DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE SISTEMA DE CONTROL DE SEGUIMIENTO SOLAR PARA CELDAS FOTOVOLTAICAS

JAMES GUILLERMO PEREZ MARTINEZ

JOSE LUIS VASQUEZ LARRAHONDO

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA COMFACAUCA – UNICOMFACAUCA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

INGENIERÍA MECATRÓNICA

POPAYÁN – CAUCA

2023

DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE SISTEMA DE CONTROL DE SEGUIMIENTO SOLAR PARA CELDAS FOTOVOLTAICAS

JAMES GUILLERMO PEREZ MARTINEZ

JOSE LUIS VASQUEZ LARRAHONDO

PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO MECATRÓNICO

DIRECTOR:

M.Sc. SAÚL EDUARDO RUIZ SARZOSA

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA COMFACAUCA – UNICOMFACAUCA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

INGENIERÍA MECATRÓNICA

POPAYÁN – CAUCA

2023

Página de aceptación

_____

_____

_____

_____

_____

_____

DEDICATORIA

Dedico este trabajo principalmente a Dios, quien nos dio la vida y nos permitió llegar a este momento tan importante en nuestra formación profesional.

A nuestros padres, cuyo amor incondicional y apoyo inquebrantable han sido el pilar fundamental en nuestra vida. Su sacrificio y dedicación nos han permitido llegar hasta aquí, y estamos eternamente agradecidos por todo lo que han hecho por nosotros.

A nuestros profesores, por su tiempo, por su apoyo, así como por la sabiduría que nos transmitieron en el desarrollo de mi formación profesional.

finalmente, a nuestros amigos y familiares que nos brindaron su amistad, apoyo y aliento durante este proceso. sus palabras de aliento, críticas constructivas y confianza nos impulsaron a superar obstáculos y alcanzar nuestro objetivo.

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo Gracias a Dios por permitirnos culminar nuestra carrera profesional, por permitirnos vivir experiencias maravillosas en el proceso, el más profundo agradecimiento a nuestro tutor Saúl Eduardo Ruiz Sarzosa por su paciencia, su sabiduría y apoyo, Gracias también, a nuestros padres y demás familiares por brindarnos todo su apoyo para lograr esta meta y ser nuestra motivación para levantarnos de las dificultades, finalmente y no menos importante Gracias a nuestros compañeros, colegas y amigos que nos han acompañado durante este tiempo, por su apoyo tiempo y disposición para formar un equipo dispuesto siempre a la ayuda y a no abandonar a nadie en el proceso.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN **11**
INTRODUCCIÓN **12**
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA **14**
JUSTIFICACIÓN **18**
OBJETIVOS **21**
METODOLOGÍA **22**
- Fase 1: Requerimientos 23
- Fase 2: Diseño de sistemas 23
- Fase 3: Dominio específico del diseño 23
- Fase 4: Modelado y análisis del modelo 23
- Fase 5: Integración del sistema 24
- Fase 6: Validación y verificación 24
- Fase 7: Producto 24

CAPÍTULO I **25**
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA 25
1.1 RADIACIÓN SOLAR 25
1.2 ENERGÍA SOLAR 25
1.3 SISTEMAS DE CAPTACIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR 26
1.4 EFECTO FOTOVOLTAICO 27
1.5 CELDA FOTOVOLTAICA 28
1.6 SISTEMAS DE SEGUIMIENTO SOLAR 30
1.7 CARTA SOLAR 32
1.8 SISTEMA DE CONTROL 33
CONTROL LAZO ABIERTO 34
CONTROL LAZO CERRADO 35
1.9 TRABAJOS REALIZADOS 36
CAPÍTULO II **41**
DISEÑO DEL SISTEMA **41**
2.1. MODELADO DE LA GEOMETRÍA DEL DISEÑO 42
2.2. DISEÑO CAD DEL PROTOTIPO INICIAL 44
2.3. MEJORAS EN EL DISEÑO 45
2.4. ANÁLISIS DE FUERZAS ESTRUCTURAL 50
2.5. COMPOSICIÓN ELECTRÓNICA 57
2.5.1. ARDUINO MEGA 2560 58
2.5.2. MOTOR NEMA 17 59

2.5.3. CONTROLADOR A4988 61
2.6. VARIABLES DE CONTROL 63
2.6.1. ÁNGULOS DE POSICIONAMIENTO: 64
2.6.2. CÁLCULO DEL TIEMPO SOLAR (LST): 66
2.6.3. ÁNGULO HORARIO Y DECLINACIÓN: 67
CAPÍTULO III **70**
3.1. CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA MECÁNICA DEL SISTEMA 70
3.2. TRANSMISIÓN POR CADENA 75
3.3. ESQUEMA DE CONEXIÓN 83
3.4. CONSTRUCCIÓN CIRCUITO ELECTRÓNICO 85
3.5. CONTROL DEL SISTEMA 88
3.5.1. OBTENCIÓN FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA 90
3.5.2. CONTROL RST 95
3.5.3. REALIZACIÓN CANÓNICA 98
3.6. INTEGRACIÓN DE SISTEMA DE CONTROL EN ARDUINO: 101
CAPÍTULO IV **104**
VALIDACIÓN DEL PROTOTIPO **104**
4.1. FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO 104
4.2. PROTOTIPO FUNCIONAL: 107
CONCLUSIONES **121**
TRABAJOS FUTUROS **123**
REFERENCIAS **124**

TABLA DE FIGURAS

Figura 1 Mapa de brillo solar mediante convención de colores del promedio multianual del mes de julio 19
Figura 2 metodología V-Shape 22
Figura 3 Sistema de control en lazo abierto 34
Figura 4 Sistema de control en lazo abierto 35
Figura 5 Boceto inicial del prototipo 43
Figura 6 Boceto inicial piezas del prototipo 44
Figura 7 Diseño del prototipo inicial 45
Figura 8 Modelo CAD del prototipo parte frontal 46
Figura 9 Modelo CAD del prototipo parte trasera 46
Figura 10 Modelo CAD base de la estructura del prototipo 47
Figura 11 Modelo CAD base de la estructura del prototipo 47
Figura 12 Modelo CAD varilla de soporte 48
Figura 13 Modelo CAD del pasador 48
Figura 14 Modelo CAD del pasador 49
Figura 15 Diseño 3D: La base cardinal 51
Figura 16 Diseño 3D: Cuerpo de tres pilares 51
Figura 17 Diseño 3D: Marco para el módulo. 52
Figura 18 Diseño 3D: Estructura ensamblada 53
Figura 19 Foto de la masa del panel registrado 54
Figura 20 Tensión de Von Mises 55
Figura 21 Acercamiento a la zona de pandeo 56
Figura 22 Desplazamientos estructurales 56
Figura 23 FDS 57
Figura 24 Arduino mega 2560 58
Figura 25 Motor nema 17 60
Figura 26 Controlador A4988 61
Figura 27 Orientación del observador 66
Figura 28 Base del prototipo del sistema 71
Figura 29 Pilares estructura del sistema 72
Figura 30 Estructura del sistema con soportes 73
Figura 33 Estructura con base segundo eje 74
Figura 34 Estructura con base segundo eje 74
Figura 35 Sistema de transmisión de cadena 76
Figura 36 Creación base sujeción de motor 78
Figura 37 Creación base sujeción de motor 78

Figura 38 Base primer eje con trasmisión de cadena 79
Figura 39 Diseño CAD Platina para base segundo eje del sistema 80
Figura 40 Creación parales segundo eje 80
Figura 41 Implementación parales segundo eje 81
Figura 42 Base segundo eje con trasmisión de cadena 81
Figura 43 Fase 2 del prototipo 82
Figura 44 Conexión motor nema 17 y CNC shield v3 83
Figura 45 conexión motor nema 17, CNC shield v3 y brújula hmc5883 85
Figura 46 Circuito electrónico en fritzing y máscara de componentes 86
Figura 47 Circuito electrónico con método del tóner transfer 87
Figura 48 circuito electrónico en fritzing y máscara de componentes 88
Figura 49 Representación Control en lazo abierto 89
Figura 50 Representación Control en lazo cerrado 89
Figura 51 Importación de datos adquiridos 91
Figura 52 Obtención de FDT en tiempo continuo 92
Figura 53 Respuesta del sistema con un setpoint de 180 grados y fit de estimación 92
Figura 54 Simulación de la planta 94
Figura 55 Simulación en Matlab PID Tuner 96
Figura 56 Gráfico polinomios R S T 99
Figura 57 gráfico sistema de control 102
Figura 58 Diagrama de sistema de control 103
Figura 59 Código de control en simulink 105
Figura 60 señal de bloques 106
Figura 61 Señal de PID y RST superpuesta vista con zoom. 107
Figura 62 Comparación de plataforma Sunearthtools y resultado de algoritmos en arduino. 108
Figura 63 Estructura en posición de reposo 109
Figura 64 estructura posicionada: Elevación=75.67°, Azimut= 225.29° 110
Figura 65 Sistema de seguimiento 111
Figura 66 Toma de temperatura 111
Figura 67 Gráfica eficiencia vs temperatura panel en posición fija 114
Figura 68 Gráfica eficiencia vs temperatura panel de 2 ejes de movimiento 116

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 CARACTERÍSTICAS ARDUINO MEGA 2560 59
Tabla 2 CARACTERÍSTICAS MOTOR NEMA 17 FUENTE: CREACIÓN PROPIA 60
Tabla 3 CARACTERÍSTICAS CONTROLADOR A4988 62
Tabla 4 CARACTERÍSTICAS PANEL SOLAR UTILIZADO 111
Tabla 5 PRUEBAS DEL DÍA EN SISTEMA FOTOVOLTAICO FIJO 113
Tabla 6 PRUEBA DEL DÍA EN SISTEMA FOTOVOLTAICO DE 2 EJES DE MOVIMIENTO 115
Tabla 7 PRUEBAS EN SISTEMA FOTOVOLTAICO FIJO 117
Tabla 8 PRUEBAS EN SISTEMA FOTOVOLTAICO DE 2 EJES DE MOVIMIENTO 117

RESUMEN

El presente trabajo presenta el desarrollo de un prototipo de sistema de control de seguimiento solar para celdas fotovoltaicas en la ciudad de Popayán - Cauca, basado en la metodología de Diseño Mecatrónico V-Shape, con la cual se logró identificar, en primer lugar, los requerimientos de diseño, se obtuvo el modelado mecánico del prototipo, también se estimó el número de grados de libertad del sistema y posteriormente, en la etapa de implementación, se creó -con base en el diseño obtenido en el modelado CAD- un prototipo integrado al control automático, necesario para el correcto seguimiento solar. Para determinar la viabilidad de la implementación de esta tecnología en las condiciones climáticas de la ciudad de Popayán, se llevaron a cabo pruebas en diferentes ambientes controlados. Se ha validado el sistema de control de seguimiento solar con un nivel de fiabilidad en el posicionamiento del 99%. Finalmente, el sistema propuesto ha logrado un 10.2% adicional de captación de energía respecto a un sistema fotovoltaico convencional o estático, lo que lo hace más eficiente a nivel energético.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, el cambio climático y los efectos que lo acompañan representan una problemática de alcance global que trasciende los límites geográficos y temporales. Esta preocupante situación se manifiesta de manera tangible a través de una profunda crisis ambiental que afecta diversos ecosistemas y sistemas naturales en todo el mundo. Esta crisis tiene su origen en una serie de interacciones complejas, pero gran parte de la responsabilidad se atribuye a la emisión excesiva de gases de efecto invernadero, que está íntimamente ligada al consumo y dependencia de combustibles fósiles, tales como el carbón, el petróleo y el gas natural. (Andrade-Castañeda et al., 2017)

A través de los diferentes estudios sobre los efectos del cambio climático en el planeta, los expertos coinciden en que la inacción será más costosa a nivel económica, social y ambientalmente a largo plazo. Por eso, los gobiernos de los principales países industrializados y en desarrollo han introducido diversas estrategias para hacer frente a este fenómeno. Nuevamente, el impacto de este fenómeno no puede ser sesgado ni regionalizado, ya que un aumento de la temperatura en cualquier parte del planeta afecta el equilibrio climático de todo el planeta. (Maiti & Bidinger, 2009)

Esta problemática no solo es una amenaza global para el medio ambiente si no que sus efectos también son reflejados en la economía, ya que la generación energética juega un papel importante en el desarrollo de cada país. (Álvarez Espinosa et al., 2015) Por esta razón la generación a partir de fuentes renovables ataca este problema ambiental, ya que a diferencia de los combustibles fósiles, no generan emisiones significativas de gases de efecto invernadero ni otros contaminantes atmosféricos durante su proceso de generación y uso, además da paso para diversificar la matriz energética en Colombia, aprovechando el gran potencial del país para implementar nuevas formas de generación energética debido a sus abundantes recursos naturales, su experiencia en generación hidroeléctrica, su

interés en la sostenibilidad ambiental y la posibilidad de ampliar la variedad de fuentes energéticas. (Foladori & Tommasino, 2012)

Abordar esta crisis ambiental requiere un enfoque integral que involucre a gobiernos, industrias, comunidades y ciudadanos. La transición hacia fuentes de energía renovable y sostenible, la adopción de prácticas de conservación y la promoción de estilos de vida más respetuosos con el medio ambiente son esenciales para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mitigar los impactos del cambio climático. Además, la investigación científica, la cooperación internacional y la sensibilización pública desempeñan un papel crucial en la búsqueda de soluciones duraderas para esta desafiante problemática global.

Esta investigación pretende desarrollar un prototipo que mejore la eficiencia de los paneles solares mediante un sistema con control de seguimiento solar biaxial para celdas fotovoltaicas, impulsando a su vez, el uso de estas tecnologías en regiones como el Cauca.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El sol es considerado una fuente inagotable de energía, así se le ha descrito gracias al proceso de fusión nuclear que se produce en su interior, el mismo que lleva proporcionándoles a los seres humanos energía calórica durante 6.000 millones de años y que se estima que seguirá produciendo durante otros 8.000 millones de años más (Editorial Elearning, 2015). Ahora bien, durante un año, el sol emite sobre la tierra cuatro mil veces la energía que se consume a nivel global. Emite continuamente una potencia de 62.600 kilowatts (kilovatios) por cada metro cuadrado de su superficie. En un periodo de tan sólo dos días, el planeta recibe una cantidad de energía equivalente a todas las reservas probadas que existen de petróleo, gas y carbón, mismos causantes de grandes cambios climáticos en el planeta, como lo son el efecto invernadero, la precipitación ácida y el adelgazamiento de la capa de ozono. (Buitrago, 2005). Cada día que pasa la demanda de energía eléctrica aumenta por diferentes factores, como es el alto consumo que generan las industrias sus procesos productivos y el aumento de la población lo que se traduce en un alto consumo de energía. (Ipa & Di, 2017) Por estas razones es necesario fomentar el uso de energías renovables.

Aprovechar al máximo el sol como fuente de energía limpia para producir electricidad es una de las maneras de fomentar el uso de energías renovables, avanzar hacia una sociedad más sostenible y reducir la dependencia de los combustibles fósiles; esto puede lograrse gracias a la tecnología del efecto fotoeléctrico. Con la ayuda de algunos semiconductores (comúnmente silicio), los cuales captan parte de la radiación solar incidente, se puede convertir esta radiación en energía eléctrica de corriente directa. (Granda-Gutiérrez et al., 2013). A partir de este principio se crean los sistemas fotovoltaicos, compuesto por una unidad fundamental conocida como celda solar. Utilizando un conjunto determinado de estas celdas y conectando en serie-paralelo sobre una base metálica encapsulada por un aislante térmico, se obtiene lo que hoy se conoce como panel solar. Sin embargo, estos paneles han demostrado tener baja eficiencia en su rendimiento, lo

que ha llevado a diferentes investigaciones para desarrollar diferentes técnicas y diversos materiales, pasando así de una eficiencia de 16% en 1960 a una cercana a 35% en 2012, basados en entornos de laboratorio simulados bajo condiciones controladas de iluminación y temperatura. Estos valores representan el potencial máximo de conversión de energía de las celdas fotovoltaicas en condiciones ideales. Sin embargo, en condiciones del mundo real, las celdas fotovoltaicas pueden experimentar una serie de factores que afectan su eficiencia, como la variabilidad climática, la calidad del material, la degradación con el tiempo y las pérdidas de energía durante la conversión y el transporte. (Salamanca Céspedes, 2013).

Estos registros de bajo consumo han llevado a algunos investigadores a buscar alternativas para mejorar el aprovechamiento e implementar medidas que generen una mayor eficiencia de recolección energética en estos paneles. Algunas investigaciones han demostrado que el grado de inclinación en la que se posicione el panel influye en su rendimiento, En Arequipa, (Perú) la UTP (Universidad Tecnológica de Perú) realizó un estudio sobre la influencia de la inclinación angular en la eficiencia energética en paneles solares (Quispe et al., 2020), donde utilizando varios paneles en distintas inclinaciones pudieron tomar registro de la producción de cada panel durante un periodo de un año, con este método lograron conocer los meses de mayor radiación, en los que influyen el tiempo estacionario, condiciones climáticas y por supuesto, el grado de inclinación con mayor eficiencia en diferentes momentos del año. Por lo que se concluye que, posicionar el panel en un correcto ángulo de inclinación en cierto instante de tiempo es crucial, ya que, al otorgarle maniobrabilidad al sistema, le permite una relación directa con la captación del espectro solar y de este modo reducir pérdidas.

