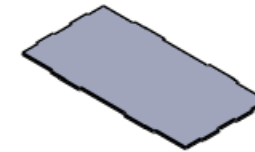
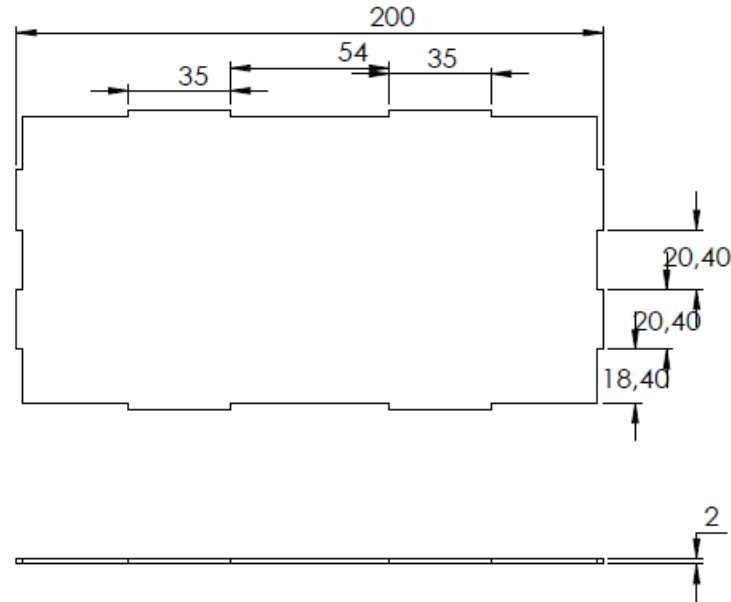
NOMBRE PARTE: tapa_frontend		CLIENTE:	MÁQUINA/PROYECTO SEGUIDOR SOLAR		CODIGO PLANO:	
MATERIAL: Material <sin especificar>		COMENTARIO:	TRATAMIENTO TERMICO:	DUREZA:	REF. PIEZA: XX	ORDEN DISEÑO: XX
DISEÑO CAMILO CHAPARRO Y JOSE SUAREZ	REVISO ING. YENIFER YULIANA RIOS	APROBÓ ING. CARLOS AMARIS	ESCALA: 1:10	CANTIDAD: 1	FECHA DIBUJO: 30/05/2025	FECHA FABRICADO: 30/05/2025
					HOJA: 13	DE: 15

UBICACION: C:\Users\JM\INGENIERIA 2\Downloads\

CODIGO: 010-025/REV.2

ANTES DE INICIAR LA PRODUCCION POR FAVOR LEER DETENIDAMENTE EL PLANO. CUALQUIER DUDA COMUNICARLA

TORNO:	
PROGRAMA:	
CODIGO:	



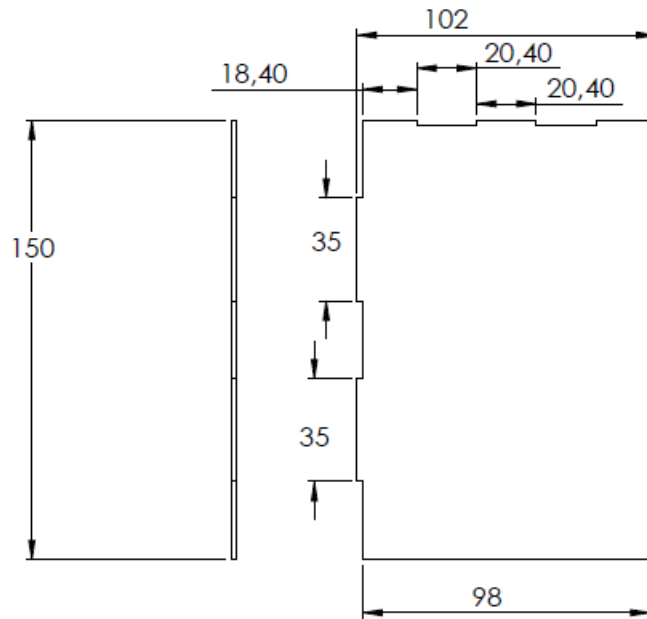
NOMBRE PARTE: tapa_lateral		CLIENTE:	MÁQUINA/PROYECTO: SEGUIDOR SOLAR		CODIGO PLANO:	
MATERIAL: Material <sin especificar>		COMENTARIO:	TRATAMIENTO TERMICO:	DUREZA:	REF. PIEZA: XX	ORDEN DISEÑO: XX
DISEÑO: CAMILO CHAPARRO Y JOSE SUAREZ	REVISO: ING. YENNIFER YULIANA RIOS	APROBO: ING. CARLOS AMARIS	ESCALA: 1:10	CANTIDAD: 1	FECHA DIBUJO: 30/05/2025	FECHA FABRICADO: 30/05/2025
					HOJA: 14	DE: 15

UBICACION: C:\User\JM\INGENIERIA 2\Downloads\

COIGGOF0-025/REV.2

ANTES DE INICIAR LA PRODUCCION POR FAVOR LEER DETENIDAMENTE EL PLANO. CUALQUIER DUDA COMUNICARLA

TORNO:	
PROGRAMA:	
CODIGO:	



NOMBRE PARTE: TAPA_FRONTAL_2		CLIENTE:	MÁQUINA/PROYECTO SEGUIDOR SOLAR		CODIGO PLANO:			
MATERIAL: Material <sin especificar>		COMENTARIO:		TRATAMIENTO TERMICO:	DUREZA:	REF. PIEZA: XX	ORDEN DISEÑO: XX	
DISEÑO CAMILO CHAPARRO Y JOSE SUAREZ	REVISÓ ING. YENNIFER YULIANA RIOS	APROBÓ ING. CARLOS AMARIS	ESCALA: 1:10	CANTIDAD: 1	FECHA DIBUJO: 30/05/2025	FECHA FABRICADO: 30/05/2025	HOJA: 15	DE: 15

UBICACION: C:\Users\JM\INGENIERIA 2\Downloads\

CCDGOFO-025/REV.2