Colombia cuenta con una ubicación geográfica privilegiada que le otorga un alto potencial solar, con diferentes regiones que ofrecen niveles de radiación solar adecuados para la generación de energía solar. (Pinzón, 2016) El Plan Nacional de Desarrollo establece objetivos de energía renovable y eficiencia energética. Además, se han llevado a cabo subastas de energía para la adquisición de

proyectos de energías renovables, incluyendo proyectos solares. (Pereira-Blanco, 2016) En los últimos años, se han desarrollado varios proyectos solares a gran escala en Colombia, incluyendo parques solares y plantas fotovoltaicas que generan electricidad para alimentar la red eléctrica nacional. Además de los proyectos a gran escala, la generación solar distribuida ha ganado popularidad en Colombia, con hogares, empresas y entidades gubernamentales instalando sistemas solares en techos y terrenos para generar su propia electricidad. La regulación colombiana permite el autoconsumo de energía solar, lo que significa que los usuarios pueden instalar sistemas solares para satisfacer parte o la totalidad de sus necesidades energéticas (Cano, 2016) sin embargo, existen desafíos en la implementación de paneles solares en Colombia, como la falta de infraestructura de transmisión adecuada en algunas regiones y cuestiones financieras que afectan la inversión en proyectos solares, además, hay que tener claro que la adopción de paneles solares contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y al impulso hacia un sistema energético más sostenible. Por otro lado, la inversión en energías renovables puede generar empleo y oportunidades económicas en las comunidades locales. A medida que la tecnología avanza y las barreras se reducen, es probable que la energía solar siga desempeñando un papel importante en la transición energética del país.

Popayán, al igual que muchas otras ciudades en Colombia, también ha estado experimentando avances en la implementación de sistemas que aprovechen la energía solar y otras fuentes de energías renovables. Aunque puede que no esté a la vanguardia en comparación con áreas urbanas más grandes, hay varios aspectos que vale la pena considerar: Conciencia y Educación, Proyectos de Generación Distribuida y Desafíos y Oportunidades (Mukrimaa et al., 2016). Popayán puede estar en una etapa inicial en comparación con áreas más urbanizadas, teniendo en cuenta que se implementan sistemas fotovoltaicos estáticos, generalmente sobre los techos de las industrias, por lo tanto, la adopción de energía solar y la promoción de fuentes de energías renovables son aspectos que están ganando importancia en la ciudad; la educación, la participación comunitaria y las políticas favorables pueden contribuir a un mayor crecimiento en este campo en el futuro.

Por lo tanto, este trabajo busca generar una alternativa basada en la siguiente pregunta de investigación:

¿Qué efecto tiene el ángulo de inclinación en la eficiencia de recolección de energía en los paneles solares y cómo se puede optimizar su ubicación para aprovechar al máximo la radiación solar en la ciudad de Popayán?

JUSTIFICACIÓN

En los últimos años han surgido dos grandes preocupaciones de gobierno y sociedad: la lucha contra el cambio climático y la búsqueda de otras formas de obtención de energías renovables. Esta problemática no solo es una amenaza global para el medio ambiente si no que sus efectos también son reflejados en la economía, ya que la generación energética juega un papel importante en el desarrollo de cada país. Por esta razón la generación a partir de fuentes renovables ataca este problema ambiental y da paso para diversificar la matriz energética.

Colombia es un país que contiene una gran variedad de recursos naturales, eso lo ha hecho tener fuerza en energías limpias, su mayor generación energética corresponde principalmente a hidroeléctricas, sin embargo, según Alejandro Lucio, director ejecutivo de SER en 2017 (la Asociación de Energías Renovables de Colombia), Colombia tiene un potencial en materia de energía de viento y sol de talla mundial y que por esto es necesario enmarcar nuevos proyectos que impulsen tecnologías no convencionales como la solar y eólica. Ahora bien, abrir paso generando interés para que estos agentes no convencionales entren a competir en el sistema no es fácil, para eso es necesario que proyectos se realicen y que a su vez generen impacto. Si se habla de energía fotovoltaica, por ejemplo, es preciso que haya más investigación para impulsar su desarrollo, no solo en su tecnología de celdas sino también en búsqueda de métodos complementarios que mejoren su aprovechamiento.

De acuerdo con información del IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales), el territorio colombiano tiene un promedio anual de brillo solar de siete a nueve horas por día. Popayán cuenta con promedios de entre 4 a 7 horas de sol al día (de 4 a 5 en enero, de 6 a 7 en julio y de 4 a 5 en diciembre) lo que le da a Colombia y a esta región en particular altas posibilidades de crecimiento para las energías renovables.

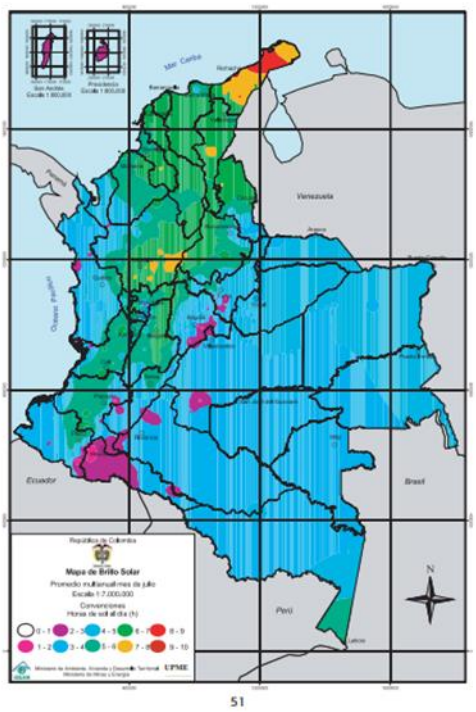


Figura 1 Mapa de brillo solar mediante convención de colores del promedio multianual del mes de julio

(IDEAM & UPME, 2005)

Esta problemática es considerada un gran medidor de progreso y bienestar, por lo que significa un gran avance implementar nuevas alternativas de obtención energética de manera limpia, segura y amigable con el planeta.

Es por eso que se tiene en cuenta la creación de un prototipo de un sistema de seguimiento solar ya que es una estructura móvil que une el panel solar con el suelo. Donde su función es maximizar la producción de electricidad de la instalación solar fotovoltaica, ya que optimiza el ángulo con el que los paneles reciben la radiación solar. Donde estos pueden estar controlados por distintas tecnologías como lo es por medio de algoritmos de predicción que no requiere de sensores que indiquen cual es el punto más luminoso. El seguimiento en este caso depende únicamente de una serie de ecuaciones que predicen la ubicación del Sol en cualquier momento. (Toranzo et al., 2015)

Hablar de la necesidad del cauca (zona mayormente rural, de difícil acceso para las redes eléctricas domiciliarias), específicamente en Popayán, de encontrar otras

fuentes de energía teniendo en cuenta que pagamos una de las más caras del país (CEO).

En el Cauca existen diversas zonas en las cuales el fluido eléctrico convencional no existe debido a que son zonas alejadas y de difícil acceso y a su vez poco pobladas lo cual para las empresas no genera rentabilidad dotarlos con el fluido eléctrico debido al alto costo de inversión para que llegue a todas las zonas

OBJETIVOS

Objetivo general

Desarrollar un prototipo de sistema de control de seguimiento solar para celdas fotovoltaicas basado en un algoritmo de predicción que determine la posición del sol.

Objetivos Específicos.

- Diseñar un prototipo de sistema de seguimiento solar eficiente y funcional que aporte al rendimiento de celdas fotovoltaicas mediante la orientación precisa hacia la posición óptima del sol a lo largo del día.
- Implementar el prototipo de sistema de control de seguimiento solar, acoplado con celdas fotovoltaicas.
- Validar la precisión, confiabilidad e impacto real del prototipo con sistema de control de seguimiento solar en conjunto con las celdas fotovoltaicas, en términos de eficiencia energética, por medio de pruebas en diferentes condiciones ambientales.

METODOLOGÍA

El desarrollo de este proyecto está enmarcado en el área de la investigación aplicada dentro de la metodología de diseño mecatrónico V-Shape (Gausemeier & Moehringer, 2003). Esta metodología es ampliamente utilizada en ingeniería y desarrollo de productos y se basa en una estructura en forma de "V" que representa las fases del proyecto y cómo se relacionan entre sí. Las fases están divididas en dos ramas principales: la rama izquierda representa el proceso de desarrollo descendente, mientras que la rama derecha representa la validación ascendente.

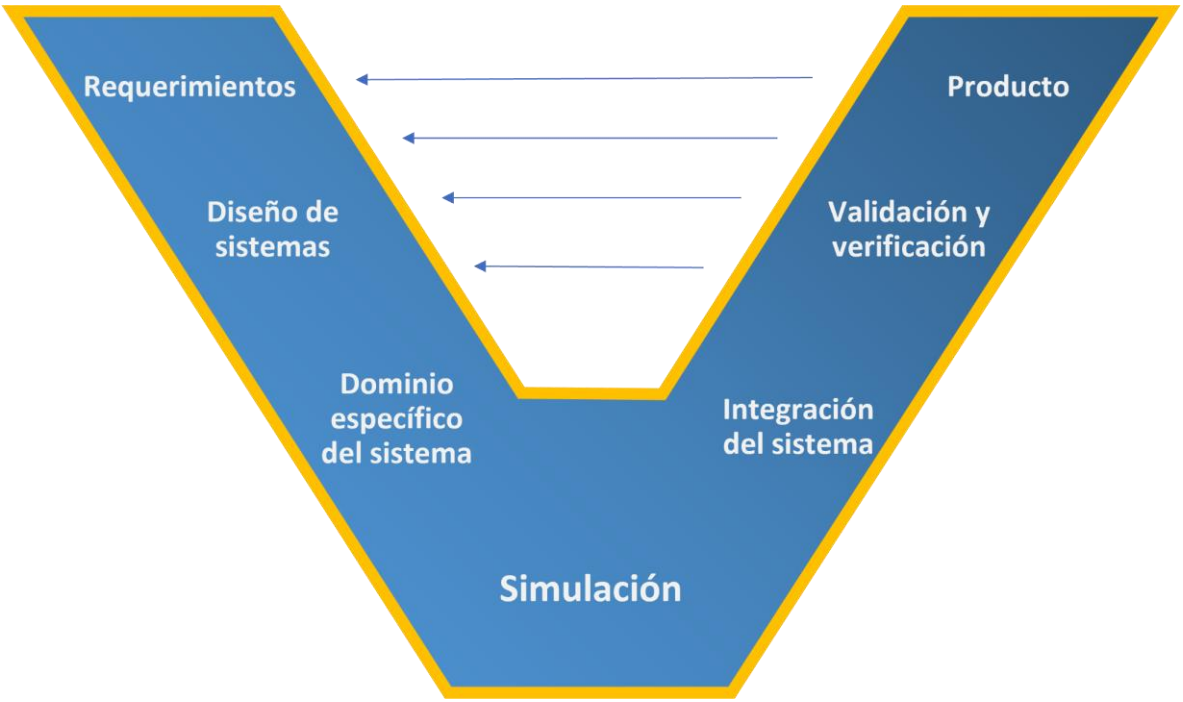


Figura 2 metodología V-Shape (Gausemeier & Moehringer, 2003)

Creación propia

A continuación, se describe cada una de las fases de la metodología con el fin de dar cumplimiento a los objetivos propuestos.

- Fase 1: Requerimientos

En esta fase, se establecen los requisitos del proyecto basados en los objetivos, el estado del arte y el problema planteado. Estos requisitos actúan como guía para el desarrollo del producto y se listan a continuación

1. El sistema debe realizar el seguimiento solar en al menos un eje.
2. Capacidad de carga mínima del sistema: 20 Kg
3. Factor de seguridad de 1.5

- Fase 2: Diseño de sistemas

En esta etapa, se realiza el diseño mecánico de la estructura y el diseño del sistema de control de seguimiento solar. Se proponen estrategias para cumplir con los requisitos establecidos.

1. Diseño mecánico de la estructura que permite el movimiento de seguimiento solar.
2. Estrategias propuestas para el sistema de control de seguimiento solar.
3. Documentación de los diseños preliminares y su relación con los requisitos.

- Fase 3: Dominio específico del diseño

Esta fase implica el diseño electromecánico del sistema, combinado con el desarrollo del control para el seguimiento solar.

Datos específicos:

1. Diseño detallado de componentes electromecánicos.
2. Desarrollo del control para el sistema de seguimiento solar.
3. Integración de los aspectos eléctricos y mecánicos del diseño.

- Fase 4: Modelado y análisis del modelo

En esta etapa, se realiza el análisis de las piezas del prototipo utilizando el software SolidWorks para el análisis de las piezas

- Fase 5: Integración del sistema

Aquí se lleva a cabo la integración de los componentes mecánicos, electrónicos y de programación para construir el prototipo final.

1. Proceso de ensamblaje y conexión de los componentes.
2. Desarrollo de interfaces entre los sistemas mecánicos y electrónicos.
3. Documentación de la construcción del prototipo.

- Fase 6: Validación y verificación

En esta fase, se realiza la validación del prototipo y la verificación de que cumple con los requisitos establecidos. Se toman datos para análisis haciendo uso de los conocimientos adquiridos

- Fase 7: Producto

CAPÍTULO I

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

En este capítulo se consigna información necesaria para abordar de la mejor manera todos los conceptos relacionados con el desarrollo del proyecto

1.1 RADIACIÓN SOLAR

La radiación solar es la energía emitida por el Sol, que se propaga en todas las direcciones a través del espacio mediante ondas electromagnéticas. Esa energía es el motor que determina la dinámica de los procesos atmosféricos y el clima. La energía procedente del Sol es radiación electromagnética proporcionada por las reacciones del hidrógeno en el núcleo del Sol por fusión nuclear y emitida por la superficie solar.

El Sol emite energía en forma de radiación de onda corta. Después de pasar por la atmósfera, donde sufre un proceso de debilitamiento por la difusión, reflexión en las nubes y de absorción por las moléculas de gases (como el ozono y el vapor de agua) y por partículas en suspensión, la radiación solar alcanza la superficie terrestre oceánica y continental que la refleja o la absorbe. La cantidad de radiación absorbida por la superficie es devuelta en dirección al espacio exterior en forma de radiación de onda larga, con lo cual se transmite calor a la atmósfera. (Phan et al., 2018)

1.2 ENERGÍA SOLAR

La energía solar es aquella que se obtiene de la radiación solar que llega a la Tierra en forma de luz, calor o rayos ultravioleta. Es un tipo de energía limpia y renovable, pues su fuente, el Sol, es un recurso ilimitado. (*Energía solar (Qué es, Concepto y Definición Significados.com*, s.f.)

Para transformar la energía solar en energía eléctrica, la radiación electromagnética que proviene del Sol es recolectada por distintos medios (colectores térmicos, células fotovoltaicas, etc.).

La energía solar puede aprovecharse de dos maneras: mediante la conversión térmica, que consiste en transformar la energía solar en energía térmica, y la conversión fotovoltaica, en la cual se emplean paneles solares para recolectar la energía luminosa y convertirla en eléctrica.

1.3 SISTEMAS DE CAPTACIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR

La energía solar presenta dos características específicas muy importantes que la diferencian de las fuentes energéticas convencionales las cuales son dispersión e intermitencia.

1.3.1. DISPERSIÓN

La energía solar es una forma de energía que presenta gran dispersión, ya que su densidad, en condiciones muy favorables, difícilmente alcanza 1 kW/m2, valor que queda muy por debajo de las densidades con las que se trabaja usualmente en ingeniería. Esto significa que para obtener densidades energéticas elevadas se necesitan, o bien grandes superficies de captación, o sistemas de concentración de los rayos solares

1.3.2. INTERMITENCIA

Por otro lado, otra característica específica de la energía solar es su intermitencia. Esto hace que, a la par que se desarrollan instalaciones captadoras de energía, es necesario investigar los correspondientes sistemas de almacenamiento de la energía captada. Todo ello lleva a un replanteamiento en el aprovechamiento y

distribución de la energía totalmente distinto al que hoy se considera clásico, requiriendo la consideración de estas dificultades intrínsecas (cuya solución está ligada a cada aplicación concreta) un esfuerzo de desarrollo elevado. Así pues, el primer paso para el aprovechamiento de la energía solar es su captación, aspecto dentro del que se pueden distinguir dos sistemas de características muy distintas que son los sistemas pasivos y los sistemas activos.

1.3.2.1. Sistemas pasivos

Son aquéllos que no necesitan ningún dispositivo para captar la energía solar, existiendo una íntima relación entre el Sol, el almacenamiento del calor y el espacio, relación que se logra por la aplicación de distintos elementos La Energía Solar.

1.3.2.2. Los sistemas activos

Se basan en la captación de la radiación solar por medio de un elemento de unas determinadas características, denominado colector. Según las características del colector, el aprovechamiento de la energía solar se puede acometer bajo dos puntos de vista bien diferenciados: la conversión térmica, o aprovechamiento del calor contenido en la radiación solar, y la conversión eléctrica, o aprovechamiento de la energía luminosa (fotones) de la radiación solar para generar directamente corriente eléctrica (efecto fotovoltaico).(La Energía Solar, 2020)

1.4 EFECTO FOTOVOLTAICO

El efecto fotovoltaico se produce por generación de una fuerza electromotriz, mediante la absorción de la radiación luminosa, en un material semiconductor dentro de un sistema heterogéneo. Dicho de otro modo, la corriente eléctrica se establece siempre en un circuito cerrado, la energía eléctrica se entrega sólo en elementos que actúan como cargas o de consumo también se puede decir que

Cuando los fotones chocan con las células fotovoltaicas, estos pueden ser absorbidos, reflejados e incluso pasar a través de las células. Solo los fotones absorbidos pueden generar electricidad solar. Cuando es absorbido el fotón, la energía de este se conduce hacia un electrón de un átomo de la célula. Al generarse esta nueva energía, este electrón es capaz de transformarse y pasar a formar parte de una corriente en un circuito eléctrico. La corriente de electrones es creada en las capas de semiconductores de la célula solar. (Lindao, 2020)

1.5 CELDA FOTOVOLTAICA

Las células fotovoltaicas son dispositivos que convierten energía solar en electricidad, en un proceso en el que la luz incide sobre un dispositivo semiconductor de dos capas produciendo una diferencia del voltaje o del potencial entre las capas. Este voltaje es capaz de conducir una corriente a través de un circuito externo de modo que se pueda producir trabajo útil. Aunque las células fotovoltaicas eficientes han estado disponibles desde mediados de los años 50, la investigación científica del efecto fotovoltaico comenzó en 1839, cuando el científico francés, Henri Becquerel descubrió que una corriente eléctrica podría ser producida haciendo brillar una luz sobre ciertas soluciones químicas. (Sobrino, 2006)

Las células o celdas solares son dispositivos que convierten la energía solar en electricidad, ya sea directamente vía el efecto fotovoltaico, o indirectamente, mediante la previa conversión de energía solar a calor o a energía química.

La forma más común de las celdas solares se basa en el efecto fotovoltaico, en el cual la luz que incide sobre un dispositivo semiconductor de dos capas produce una diferencia del voltaje o de potencial entre las capas. Este voltaje es capaz de conducir una corriente a través de un circuito externo de modo de producir trabajo útil para una aplicación determinada. (Capítulo 1 et al., 2011)

- Materiales cristalinos y amorfos.

El silicio es el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre y, por lo general, se lo encuentra formando óxidos como el cuarzo o silicatos en la arena y barro. Está constituido por átomos que tienen 4 electrones de valencia y. Esta propiedad eléctrica es aprovechada en la construcción de celdas fotovoltaicas donde la energía solar logra romper los enlaces covalentes de los átomos del silicio y los electrones de valencia logran fluir con libertad en la estructura cristalina del semiconductor.

Actualmente, los materiales monocristalinos, policristalinos y amorfos. Son usados para fabricar los dispositivos. En los materiales monocristalinos los átomos están ordenados y se enlazan en una misma forma, la periodicidad de este arreglo es de largo alcance es decir que la estructura se repite en prácticamente todo el cristal. Por lo general el silicio monocristalino tiene una estructura tipo diamante, con un parámetro de red de 0.54nm y un ancho de banda prohibida de 1.12eV a 300K. En la estructura policristalina los átomos de silicio forman pequeños granos monocristalinos que son orientados aleatoriamente. En la estructura amorfa los átomos de silicio son orientados de manera aleatoria, pero conservando las características de los sólidos (orden de corto alcance), el ancho de banda prohibida es de 1.7eV a 300K, y su coeficiente de absorción es mayor al del silicio monocristalino. La alta densidad de defectos presentes en la red hace que la longitud de difusión de los portadores minoritarios sea muy pequeña. (*Estudio y desarrollo de celdas solares*, s. f.)

Como se puede observar anteriormente existen diferentes tipos de paneles solares en función de los materiales empleados, los métodos de fabricación que se emplean y su forma final. Por consiguiente, se procede a describir el rendimiento que se tiene al formar una celda solar con estos materiales

- Silicio Puro monocristalino

Basados en secciones de una barra de silicio perfectamente cristalizado en una sola pieza. En laboratorio se han alcanzado rendimientos máximos del 24,7% para éste tipo de paneles a la hora de ser comercializados de un rendimiento del 16%.

- Silicio Puro Policristalino

Los materiales son semejantes a los del tipo anterior, aunque en este caso el proceso de cristalización del silicio es diferente. Los paneles policristalinos se basan en secciones de una barra de silicio que se ha estructurado desordenadamente en forma de pequeños cristales. Son visualmente muy reconocibles por presentar su superficie un aspecto granulado. Se obtiene con ellos un rendimiento inferior que con los monocristalinos (en laboratorio del 19.8% y en los módulos comerciales del 14%) siendo su precio también más bajo.

- Silicio amorfo.

(TFS) Basados también en el silicio, pero a diferencia de los dos anteriores, este material no sigue aquí estructura cristalina alguna. Paneles de este tipo son habitualmente empleados para pequeños dispositivos electrónicos (Calculadoras, relojes) y en pequeños paneles portátiles. Su rendimiento máximo alcanzado en laboratorio ha sido del 13% siendo el de los módulos comerciales del 8%. (Fernández, 2016)

1.6 SISTEMAS DE SEGUIMIENTO SOLAR

Un seguidor solar es un dispositivo mecánico capaz de buscar la posición del sol en cualquier momento del día, siguiendo al sol desde el este hasta el oeste Está conformado básicamente por una parte fija y una móvil, la cual cuenta con una

superficie de captación que debe permanecer perpendicular a los rayos del sol durante el día y dentro de su rango de movimiento, cuya finalidad es el aumento de la captación de radiación solar. Su movimiento está inspirado en la trayectoria seguida por los girasoles y hay dos movimientos que se deben controlar, el de la trayectoria del sol durante el día y la variación de esta trayectoria durante el año. Los seguidores solares acoplados a los sistemas captadores (sistema de seguimiento solar) se utilizan para posicionar los sistemas captadores de radiación, de forma que éstos permanezcan cercanos a la perpendicular paralela de los rayos solares, para convertir la energía captada en calor a energía eléctrica y ser utilizada en viviendas, complejos urbanísticos o en la industria. (Toranzo et al., 2015)

- TIPOS DE SEGUIDORES SOLARES

Existen diferentes tipos de seguidores Solares los cuales se encuentran catalogados según el tipo de movimiento que se realice y según el algoritmo de seguimiento que se emplee para cumplir el objetivo.

Según el tipo de movimiento:

- Seguidores a un eje:

Presentan un grado de libertad en su movimiento. La rotación de la superficie de captación se hace sobre un solo eje, este puede ser horizontal, vertical u oblicuo. Este tipo de seguimiento representa un mínimo grado de complejidad. Su limitación consiste en que no puede realizar un seguimiento completo del Sol ya que solo se puede seguir en un eje ya sea el azimut o la altura solar o ángulo de elevación.

- Seguidores a dos ejes:

Poseen dos grados de libertad, capaces de hacer un seguimiento solar más preciso. Este tipo de seguidor está en capacidad de realizar un seguimiento total del Sol, tanto en altura o ángulo de elevación como en el azimut, aunque el costo de la instalación es superior en comparación con los de un solo eje. (Toranzo et al., 2015)

Según el algoritmo de seguimiento:

- Seguidores por punto luminoso:

Poseen un sensor que les indica cual es el punto del cielo más luminoso y al que deben apuntar. El algoritmo de este tipo de seguidor basa su funcionamiento en la señal integrada por uno o varios sensores, dependiendo de dicha señal se envía un comando de control a uno o varios motores para que se posicionen en el punto más adecuado de luminosidad.

- Seguidores con programación astronómica:

Estos mediante un programa conocen en qué punto debería estar el Sol a cada hora y apuntan a dicha posición. Presenta una total independencia de las condiciones climáticas ya que su algoritmo no requiere de sensores que indiquen cual es el punto más luminoso. El seguimiento en este caso depende únicamente de una serie de ecuaciones que predicen la ubicación del Sol en cualquier momento (Toranzo et al., 2015)

1.7 CARTA SOLAR

La Carta Solar es un gráfico que representa la trayectoria del sol durante todo el año, vista desde un plano horizontal. A través de estas estrategias o mecanismos se puede saber que sucede en términos del sol y la sombra en un determinado momento para una posición geográfica específica, Así como también se puede decir que es un mapa solar es una representación gráfica de la trayectoria del sol en diferentes momentos del día y del año. Por lo general, se representan mediante la

proyección de la trayectoria del sol sobre un plano. (Bittencourt, L. 1996). Uso las cartas solares. UFAL.

1.8 SISTEMA DE CONTROL

El sistema de control de procesos está formado por un conjunto de dispositivos de diverso orden. Pueden ser de tipo eléctrico, neumático, hidráulico, mecánico, entre otros. El tipo o los tipos de dispositivos están determinados, en buena medida, por el objetivo a alcanzar. Pero un sistema de control no se establece como tal solo por contar con estos dispositivos, sino que debe seguir la lógica de al menos 3 elementos base:

- Una variable a la que se busca controlar
- Un actuador
- Un punto de referencia o set-point

En la actualidad se hace cada día más necesario disponer de sistemas de control o de mando, que permitan mejorar y optimizar una gran cantidad de procesos, en donde la sola presencia del hombre es insuficiente para gobernarlos. O también para cumplir reducir el error o automatizar un proceso como en el de un seguidor fotovoltaico (Pérez et al., 2007)

También se puede decir que un sistema de control es un tipo de sistema que se caracteriza por la presencia de una serie de elementos que permiten influir en el funcionamiento del sistema. La finalidad de un sistema de control es conseguir, mediante la manipulación de las variables de control, un dominio sobre las variables de salida, de modo que estas alcancen unos valores predeterminados. (Alvarez Brotons, 2004)

Hay dos tipos principales de sistemas de control: en lazo abierto y en lazo cerrado.

CONTROL LAZO ABIERTO

Se caracteriza por no incorporar un sistema de medición para evaluar el valor de salida, o que este existe, pero no influye en el valor de entrada. La regulación se hace a partir de la experiencia o de los resultados de mediciones previas. (Alvarez Brotons, 2004)

Ampliando más la definición se puede decir que un sistema de control en lazo abierto es donde la salida no tiene efecto sobre la acción de control, es decir, la salida de la planta no se mide ni realimenta, entonces es independiente de las entradas de control. Por lo tanto, este tipo de controladores se emplean sólo si la relación entrada/salida de la planta es conocida y no hay perturbaciones externas o internas. Por esta razón estos sistemas son simples y económicos. (Lorenzón, 2020)

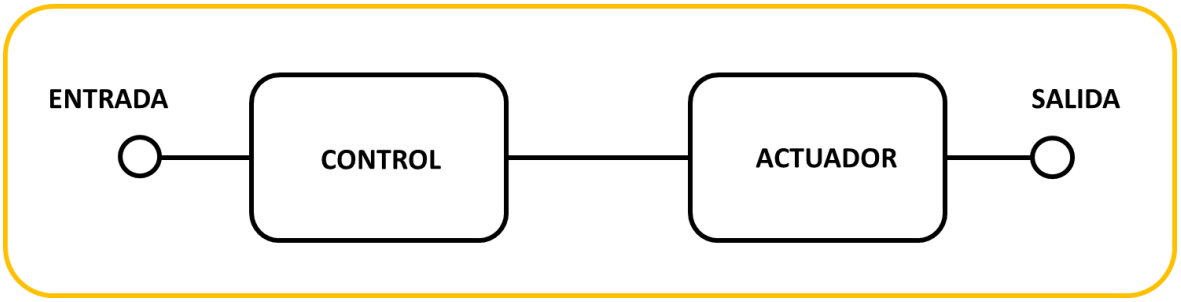


Figura 3 Sistema de control en lazo abierto

CREACIÓN PROPIA

CARACTERÍSTICAS DEL CONTROL EN LAZO ABIERTO

Estas son las principales características que presentan los sistemas de control en lazo abierto con respecto a su funcionamiento

- No se compara la salida del sistema con el valor deseado de la salida del sistema o el valor de referencia.
- Para cada entrada predeterminada le corresponde una condición de operación establecida.
- La exactitud de la salida del sistema depende de la calibración del controlador.

- En presencia de perturbaciones estos sistemas de control no cumplen su función adecuadamente. (Pereira, s. f.)

CONTROL LAZO CERRADO

Se caracteriza por no incorporar un sistema de medición para evaluar el valor de salida, o que este existe, pero no influye en el valor de entrada. La regulación se hace a partir de la experiencia o de los resultados de mediciones previas. (Pérez et al., 2007)

En este tipo de sistema la señal de salida tiene un efecto directo sobre la acción de control, es decir, son sistemas de control realimentado, ya que la salida es comparada con la referencia y la señal de error generada alimenta al controlador el cual aplica una nueva señal a la planta con el fin de reducir el error y llevar la salida del sistema al valor deseado (Pérez et al., 2007)

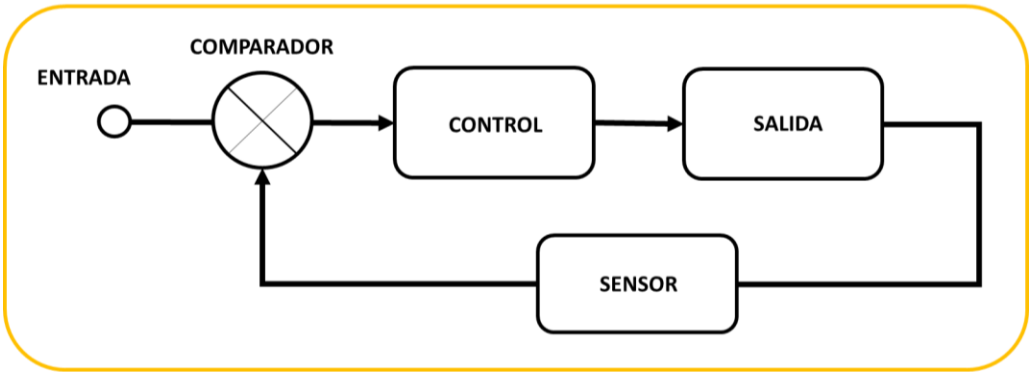


Figura 4 Sistema de control en lazo abierto

CREACIÓN PROPIA

- La entrada obtiene información de la salida esto quiere decir que es un lazo realimentado
- Su configuración ayuda a corregir el efecto de las perturbaciones que se presentan
- Los sistemas en lazo cerrado son más complejos que los sistemas de lazo abierto por tal motivo el costo de implementación aumenta, pero a su vez es más preciso y exacto que el sistema en lazo abierto. (Pereira, s. f.)

1.9 TRABAJOS REALIZADOS

A continuación, se expondrán diversas investigaciones llevadas a cabo a nivel internacional y nacional, todas ellas pertinentes al problema objeto de estudio.

En la época actual, la creciente demanda de energía y la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero han impulsado la búsqueda de fuentes de energía más limpias y sostenibles. En este contexto, la energía solar ha emergido como una solución prometedora, aprovechando la radiación solar para generar electricidad de manera renovable. Sin embargo, para maximizar la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos, es esencial abordar desafíos clave como la captura óptima de la radiación solar incidente. Para abordar esta cuestión, se han propuesto sistemas de seguimiento solar, que permiten a los paneles solares orientarse hacia la posición óptima del sol a lo largo del día.(Rojas, 2020)

En Colombia la generación de energía ha estado mayormente centrada en plantas hidroeléctricas, responsables de aproximadamente un 66% del suministro eléctrico del país. Sin embargo, a pesar de contar con una gran disponibilidad de recursos naturales como la radiación solar y los vientos, se ha subutilizado el potencial de las energías renovables. Las plantas termoeléctricas, impulsadas por combustibles fósiles, desempeñan un papel crucial durante periodos de sequía o escasez hídrica, pero plantean preocupaciones ambientales y de sostenibilidad. Esta situación resalta la necesidad imperante de aprovechar las fuentes de energía solar y eólica para diversificar la matriz energética y reducir la dependencia de los recursos no renovables.(*¿Colombia tiene potencial en fuentes de energía renovables?* | *EL ESPECTADOR*, s. f.)

INTERNACIONAL

- Proyectos e investigaciones han adoptado la incorporación de sistemas de

paneles asistidos, complementando la obtención de energía limpia. En el artículo titulado "Híbrido solar eólico" (Puig & Jofra, s. f.), se llevó a cabo el desarrollo del proyecto denominado "Sistema Autónomo de Generación de Energía Renovable". En este estudio, se describe la implementación de un sistema híbrido que fusiona la potencia solar con la proveniente del viento. La investigación empleó ocho paneles de silicio monocristalino en conjunto con un aerogenerador de eje vertical, los cuales se conectaron a un banco de baterías. Los paneles solares suministran energía al banco de baterías siempre que la carga no alcance su capacidad máxima. En casos en los que la demanda energética exceda la disponibilidad, el aerogenerador entra en funcionamiento. El propósito central de este proyecto es introducir una plataforma de generación eléctrica que combine fuentes de energía renovable de manera híbrida. En este enfoque, un generador fotovoltaico opera como la fuente primaria de energía para cargar una batería, permitiendo así la identificación de puntos de pérdida energética y el desarrollo de estrategias para su minimización.

- Se continúan explorando diversos enfoques para mitigar las pérdidas energéticas en la captación solar. En 2016, David y colaboradores llevaron a cabo un estudio titulado "Sistema Autónomo De Seguimiento Solar Asociado A Un GPS". El objetivo central de esta investigación consistía en demostrar los beneficios de emplear seguidores solares. En esta línea, desarrollaron y construyeron un sistema autónomo con dos grados de libertad, capaz de calcular y rastrear la trayectoria solar utilizando ecuaciones precisas. Posteriormente, compararon la información obtenida del seguimiento con la de un sistema estático. Al concluir el estudio, lograron ilustrar a través de gráficos y datos recopilados cómo la incorporación de un movimiento calculado mejora significativamente la eficiencia en la captación energética.
- Se están implementando sistemas innovadores para la evaluación de tecnología fotovoltaica, que comprende la conversión de energía solar en energía eléctrica. En el estudio transformación de energía solar a energía eléctrica (Jalón & Herrera, 2019). Se compararon paneles solares estáticos

con paneles móviles de dos ejes, los cuales fueron programados utilizando la plataforma Arduino. La variable principal analizada en este contexto fue la resistencia medida en ohmios, con el propósito de mantener los paneles orientados de manera perpendicular al sol. Este enfoque garantiza la máxima captación solar y, por ende, una eficiencia óptima. Dado que la posición del sol varía a lo largo del año y a lo largo del día, los investigadores llevaron a cabo pruebas utilizando ambos sistemas durante los mismos intervalos temporales. Esto permitió validar el objetivo del proyecto, el cual fue desarrollado en la ciudad de Milagros, ubicada en la provincia de Guayas, Ecuador.

NACIONALES

- En Colombia, se han llevado a cabo investigaciones con el propósito de optimizar la generación de energía a partir de paneles solares. En un estudio realizado en la Universidad de los Andes, se abordó el tema a través del trabajo titulado "Diseño De Un Nuevo Algoritmo De GMPPT Para Paneles Solares En Condición De Sombra". En este estudio, se subraya la relevancia de esta tecnología y se destaca la necesidad de implementar mejoras en su aplicación en el país. Los investigadores presentaron un enfoque que se basa en la obtención de una curva de potencia en función del voltaje, generada a partir de la recopilación de datos sobre la potencia generada por un panel solar. A partir de esta curva, se pueden identificar los puntos de máxima potencia (MPP), que sirven como referencia para determinar un punto global de máxima potencia (GMPPT). El objetivo central de este estudio fue desarrollar un algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) capaz de funcionar tanto en condiciones de irradiación uniforme como en condiciones de sombra parcial. Para tomar decisiones, el algoritmo utilizó derivadas. Como resultado, los investigadores lograron validar la eficacia y convergencia de este algoritmo mediante pruebas exhaustivas. Estas pruebas no solo permitieron identificar los escenarios en los que el panel solar funcionaba de manera adecuada, sino también aquellos en los

que su funcionamiento era incorrecto.

- En el ámbito nacional, diversas investigaciones se han focalizado en analizar la influencia de los parámetros mecánicos en el rendimiento de estructuras destinadas a paneles solares con seguimiento. En este sentido, un estudio desarrollado por Heylen Polo Cano, Ambrosio Valencia Romero, Javier Roldan Mckinley. (2012). titulado "Una Metodología Para La Evaluación De La Seguridad Estructural De Un Sistema De Seguimiento Solar En Colombia" se propuso abordar este aspecto. El objetivo central de esta investigación fue crear una herramienta computacional que permitiera estimar la inercia del sistema y evaluar las cargas que actúan sobre él. Esto se logró mediante el cálculo de un factor de seguridad aplicado a un modelo estructural diseñado para un panel solar orientable. La ejecución de este proyecto demandó decisiones clave, como la selección adecuada del panel, la definición precisa del entorno en el que operaría y la elección de materiales, incluyendo sus respectivos diámetros, para calcular las cargas. Una vez completada esta rigurosa evaluación estructural, los investigadores lograron establecer una configuración segura. A partir de esta configuración, diseñaron una interfaz gráfica que, mediante comandos y la utilización de Matlab, permitió obtener los factores de seguridad necesarios para el funcionamiento confiable del sistema.
- En el territorio colombiano, específicamente en el departamento de Córdoba, se ha planteado un sistema para la captación de radiación electromagnética solar con el fin de su transformación en electricidad mediante sistemas fotovoltaicos. En este contexto, el enfoque se dirigió hacia las áreas rurales del departamento, con un interés particular en la agricultura y la ganadería. El desarrollo del proyecto encontró diversas dificultades derivadas de condiciones naturales, costos y otros factores. La eficiencia del sistema también está intrínsecamente vinculada con la radiación solar, la cual varía en función del día del año, la hora del día, las condiciones atmosféricas y la ubicación geográfica donde se implementa el sistema. No obstante, la implementación de seguidores solares puede garantizar la alineación

perpendicular de los rayos solares, lo que potencialmente puede resultar en una eficiencia de hasta un 42.8%, como se indicó en el trabajo de Adán (2007). Aunque la aplicación de seguidores solares pueda ser más costosa, sin duda ofrece una rentabilidad superior en comparación con un sistema estático. Este enfoque resulta especialmente prometedor en términos de optimización de la captación de energía solar en contextos donde la eficiencia y la rentabilidad son factores críticos.

CAPÍTULO II

DISEÑO DEL SISTEMA

En este segundo capítulo se da a conocer el proceso por el cual se llevó a cabo el diseño del sistema, cumpliendo así con lo establecido en las fases 2, 3 y 4 de la metodología de diseño en forma de "V", conocida como V-Shape. En la fase 2 de esta metodología, se ha desarrollado un diseño detallado del sistema, tomando como base los requisitos obtenidos en la fase anterior. así como en la fase 3 definiendo las interacciones entre ellos, los protocolos de comunicación, las interfaces necesarias y los algoritmos que serán implementados y por consiguiente la fase 4 dando cumplimiento al modelado y análisis del modelo.

El modelo se pensó teniendo en cuenta su funcionalidad y aplicación, para que fuera capaz de ser posicionado de manera completa de un lugar a otro sin complicaciones ni restricciones, manteniéndose firme y en equilibrio con el panel que debe ir soportado. En principio se planteó un diseño desarmable robusto, compuesto por varias láminas gruesas, una como soporte rectangular y dos circulares que compondrían la parte rotativa separadas por cuatro platinas de soporte (ver figura 6). Este diseño fue descartado por su robustez, poca maniobrabilidad, complejidad de fabricación y adaptabilidad por lo que se decidió replantear el diseño por uno más ligero, asequible, de mayor versatilidad, con un menor número de piezas que facilitan el montaje, por lo que un sistema truss (Gil G., 2015). Fue el ideal para reemplazar el diseño de la base con 4 patas como soporte, con tubos cilíndricos metálicos removibles que van desde la punta de las patas hasta la parte superior de la base. La segunda parte de la estructura compone el soporte del panel, diseñado como un soporte en U que converge en el centro y se acopla a la base mediante un eje que las une.

Luego de tener claro el diseño se continuó implementando herramientas de software como Solidworks para su visualización y análisis previo a la construcción. Este software de diseño CAD 3D (diseño asistido por computadora) es ideal para modelar piezas, ensamblajes y planos en 2d. Con la ayuda de Solidworks se dio

paso al diseño estructural del prototipo mecánico, creando inicialmente una representación individual de cada una de las piezas con medidas específicas para luego dar lugar al ensamble del modelado en su forma tridimensional, teniendo en cuenta requerimientos como rigidez, resistencia y estabilidad con buena movilidad para el correcto funcionamiento del sistema. Este apartado se expondrá en varias secciones, partiendo en primer lugar, el modelado de la geometría del diseño donde se ilustra la anatomía que tendrá el producto final, en segundo lugar, se presentan las mejoras en la construcción del diseño, posteriormente se evidencia el análisis de fuerzas estructurales para la comprobación de la resistencia en las piezas expuestas a cargas externas y la obtención de su factor de seguridad. En cuarto lugar, se muestra la composición electrónica y cada uno de los componentes que harán parte del circuito de control. Finalmente se dan a conocer las variables responsables del posicionamiento solar.

2.1. MODELADO DE LA GEOMETRÍA DEL DISEÑO

El modelado del sistema de seguimiento solar se inició a partir de un boceto estructural que cumpliera con unas cualidades esenciales de funcionamiento que fueran óptimas para una proporción y un dimensionamiento ideal.

- Boceto inicial

Inicialmente se parte de la definición, por consiguiente, el boceto es un recurso esencial para el estudio y el análisis utilizando el dibujo como herramienta primordial sobre todo por su rápida y económica ejecución el cual tiene como objetivo registrar ideas que se tienen a partir de unos requerimientos específicos a la hora de desarrollar cualquier prototipo. (Guevara, 2013), teniendo en cuenta lo anterior, el modelo planteado a mano alzada acerca del sistema de seguimiento solar cuenta con dos etapas que comprende la ejecución de cada uno de los ejes en los que se mueve el sistema para su correcto funcionamiento proporcionando una posición en el Ángulo Azimut y en el Ángulo de Elevación como se puede evidenciar en la figura

4, así mismo la figura 5. Corresponde al diseño de las piezas empleadas para el sistema.

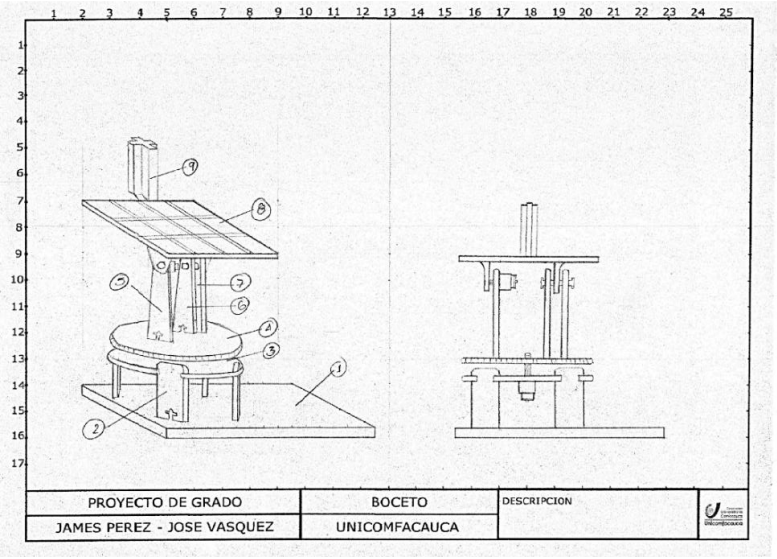


Figura 5 Boceto inicial del prototipo

Fuente: Creación propia

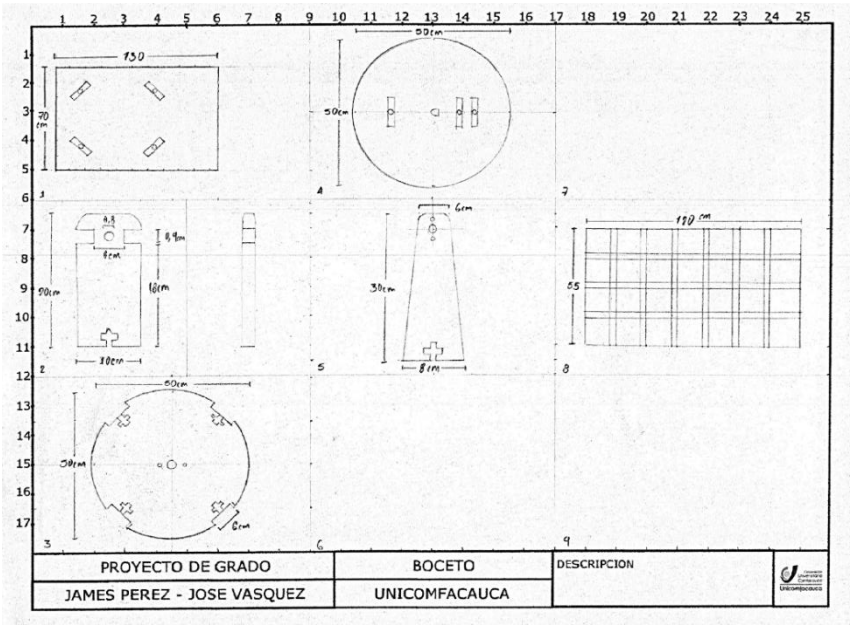


Figura 6 Boceto inicial piezas del prototipo

Fuente: Creación propia

2.2. DISEÑO CAD DEL PROTOTIPO INICIAL

La elaboración del prototipo tiene una fase la cual es comprendida por el diseño de piezas que dan un acercamiento a lo que va a ser cada una de las partes a utilizar en el sistema, el diseño creado consta de una base robusta la cual sujeta cuatro pilares por medio de tornillos que a su vez son ensambladas con una base circular fija que sostiene el primer motor, la segunda parte de la estructura está conformada por una base circular con un orificio en el centro el cual encaja en el eje del primer motor, Esta base sujetada al eje del primer motor también cuenta con 3 ranuras las cuales son las que permiten encajar 3 pilares fundamentales para sostener el segundo eje de movimiento prototipo el cual corresponde al eje de elevación donde también se puede observar y se hace referencia estando numerados con los números 5, 6 y 7 en la figura 4. que se encuentra anteriormente y por último una base rectangular cuyo objetivo es soportar el panel solar. En la figura 5. Se da a conocer cada una de sus partes

Finalmente se obtiene por medio del ensamblaje en Solidworks una representación del sistema en 3D el cual se puede evidenciar en la figura 7.

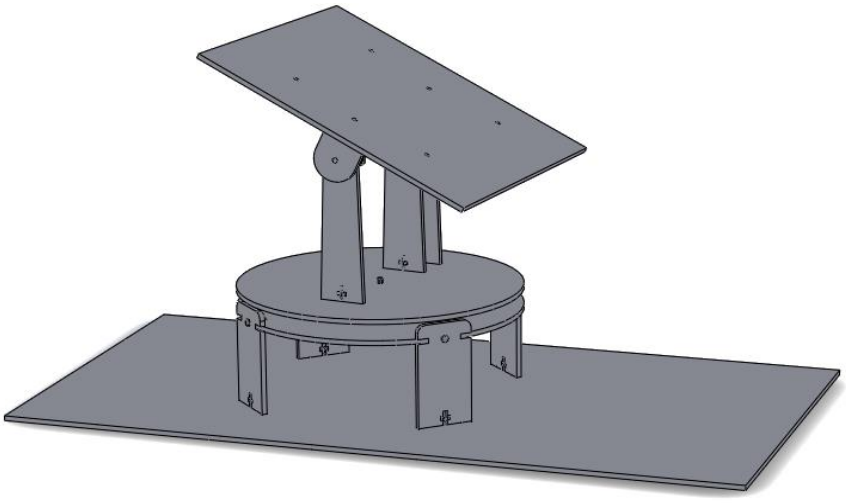


Figura 7 Diseño del prototipo inicial

Fuente: Creación propia

2.3. MEJORAS EN EL DISEÑO

En las figuras 8-14, se puede evidenciar una representación CAD de cómo está conformado el sistema, luego de construir en Solidworks un diseño con características similares al que aparece en la figura 6, pero con mejor aprovechamiento de materiales y reducción en el costo de fabricación.

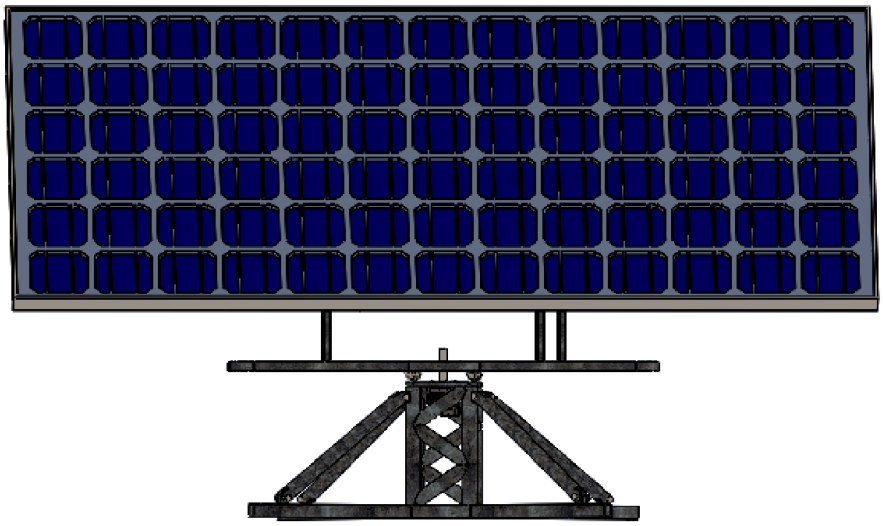


Figura 8 Modelo CAD del prototipo parte frontal

Fuente: Creación propia

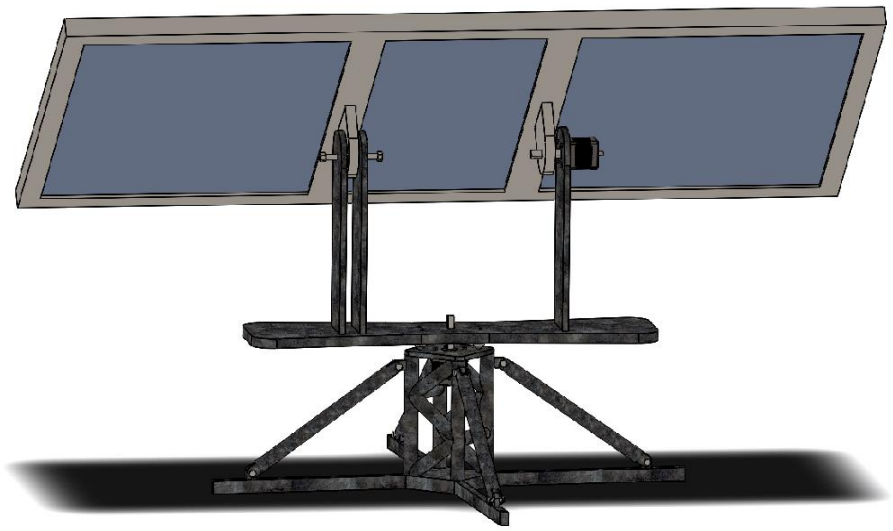


Figura 9 Modelo CAD del prototipo parte trasera

Fuente: Creación propia



Figura 10 Modelo CAD base de la estructura del prototipo

Fuente: Creación propia

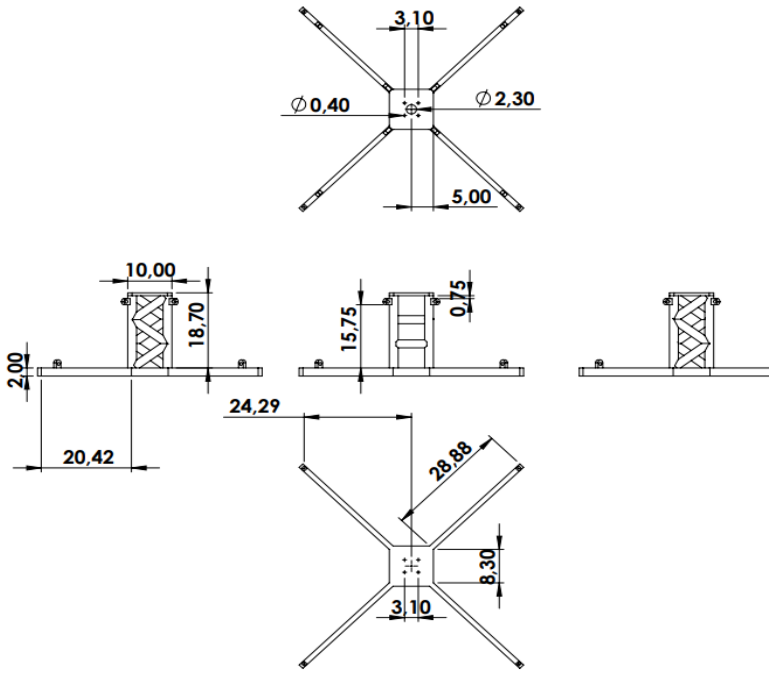


Figura 11 Modelo CAD base de la estructura del prototipo

Fuente: Creación propia

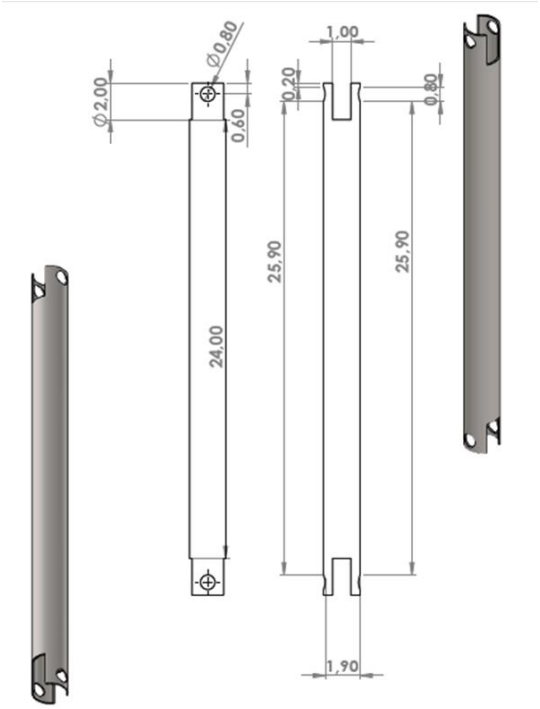


Figura 12 Modelo CAD varilla de soporte

Fuente: Creación propia

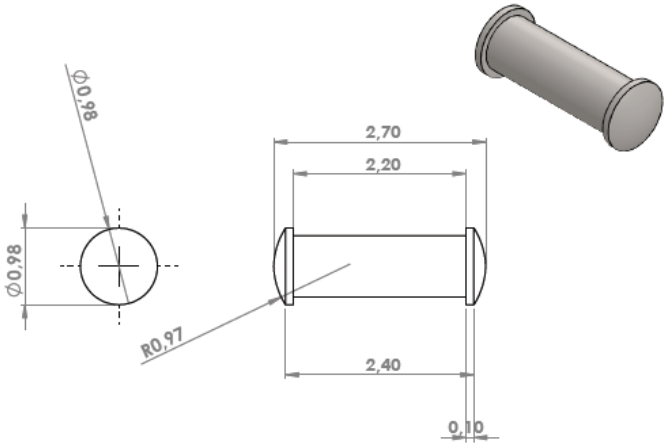


Figura 13 Modelo CAD del pasador

Fuente: Creación propia

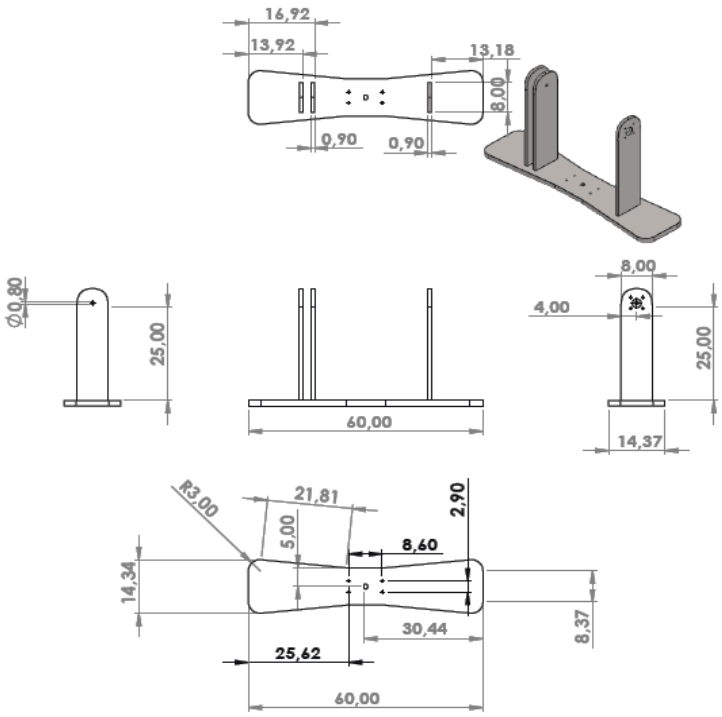


Figura 14 Modelo CAD del pasador

Fuente: Creación propia

2.4. ANÁLISIS DE FUERZAS ESTRUCTURAL

La apariencia física final de la estructura fue diseñada y dimensionada mediante el software asistido por computadora Solidworks, lo que permitió realizar algunos estudios adecuados para el sistema que ayudan a determinar el desempeño de los parámetros mecánicos. El estudio realizado se ejecutó con la idea de recopilar la información sobre la respuesta del armazón frente a condiciones de carga.

La estructura está compuesta por tres partes genéricas: La base cardinal, cuerpo de tres pilares y el marco para el módulo. La base cardinal fue inspirada en un soporte truss, utilizados comúnmente en montajes de escenarios, soportes publicitarios y soportes de iluminación, ya que posee características de resistencia con un aspecto simple, diseñado para que encaje entre sí, siendo versátil y con un montaje sencillo, siendo indicado para montar estructuras de uso efímero, especialmente por su bajo peso.

A continuación, en las figuras 15-17 se presentan cada una de las piezas:

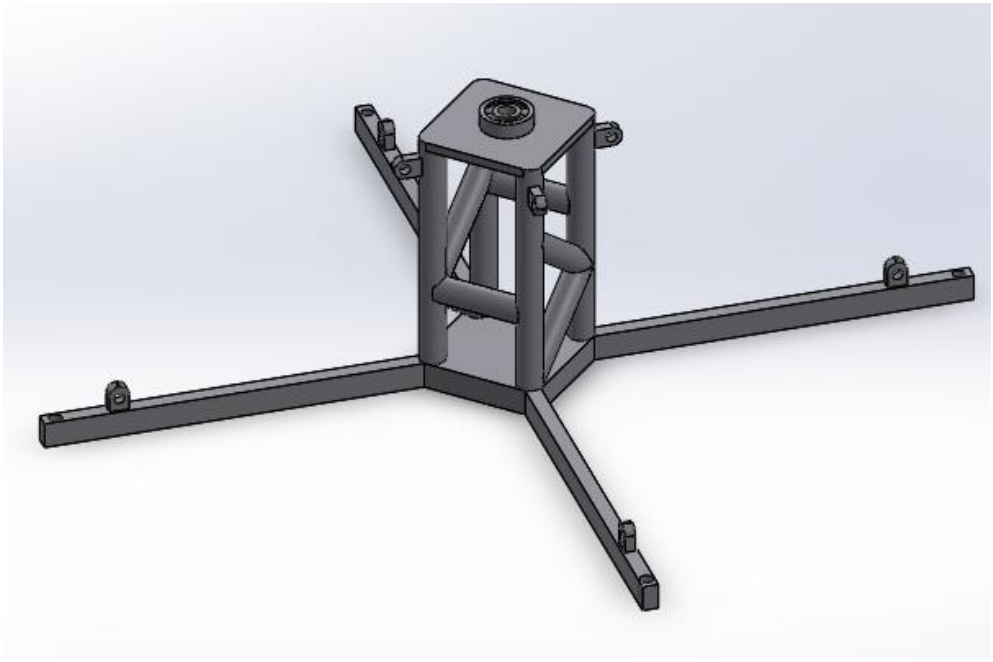


Figura 15 Diseño 3D: La base cardinal

Fuente: Creación propia

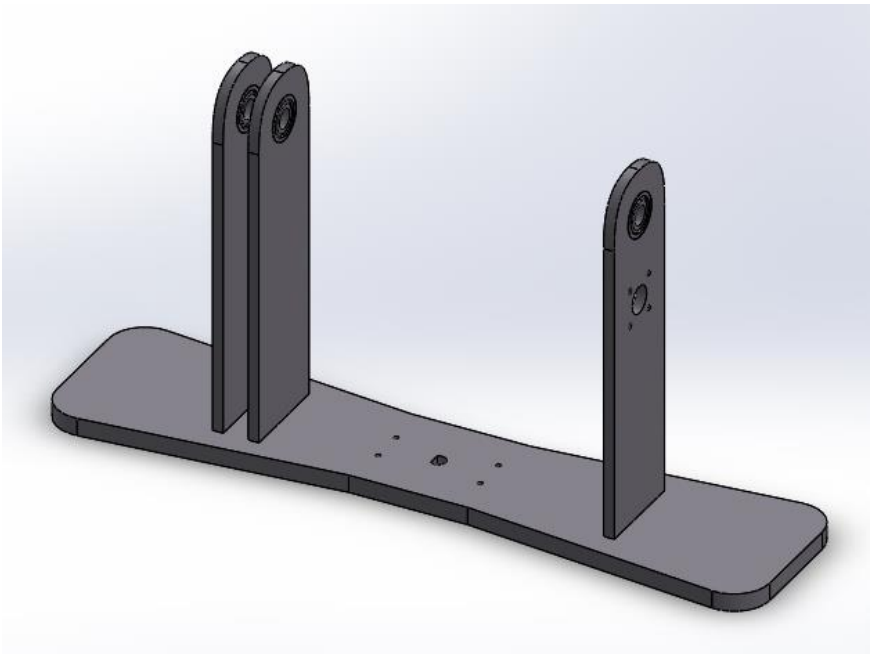


Figura 16 Diseño 3D: Cuerpo de tres pilares

Fuente: Creación propia

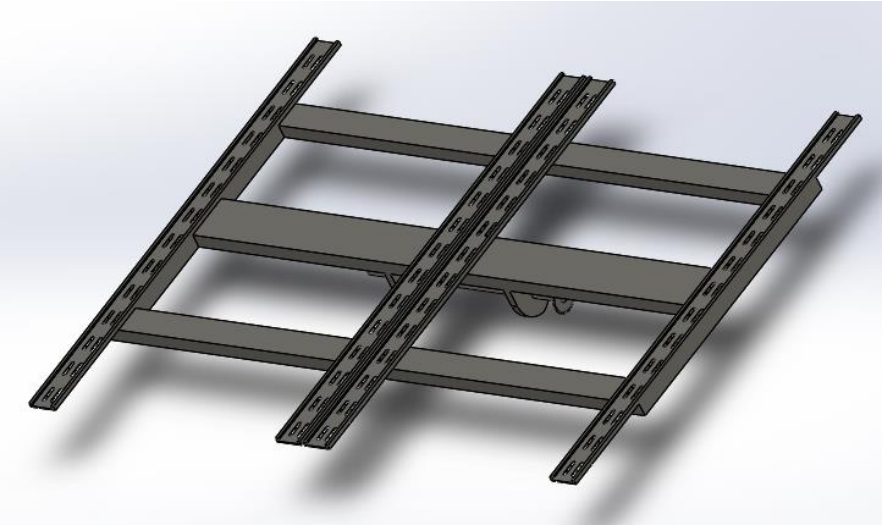


Figura 17 Diseño 3D: Marco para el módulo.

Fuente: Creación propia

La base cardinal, tal como se aprecia en la figura 15, se diseñó en principio partiendo de un soporte en forma de cruz con centro cuadrado y una sección transversal cuadrada hueca ya que representa una base rígida con buena resistencia y con poco material incorporado. Desde la parte central se levantan 4 pilares que soportan una platina en su parte superior, la cual es atravesada por un eje de rotación y da lugar al acople con el cuerpo de tres pilares (figura 16) que se encarga del movimiento acimutal. El marco (figura 17) se ajusta al cuerpo de pilares mediante un eje que da lugar al movimiento cenital y es quien asegura los paneles solares, tal como se aprecia en la figura 18

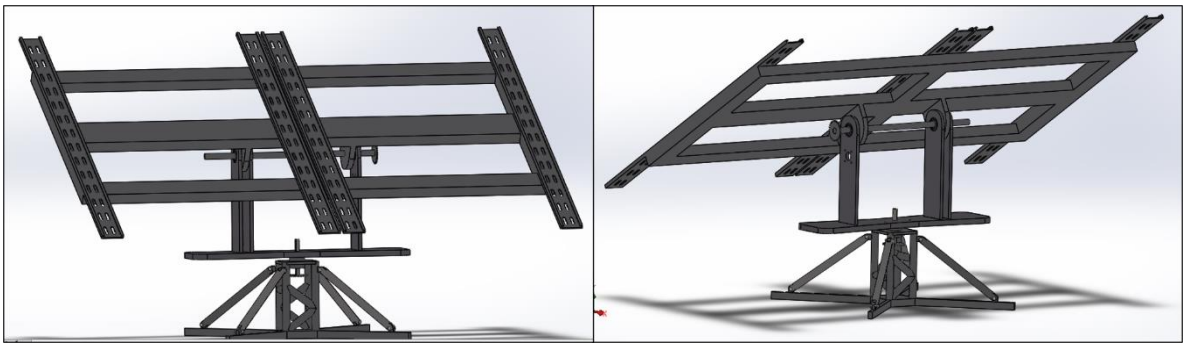


Figura 18 Diseño 3D: Estructura ensamblada

Fuente: Creación propia

Para el estudio de diseño se evaluaron las máximas cargas a las que se espera que estará sometida la estructura en condiciones de funcionamiento, en este caso el peso adicional será proporcionado por el panel soportado por el marco del módulo que es donde actúa la carga. Se espera que el mecanismo ensamblado tenga la suficiente rigidez para evitar cualquier tipo de deformación o pandeo al momento de ser expuesto al esfuerzo previsto. Como se planteó, dicho esfuerzo corresponde a la magnitud F de la carga del panel y algunas fuerzas ambientales (viento). La masa del panel, que será incorporado, fue determinada utilizando la balanza industrial MATRIX ZERO de la corporación (ver figura 19) la cual arrojó un valor de 16.2kg.

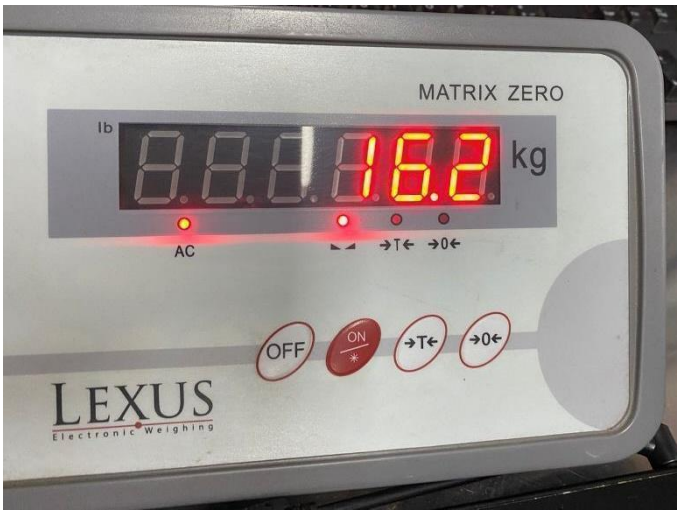


Figura 19 Foto de la masa del panel registrado

Fuente: Creación propia

Se realizó el estudio de fuerzas estáticas de manera compacta a las piezas ensambladas para la verificación de su esfuerzo en conjunto, para esto fue necesario asignar el material que lo dota de las propiedades necesarias para cumplir sus funciones con la menor limitación posible, en este caso el material elegido fue el acero galvanizado por su dureza, resistencia, poco desgaste y protección a la oxidación, con un límite elástico de 203.9×10^6N/m^2.

Para la realización de la prueba de esfuerzos en condiciones estáticas, se aplicó una carga de 196 N, concerniente a 20 kg provenientes del panel más el soporte para panel, tomando la gravedad como 9.8 m/s^2, se aplicó en los rieles de la parte superior de forma uniforme en las zonas de contacto directo con el panel, además se agregó una sujeción en la parte inferior de la estructura donde se fijará al contacto con el suelo.

A continuación, se evidencian los resultados obtenidos de la estructura al ser sometida a un esfuerzo de cargas en los que se trabajaron tres parámetros distintos: Tensiones, desplazamientos y factor de seguridad.

1. Tensiones: En este apartado se evidencia cómo el sólido absorbe los efectos de las cargas, desarrollando fuerzas internas que suelen variar en diferentes puntos, donde se experimenta con los esfuerzos máximos. Las unidades utilizadas son la fuerza por área de unidad.

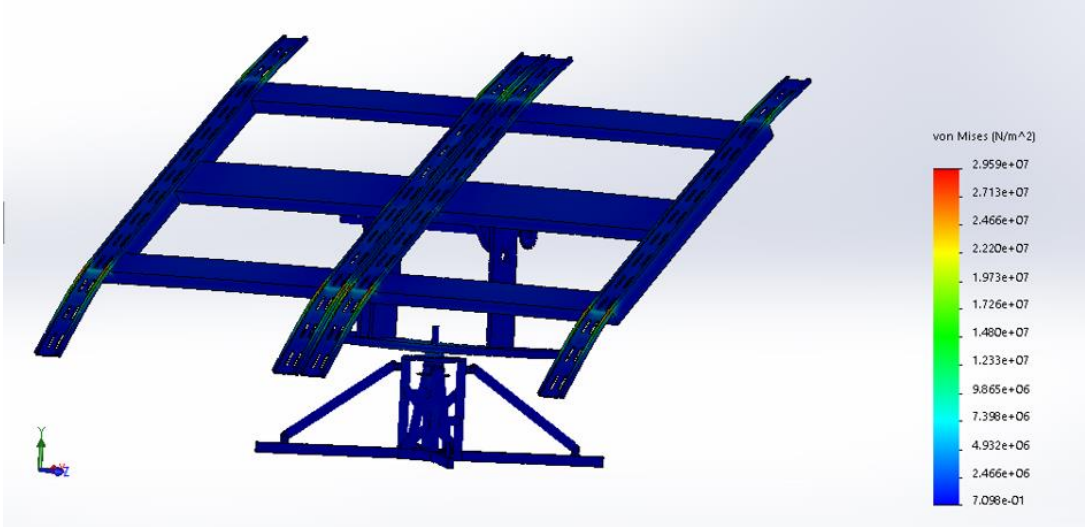


Figura 20 Tensión de Von Mises

Fuente: Creación propia

La figura 20 muestra un criterio de resistencia estática, donde se puede identificar la magnitud física proporcional a la energía de distorsión. Mediante la escala de colores se muestra que la mayor parte de la estructura se encuentra lejos de su límite elástico, a excepción de los 8 puntos de apoyo traseros que involucran las zonas de contacto de los rieles con el soporte posterior. En dichas zonas se presentan leves deformaciones que pueden reflejarse en el mundo físico debido a esfuerzo constante pero que no representan amenazas significativas que se traduzcan en rupturas estructurales.

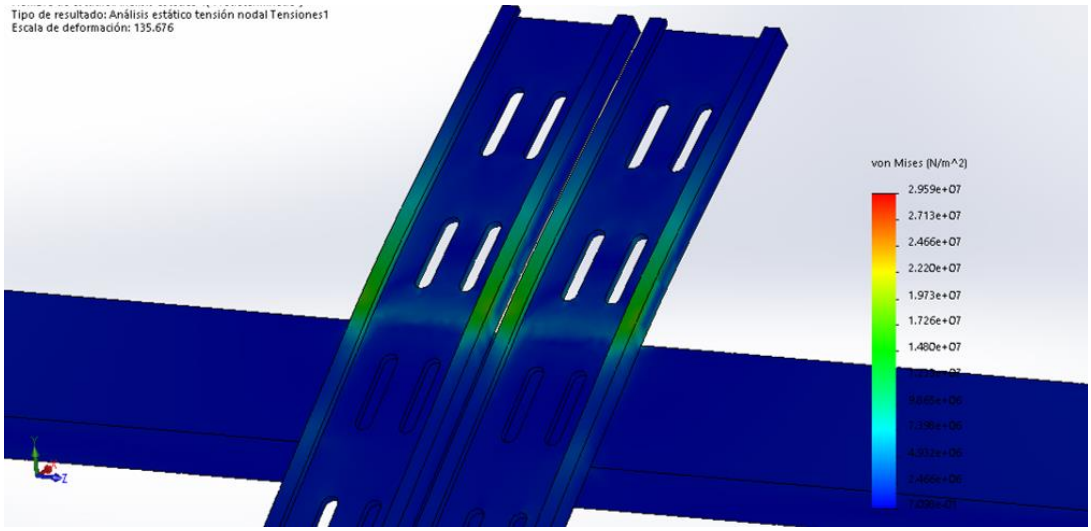


Figura 21 Acercamiento a la zona de pandeo

Fuente: Creación propia

2. Desplazamientos: Aquí se podrá ver los resultados de fuerza de reacción para este estudio estático:

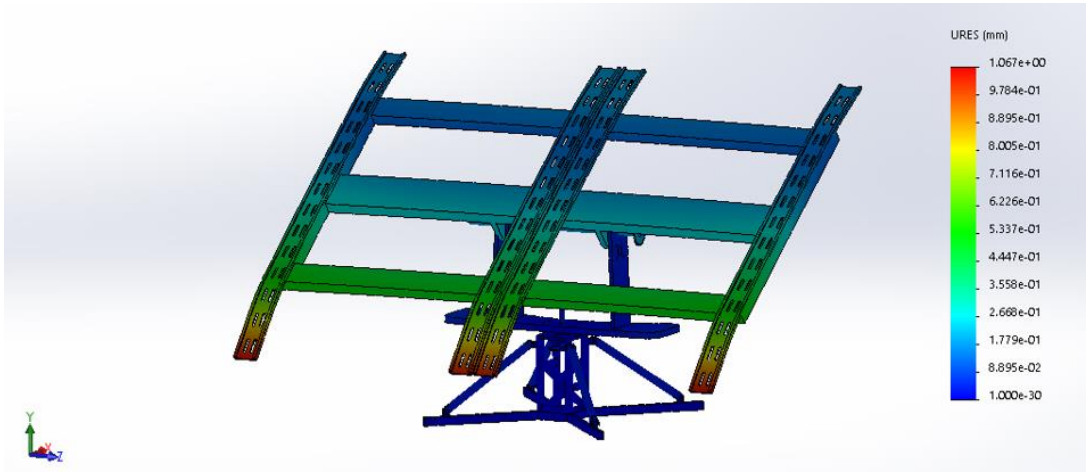


Figura 22 Desplazamientos estructurales

Fuente: Creación propia

Teniendo en cuenta la figura 22, se puede observar el punto máximo de deflexión que podrán soportar estos rieles, el cual es de 1,067 mm al extremo de la estructura. De esta manera, se considera que el diseño empleado es

satisfactorio ya que el riesgo de un desplazamiento estático al que está sometido es muy pequeño.

3. Factor de seguridad: En la figura 23, se evalúa el factor de seguridad en cada uno de los nodos del modelo, según un criterio de error:

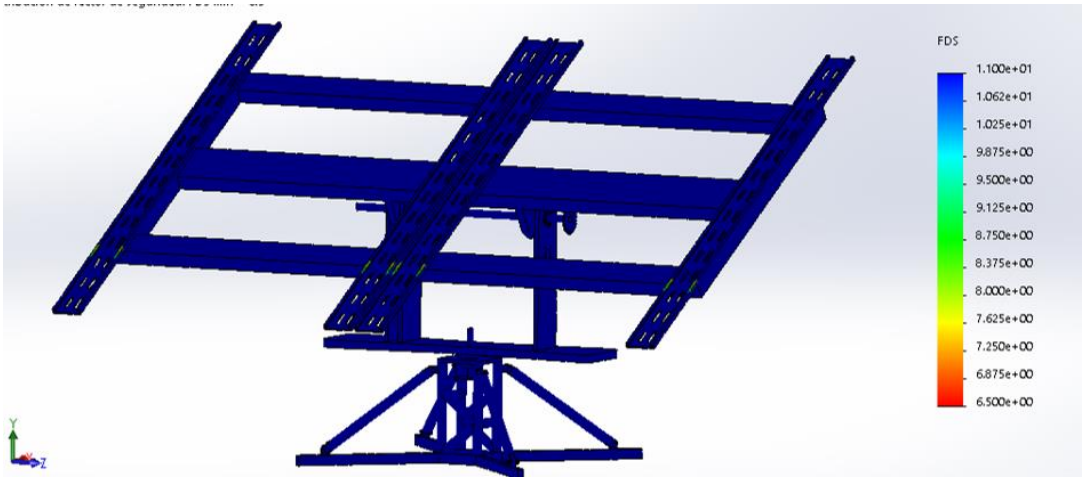


Figura 23 FDS

Fuente: Creación propia

En este análisis se comprueba el factor de seguridad (FDS) respecto al límite elástico estructural, donde se obtiene un factor mayor a 1 indicando que la capacidad de resistencia de la estructura es mayor que la carga máxima esperada. En otras palabras, tener un FDS de 11 significa que los componentes son capaces de soportar las cargas sin exceder su límite de resistencia. Un factor de seguridad mayor a 1 se considera deseable, ya que proporciona un margen de seguridad adicional y reduce el riesgo de falla o colapso.

2.5. COMPOSICIÓN ELECTRÓNICA

En este apartado se dan a conocer los componentes electrónicos que estarán conectados para el transporte de energía eléctrica, necesaria para el funcionamiento de cada elemento y que al final se verá reflejado en el movimiento basado en el control del sistema de seguimiento solar.

2.5.1. ARDUINO MEGA 2560

Arduino Mega 2560 es una tarjeta de desarrollo de Hardware libre construida con el microcontrolador Atmega2560, que le da sentido a su nombre. Forma parte del proyecto Arduino que involucra una comunidad internacional dedicada al diseño y manufactura de placas de desarrollo de Hardware. (Arduino, s. f.)



Figura 24 Arduino mega 2560

(Arduino, s. f.)

El Arduino Mega es probablemente el microcontrolador más capaz de la familia Arduino. Posee 54 pines digitales que funcionan como entrada/salida; 16 entradas análogas, un cristal oscilador de 16MHz, una conexión USB, un botón de reset y una entrada para la alimentación de la placa (ver tabla 1). (Arduino, s. f.)

Tabla 1 CARACTERÍSTICAS ARDUINO MEGA 2560

Fuente: Creación propia

CARACTERÍSTICAS ARDUINO MEGA 2560	
Microcontrolador	Atmega2560
Voltaje de operación	5V
Tensión de entrada	7 -12V
Voltaje de entrada(limite)	6-20V
Pines digitales I/O	54 (14 PWM)
Pines analógicos de entrada	16
Corriente por cada pin I/O	40 mA
Corriente Entregada en el pin 3,3V	50 mA
Memoria Flash	25 KB (8 KB usado por el arranque)
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Velocidad del reloj	16 MHz

Este actúa como el cerebro del sistema. Con su capacidad de procesamiento y múltiples pines digitales y analógicos, el Arduino Mega 2560 es capaz de recibir información y enviar señales a otros componentes. Actúa como el controlador principal que recopila datos del entorno y decide cómo debe moverse el sistema de seguimiento solar.

2.5.2. MOTOR NEMA 17

El motor nema 17 es un motor paso a paso ideal para proyectos de impresoras 3d y maquinaria CNC gracias a su precisión de giro y facilidad de control, se trata de un motor de tipo bipolar que tiene gran capacidad para controlar la posición de su eje, al mismo tiempo que ofrece un excelente torque (ver tabla 2), por lo que se puede ocupar en proyectos que requieran precisión en el posicionamiento. Este motor puede ser utilizado con los controladores de motores tipo pololu A4988 y

DRV8825, son perfectos también para acompañar el shield CNC o shield RAMPS (*Ardobot Robótica SAS Motor a pasos NEMA 17 17HS4401*, s. f.)



Figura 25 Motor nema 17

(Datasheet Stepper Motor NEMA 17, 2018)

Tabla 2 CARACTERÍSTICAS MOTOR NEMA 17 FUENTE: CREACIÓN PROPIA

CARACTERÍSTICAS MOTOR NEMA 17	
TIPO	Motor paso a paso
MODELO	NEMA 17
PESO	350 Gramos
TAMAÑO	42.3x48mm sin eje
DIAMETRO DEL EJE	5mm
LONGITUD DEL EJE	25 mm
PASOS	200 pasos por vuelta (1,8º/paso)
CORRIENTE	1.2A por bobinado
TENSION DE ALIMENTACION	4V
RESISTENCIA	3.3 Ohm por bobina
TORQUE MOTOR	3.2 kg/cm
INDUCTANCIA	2.8 mH por bobina

Este motor paso a paso es responsable de proporcionar el movimiento físico al sistema. El Arduino controla este motor mediante el envío de señales precisas a través de los pines digitales. El motor NEMA 17 gira en pasos discretos, lo que permite un control de posición muy preciso. Esto es crucial para ajustar la orientación del panel solar para maximizar la exposición al sol.

2.5.3. CONTROLADOR A4988

Es un circuito controlador bipolar de motores paso a paso que permite manejar un motor paso a paso bipolar de hasta 2A de corriente desde cualquier microcontrolador. Este driver para motores paso a paso cuenta con un limitador de corriente, y protección de sobre calentamiento y de exceso de consumo para garantizar el funcionamiento correcto cuando sea utilizado.

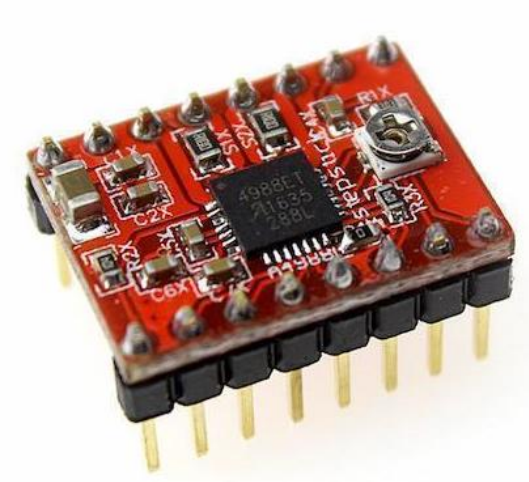


Figura 26 Controlador A4988

(Pololu Robotics & Electronics, 2010)

El driver opera en un rango de 8 hasta 35V con una corriente de 1A por fase (sin un disipador de calor) y tiene capacidad para soportar hasta 2A por bobina si hubiera suficiente refrigeración adicional (ver tabla 3).

Cuenta con micropasos hasta 1/16, control inteligente del consumo cuando el motor está parado y control ajustable de la corriente, El driver incorpora cinco posibilidades de movimiento: paso completo, medio paso, un cuarto de paso, un octavo de paso y la decimosexta parte de paso, por lo que resulta muy versátil a la hora de utilizarlo en diferentes proyectos o necesidades específicas de movimiento. (Pololu Robotics & Electronics, 2010)

Tabla 3 CARACTERÍSTICAS CONTROLADOR A4988

CARACTERÍSTICAS CONTROLADOR A4988	
Modelo	A4988
Color	Rojo o Verde
Intensidad máxima	2A
Tensión máxima	35V
Microsteps	16
Rs típico	0.05, 0.1 o 0.2
Fórmulas	I_max = Vref / (8 * Rs)
	Vref = I_max * 8 * Rs

El controlador A4988 es un puente H que se encarga de suministrar la corriente adecuada al motor NEMA 17. El Arduino envía señales de control al controlador A4988 para especificar a cuántos pasos debe moverse el motor y en qué dirección. Además, el controlador A4988 puede ajustar la corriente suministrada al motor, lo que permite un control más fino y protección contra sobrecalentamiento.

Finalmente se da a entender la sinergia que tienen estos componentes listados anteriormente con el fin de cumplir con el propósito de esta investigación.

El Arduino Mega 2560 actúa como centro de control del sistema. La capacidad de recopilar información ambiental, como la posición actual del sol y la ubicación geográfica, es extremadamente importante. Arduino utiliza algoritmos precisos para

procesar esta información y calcular la posición ideal que debe tomar el panel solar en relación con la trayectoria del sol. Una vez que el Arduino ha determinado la mejor posición para el panel solar, se activa el motor NEMA 17. Este motor, junto con un sistema de engranajes, se encarga de convertir las señales digitales en movimiento físico. Siguiendo las instrucciones de Arduino, el motor calculará el número exacto de pasos necesarios para cambiar la posición del panel solar. La capacidad de descomponer los movimientos en pasos individuales garantiza una precisión de alineación excepcional.

El controlador A4988 toma la iniciativa como intermediario entre el Arduino y el motor NEMA 17. Recopila señales del Arduino que indican el número y la dirección de los pasos que debe tomar el motor. El controlador no solo convierte estas señales al voltaje y la corriente adecuados para el motor, sino que también garantiza un movimiento suave y controlado y evita oscilaciones repentinas que pueden amenazar la estabilidad del sistema.

La ejecución física de los movimientos está a cargo de motores NEMA 17. Su paso preciso permite que el panel solar se mueva a la posición exacta especificada por el Arduino. Las propiedades mecánicas del controlador A4988 combinadas con controles electrónicos garantizan la regulación del fluido y un posicionamiento extremadamente preciso del panel.

2.6. VARIABLES DE CONTROL

El sistema de control que se plantea en este proyecto se basa en el movimiento de dos motores paso a paso que serán los encargados de posicionar la estructura en los ángulos correctos y en el momento adecuado, por lo que la variable a controlar será su velocidad de movimiento. Esta variable será calculada en todo momento durante un tiempo *t* definido, para su obtención, se deben tener en cuenta algunos parámetros adicionales como lo son las condiciones geográficas de la zona (Latitud, longitud y hemisferio), días transcurridos del año y hora actual (Reda & Nrel, 2005). Para obtener la posición en grados con el menor porcentaje de error posible es

necesario conocer dos ángulos fundamentales: el ángulo azimut y el ángulo de elevación los cuales se verán representados por cada motor respectivamente.

Para iniciar el control de la variable se le asignará un horario de trabajo de 12 horas por día (6am -18pm) a cada motor, que equivalen a un poco más del promedio de brillo solar estipulado para la zona. (IDEAM, 2015). Esto ayudará a tener un mayor aprovechamiento sin generar un sobreesfuerzo mecánico para la estructura. Basado en su horario de inicio (6am) se les indicará a los motores ponerse en posición listos para dar inicio al recorrido, para posicionarse, el programa indicará a los motores a qué grados se encuentra ubicado el sol en tiempo real, dependiendo de la orientación de la estructura, esta se dirigirá con un movimiento ligero a su primera posición. A partir de ese momento la estructura girará aproximadamente 15 grados cada hora, realizando un movimiento cada 4 minutos que es el tiempo estimado donde se genera un cambio de ángulo significativo, como lo demuestra David es su artículo, por lo que se les indicará a los motores la posición estimada mediante la carta solar calculada en el controlador (David et al., 2016).

Para obtener dicha posición con el menor porcentaje de error posible, es necesario conocer dos ángulos fundamentales: el ángulo azimut y el ángulo de elevación los cuales se verán representados por cada motor respectivamente.

2.6.1. ÁNGULOS DE POSICIONAMIENTO

Al igual que la posición de un punto en la Tierra se puede determinar mediante dos coordenadas, la latitud (o la distancia angular desde el ecuador) y la longitud (o la distancia angular desde una referencia o meridiano de Greenwich), también es posible determinar la posición de un astro desde cualquier perspectiva terrestre en particular, utilizando dos coordenadas que resultan siendo la clave para la orientación de los módulos fotovoltaicos: el ángulo de azimut y el ángulo de elevación. El primero es el ángulo sobre el plano del horizonte, medido entre la línea que une al observador con la proyección sobre el mismo plano de un

objeto en el cielo y la línea que va desde el observador al punto cardinal norte, en el sentido N-E-SO. El norte está por esto a 0° grados de azimut, el este a 90°, el sur a 180° y el oeste a 270°. (Lanciano & Camino, 2008)

El segundo ángulo es el que representa la altura, forma la visual al objeto observado con la línea que une al observador con la proyección del objeto sobre el horizonte. Por esto, la altura se mide desde el horizonte (0º) hasta el cénit (90º); se da una altura negativa cuando el objeto se encuentra por debajo del horizonte (el punto a 90º por debajo del horizonte (h = -90º) se denomina nadir).

Estos ángulos se hallan calculando lo que se denomina como “tiempo solar” que se define como el movimiento aparente del sol sobre el horizonte de un lugar.

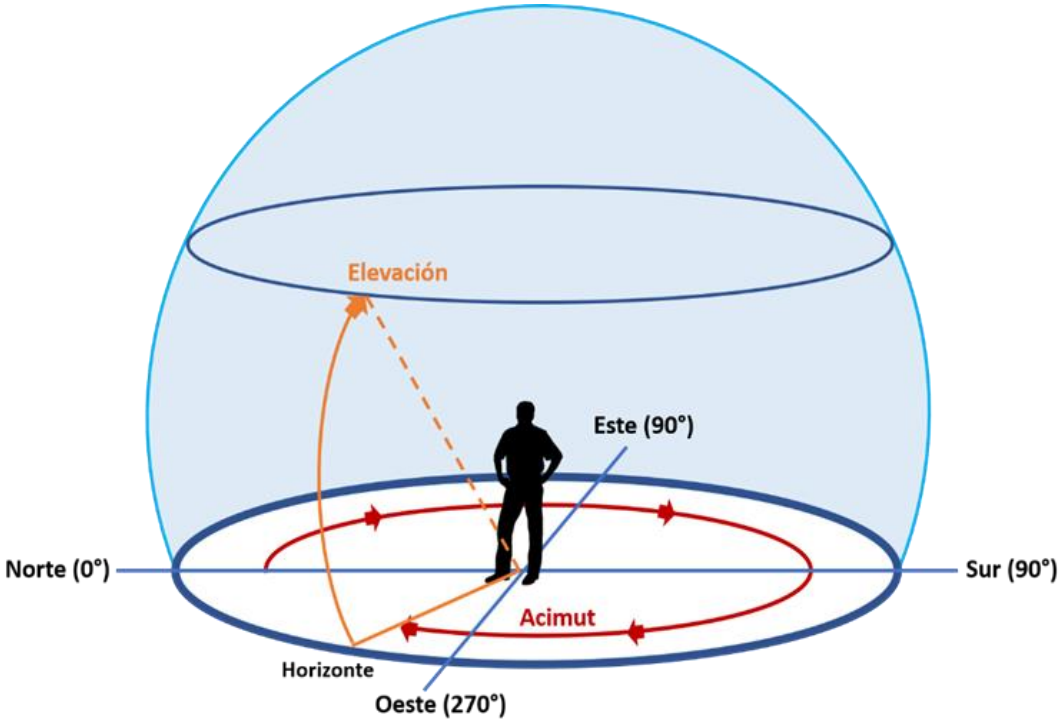


Figura 27 Orientación del observador

Fuente: Creación propia

2.6.2. CÁLCULO DEL TIEMPO SOLAR (LST):

Para el cálculo del tiempo solar se tienen en cuenta otros parámetros que deben ser previamente definidos, partiendo por el LSTM (Local Standard Time Meridian o El meridiano de hora estándar local) es un meridiano de referencia que se usa para una zona horaria particular y es similar al meridiano principal el cual hace referencia a la ecuación 1, luego hay que tener presente la hora actual del lugar en cuestión, seguido se aplica la ecuación 2 que hace referencia a EoT (Ecuación del Tiempo) , que es la encargada de corregir la excentricidad de la órbita de la tierra y la inclinación del eje, para encontrarla debemos obtener primero la variable B (ecuación 3) que depende de los días transcurridos del año hasta la fecha actual. A continuación, se calcula el TC (Factor de corrección de tiempo) que corresponde a la ecuación 4 que involucra la variación de la hora solar local (LST) dentro de una zona de tiempo dado la cual es representada en la ecuación 5, debido a las variaciones de longitud dentro de la zona horaria y también incorpora el EoT anterior. Con lo que ya se tiene todo lo necesario para el cálculo de la LST mediante el uso de las dos correcciones anteriores para ajustar la hora local (LT).

$$LSTM = 15° * UTC \quad (1)$$

UTC = Tiempo universal coordinado de la región (-5 horas para Colombia).

$$EoT = 9.87\ sin\ sin\ (2B)\ - 7.53\ cos\ cos\ (B)\ - 1.5 sin\ (B) \quad (2)$$

$$donde\ B = \frac{360}{365}(d)(-81) \quad (3)$$

d=Número de días del año transcurridos

$$TC = 4 * (Longitud - LSTM) + EoT \quad (4)$$

$$LST = LT + \frac{TC}{60} \quad (5)$$

Donde LT= Hora actual

2.6.3. ÁNGULO HORARIO Y DECLINACIÓN:

El valor aproximado de dichos ángulos deberá ser calculado constantemente en el transcurso del día, más exactamente durante las horas de brillo solar en Popayán

Los ángulos solares varían según la hora y la fecha actual, lo que los convierte en variables dependientes del tiempo y otros factores como el LSTM (Local Standard Time Meridian), la ecuación de tiempo (EoT), el factor de corrección de tiempo (TC), el tiempo solar local (LST), el ángulo horario (HRA) y la declinación.

La ecuación 6, expresada como

$$\mathrm{HRA}=15°(\mathrm{LST}\text{-}12) \tag{6}$$

Se utiliza para calcular el ángulo horario. El ángulo horario es un factor importante para determinar la posición del sol en el cielo en relación con un punto de referencia.

$$\delta = -23.45° * cos\left[\frac{360}{365}(d-10)\right] \tag{7}$$

Se utiliza para calcular la declinación. La declinación es la medida del ángulo entre el plano del ecuador terrestre y la línea que une el centro de la Tierra con el centro del sol. La declinación varía a lo largo del año debido a la inclinación del eje de la Tierra.

Finalmente, la ecuación 8, expresada como

$$\alpha = sin^{-1}[sin(\delta)sin(Lat) + cos(\delta)cos(HRA)] \tag{8}$$

Se utiliza para calcular el ángulo de altitud solar. El ángulo de altitud solar representa la elevación del sol en el cielo sobre el horizonte en un lugar específico.

Estas ecuaciones son fundamentales para comprender y calcular los ángulos solares en función de la hora, la fecha y la ubicación geográfica, y son utilizadas en diversas aplicaciones, como la energía solar y la navegación.

Finalmente, se procede a obtener el ángulo de azimut (Azimut) y la elevación (elevación), los cuales dependen de las variables dependientes L, S y HRA. La ecuación 9 se utiliza para calcular el ángulo de azimut y se expresa como:

$$Azimut = cos^{-1}\left[\frac{sin(\delta)cos(Lat) - cos(\delta)sin(Lat)cos(HRA)}{cos(\alpha)}\right] \quad (9)$$

Si LST es menor que 12, entonces se utiliza la ecuación 10 para calcular el valor del ángulo de azimut (Azimut):

$$si\ LST < 12\ \rightarrow Azimut\ =\ Azimut \quad (10)$$

Si LST es mayor que 12, se utiliza la ecuación 11 para calcular el ángulo de azimut (Azimut):

$$si\ LST > 12\ \rightarrow Azimut\ =\ 360° - Azimut \quad (11)$$

Estas ecuaciones son fundamentales para comprender y calcular los ángulos solares en función de la hora, la fecha y la ubicación geográfica, y son utilizadas en diversas aplicaciones, como la energía solar y la navegación.

CAPÍTULO III

3.1. CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA MECÁNICA DEL SISTEMA

En este capítulo se llevó a cabo la revisión de los diseños conceptuales mencionados anteriormente con el fin de llevar a cabo la realización del prototipo de manera real verificando las medidas y su diseño para luego aplicar el proceso de manufactura, En este capítulo se llevó a cabo la revisión de los diseños conceptuales mencionados anteriormente con el fin de llevar a cabo la realización del prototipo de manera real verificando las medidas y su diseño para luego aplicar el proceso de manufactura, Dando así el paso a el cumplimiento de la fase 5 basada en la metodología V-shape la cual se denominó como "Integración del sistema", esta etapa es crucial en este proceso ya que las distintas piezas y componentes individuales que se han diseñado y desarrollado hasta ahora comienzan a unirse. En la fase de integración, la atención se centra en ensamblar y conectar estos elementos en un sistema funcional y unificado.

Esta estructura se desarrolló en dos etapas donde la primera etapa hace referencia al primer grado de libertad que representa el ángulo azimut y la segunda etapa representa el ángulo de elevación incluyendo el soporte y sujeción del panel solar.

Etapa 1

En esta etapa se desarrolló la base del prototipo para la cual se utilizó una platina cuadrada con medidas de 10cm x 10cm y un espesor de 2cm, adjunto a ello se le soldó en cada esquina un tubo cuadrado de 29 cm x 1.2cm y espesor de 2cm, el cual se puede evidenciar en la figura 28.

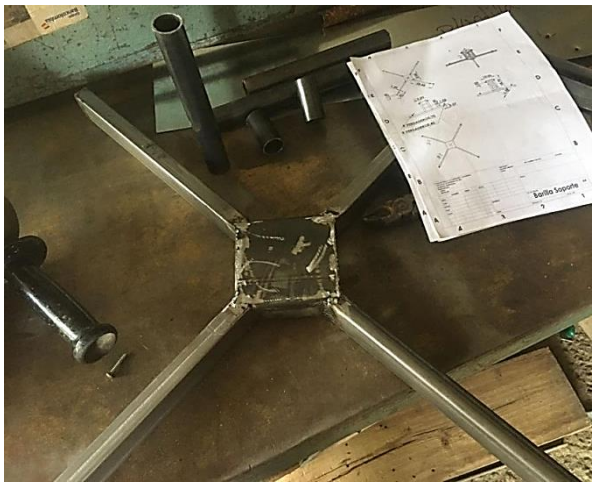


Figura 28 Base del prototipo del sistema

Fuente: Creación propia

A continuación, se consiguió un tubo circular de acero de 2 cm de diámetro para el cual se hicieron 4 cortes de 18cm cada uno para luego soldarlos en la base que se evidencio en la anterior figura que corresponde a figura 28. Con el objetivo de formar los pilares para la estructura como se muestra a continuación en la figura número 29.



Figura 29 Pilares estructura del sistema

Fuente: Creación propia

Lugo de tener los pilares de la base en su posición se procedió a soldar tubos circulares con las mismas propiedades ya mencionadas anteriormente pero esta vez en forma de diagonal en cada una de sus cuatro caras uniendo 2 de los tubos a su vez, al igual que en sus esquinas se le hizo una adaptación la cual sujeta un tubo a cada una de los tubos cuadrados de acero que se implementaron en un comienzo como el soporte principal todo esto con el propósito dar una mayor estabilidad a la estructura como se puede detallar a continuación en la figura número 30.



Figura 30 Estructura del sistema con soportes

Fuente: Creación propia

Por consiguiente, se hizo el corte de la platina con sus respectivos agujeros para la sujeción del primer motor la cual fue soldada en el extremo superior de los tubos circulares.





Fuente: Creación propia Fuente: Creación propia

En el siguiente paso se procedió a elaborar la platina que gira el primer motor e instalarla en su lugar correspondiente de la siguiente manera y a si dar por terminada la primera etapa de la estructura



Figura 33 Estructura con base segundo eje

Fuente: Creación propia



Figura 34 Estructura con base segundo eje

Fuente: Creación propia

En el momento en que se obtiene la primera parte de la estructura al hacer algunas pruebas y al saber el peso que debe cargar la estructura se tuvo que diseñar e implementar una transmisión por cadena para así aumentar el torque del motor con el objetivo de mover con solvencia el peso de toda la estructura en conjunto

3.2. TRANSMISIÓN POR CADENA

Una transmisión por cadena consiste en una cadena articulada adaptada a una rueda dentada, que actúa como una polea, formando un engranaje. Es adecuado para ocasiones en las que la distancia entre centros de los ejes impulsor e impulsado es demasiado corta para usar una correa y demasiado larga para usar un engranaje. (Avello, 2014)

Luego de realizar el montaje completo de la estructura se le realizaron pruebas para determinar el correcto funcionamiento de cada uno de los motores bipolares soportando las cargas suministradas. Estos motores se caracterizan por su resistencia, por tener un voltaje nominal hasta de 24v dc y por su gran fuerza, siendo capaz de cargar con hasta 4,28 kg/cm, ideal para realizar tareas exigentes que

requieren movimientos precisos. Sin embargo, a pesar de su gran capacidad no cuentan con la energía suficiente para realizar los movimientos requeridos sin limitaciones por lo que fue necesario adaptar un sistema de apoyo para los motores que sirvan como complemento para que sean capaces de trabajar correctamente bajo el esfuerzo que deben realizar.

Para solucionar esta limitación de potencia mecánica se decidió adaptar a cada motor un sistema de transmisión por cadena, sistemas utilizados comúnmente en máquinas de transporte (bicicletas, motos) y en máquinas motrices (perforadoras petroleras) por sus características, entre ellas que no existe resbalamiento, gracias al material de la cadena poseen mayor resistencia que en un sistema de poleas. Esto se logró empleando dos ruedas dentadas de diferente diámetro *d* y diferente número de dientes adaptadas en ejes paralelos separados a una distancia *L* formando así un mecanismo articulado con el que se pretende aumentar el torque de salida lo suficiente para mover todo el mecanismo.

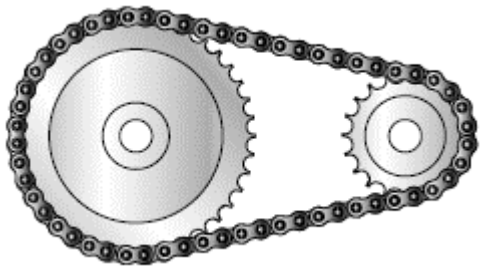


Figura 35 Sistema de transmisión de cadena

(*Mecanismos de Transmisión Circular*, s. f.)

Para llevar este montaje a cabo se necesitaron conocer algunas de las características del motor, entre ellas su par, y diámetro del eje con las que se calculará su fuerza bajo los principios de engranaje (BUDYNAS, RICHARD G. NISBETT, 2014) y de esa manera determinar el nuevo torque de salida utilizando

dos piñones de dientes cónicos en relación, uno adaptado al eje motriz y otro que será el piñón impulsado mediante una cadena cinemática

La ecuación 12, representa la relación entre el torque (τ) y la fuerza (F) aplicada en un eje, multiplicada por la distancia radial (d). En este caso, se utiliza el subíndice (α) para indicar que se refiere al eje motriz. Así como las ecuaciones 13 y 14 que son las que representan de forma numérica el empleo de la ecuación 12 con el fin de obtener el valor de la fuerza

$$\tau = F * d \Rightarrow \tau\alpha = F * d\alpha \quad (12)$$

$$0.45\ Nm = F * 0.0025m \quad (13)$$

$$\frac{(0.45\ Nm)}{(0.0025\ Nm)} = F = 180N \quad (14)$$

La ecuación 15 muestra el cálculo del nuevo torque de salida (τα) al multiplicar la fuerza (180N) por una distancia radial (0.013m), seguido de la ecuación 16 define la relación de transmisión (α) del motor, que se calcula dividiendo el número de dientes del piñón motriz entre el número de dientes del piñón impulsado.

$$\tau\alpha = 180N * 0.013m = 2.34Nm \quad (15)$$

$$Relación\ de\ transmisión\ motor\ \alpha = \frac{32}{12} = 2.667 \quad (16)$$

La ecuación 17 indica cómo se calcula el torque (Torque) multiplicando la relación de transmisión (relación) por el torque de salida (τα), así mismo se indica en las ecuaciones 17, 18, 19 y 20 el proceso para obtener en valores exactos del torque el cual representa la carga máxima que el sistema puede soportar.

$$Torque = relación * \tau\alpha \quad (17)$$

$$Torque = 2.667 * 2.34\ Nm = 6.24Nm \quad (18)$$

$$6.24Nm = 63kg * cm \quad (19)$$

$$63.63\ kg * cm \quad (20)$$

De esta manera el sistema se complementa siendo capaz ahora de realizar movimientos soportando cargas de hasta 63 kg, mejorando considerablemente su rendimiento, ya que soporta casi 3 veces la carga a la que será sometida (20kg). Al sistema además se le añadieron algunos rodamientos para lograr movimientos suaves en cada eje impulsado.

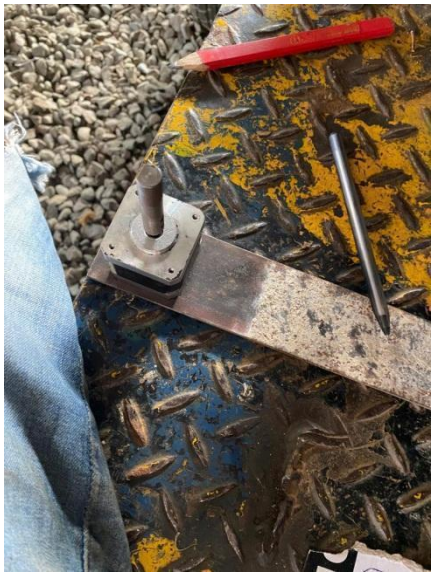


Figura 36 Creación base sujeción de motor

Fuente: Creación propia

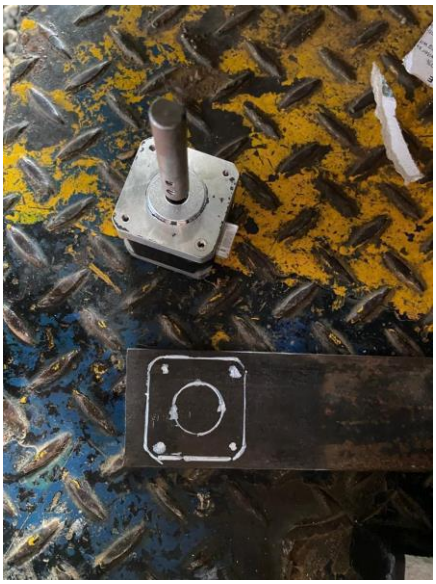


Figura 37 Creación base sujeción de motor

Fuente: Creación propia



Figura 38 Base primer eje con trasmisión de cadena

Fuente: Creación propia

Etapa 2

En esta etapa se partió de la fabricación de una platina con las especificaciones que se pueden evidenciar en la figura 39. La cual es la base para desarrollar de la mejor manera la fase 2 del prototipo.

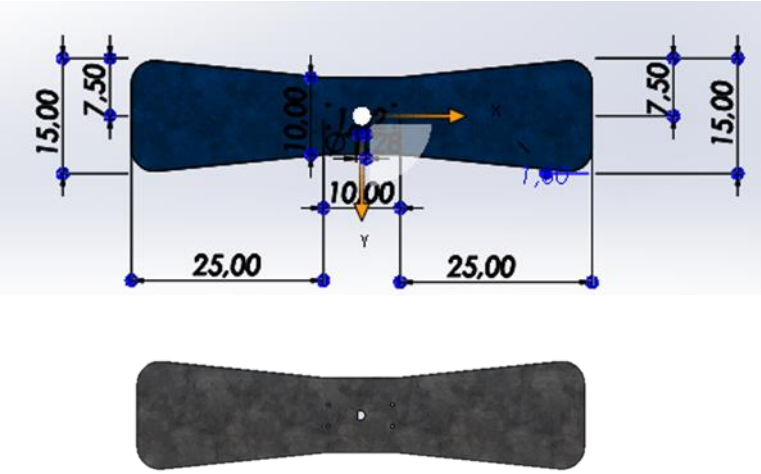


Figura 39 Diseño CAD Platina para base segundo eje del sistema

Fuente: Creación propia

Asimismo, se procedió a realizar los parales, como se puede evidenciar en la figura 40. así mismo agregándole a cada uno una balinera la cual nos ayudará a que el eje del Ángulo de elevación tenga un desplazamiento sin esfuerzo para luego proceder a integrarlos por medio de soldadura a la platina teniendo en cuenta la posición establecida como se puede observar en la figura 41.



Figura 40 Creación parales segundo eje

Fuente: Creación propia



Figura 41 Implementación parales segundo eje

Fuente: Creación propia

A continuación, se adaptó el motor, se construyó el eje y se integró todo lo relacionado con el Ángulo de elevación como lo fue el sistema de transmisión por cadena el cual se puede evidenciar en la figura 42.



Figura 42 Base segundo eje con trasmisión de cadena

Fuente: Creación propia

Finalmente, se creó el soporte en el cual van a reposar los paneles solares el cual se adapta a la estructura por medio de un par de tornillos que van sujetados al eje del Ángulo de elevación del prototipo el cual se puede observar en la figura número 43.



Figura 43 Fase 2 del prototipo

Fuente: Creación propia

3.3. ESQUEMA DE CONEXIÓN

Inicialmente, se presenta el esquema de conexión el cual se encuentra en la figura 44, también se da a conocer el proceso que conlleva conectar un motor NEMA 17 a un CNC Shield V3 el cual para este sistema se necesitan 2 motores los cuales representan los ángulos acimut y elevación.

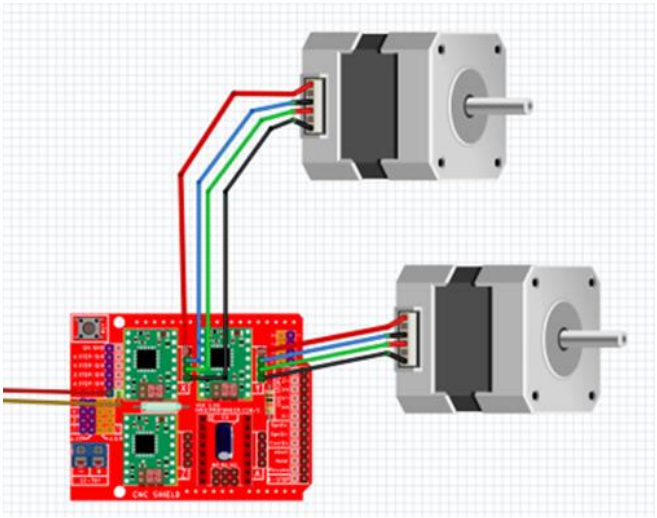


Figura 44 Conexión motor nema 17 y CNC shield v3

El primer paso es identificar los pines en el CNC Shield V3: El CNC Shield V3 es una placa de expansión para controladores de motores paso a paso en aplicaciones de CNC. Tendrá terminales marcados para los pines del motor. Dependiendo de cómo hayas configurado los jumpers en el shield, los pines pueden estar etiquetados como A1, A2, B1 y B2 o como X, Y, Z y A.

En segundo lugar, los cables del motor deben coincidir con los pines apropiados en el CNC Shield V3. Se debe seguir el estándar del motor paso a paso en el orden de conexión. El siguiente tipo de conexión es el más típico:

- El terminal A1 o X en el CNC Shield V3 debe recibir el cable rojo o el cable con la letra "A" del motor.

- Conecte el cable azul del motor o el cable con la letra "A-" al terminal A2 o Y del CNC Shield V3.
- Conecte el cable verde del motor o el cable con la letra "B" al terminal B1 o Z del CNC Shield V3.
- En el CNC Shield V3, conecte el cable negro del motor o el cable designado "B-" a la terminal B2 o A.

Luego se deben rectificar que no haya cables sueltos que puedan provocar cortocircuitos y que las conexiones estén seguras.

Por último, es necesario configurar los parámetros del controlador en el programa de arduino antes de poder utilizar el motor. Lo que implica ajustar la corriente del motor, la resolución de pasos y las velocidades de movimiento.

Luego se continúa con el diagrama de conexión de la brújula HMC5883 y el arduino mega el cual se puede observar en la figura () donde se deben tener en cuenta una serie de recomendaciones, para las conexiones en físico se debe conectar, el pin de 5V del Arduino al pin VCC de la brújula. Así como el pin GND de la brújula debe estar conectado al pin GND de Arduino, se conecta además entre los pines SDA (pin 20). Por último conectan los pines SCL de la brújula y del Arduino Mega (pin 21).

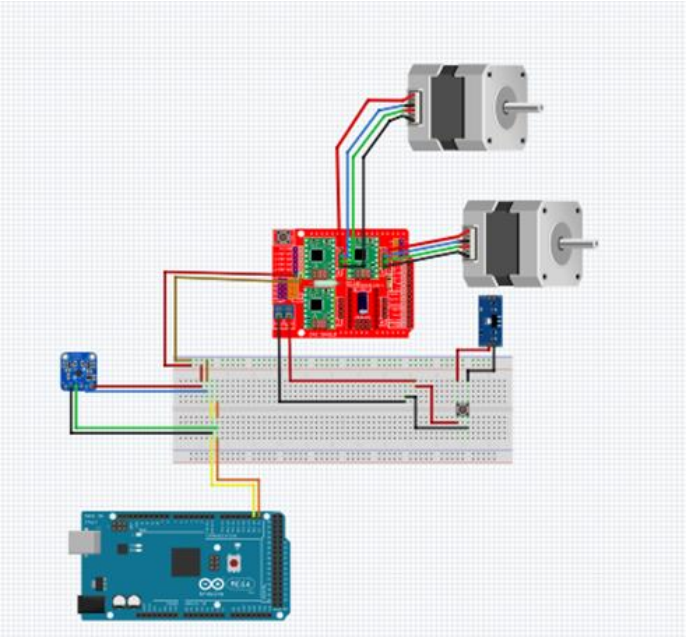


Figura 45 conexión motor nema 17, CNC shield v3 y brújula hmc5883

Con respecto al software, lo primero que se debe hacer es verificar que el entorno de desarrollo Arduino tenga instalada la biblioteca "Wire" y la biblioteca "HMC5883L", para luego incluir al comienzo de su boceto. las bibliotecas como se pueden apreciar a continuación

```
#include <Wire.h>

#include <MechaQMC5883.h>
```

3.4. CONSTRUCCIÓN CIRCUITO ELECTRÓNICO

En el proceso de construcción de un circuito electrónico se debe llevar a cabo la interconexión de componentes electrónicos, como resistencias, capacitores, transistores, diodos y circuitos integrados, con el objetivo de crear un sistema funcional que pueda realizar tareas específicas. Estos componentes se montan en una placa de circuito impreso (PCB) o se conectan mediante cables en un protoboard, dependiendo del nivel de complejidad del circuito.

El proceso de construcción de un circuito electrónico implica varias etapas. Primero se crea un diseño de circuito en papel o utilizando software CAD, en este caso Fritzing. El diseño de las pistas conductoras en la PCB, la selección de componentes y la ubicación de los componentes están incluidos en este diseño, el cual se puede evidenciar en la figura 46.

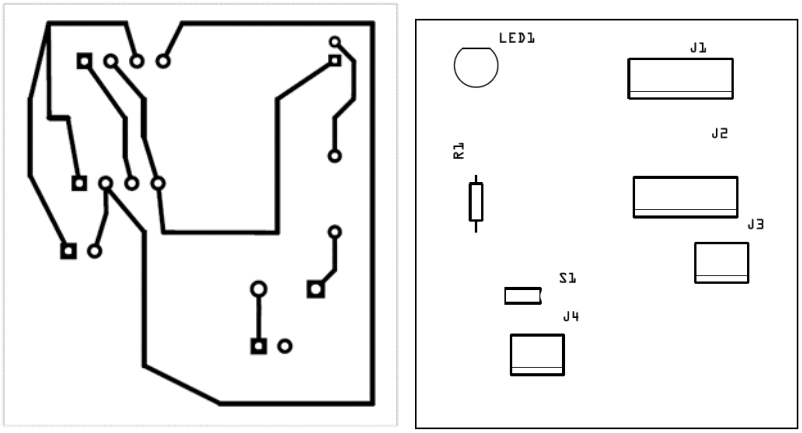


Figura 46 Circuito electrónico en fritzing y máscara de componentes

Una vez que se ha completado el diseño, se procede a alistar la placa (PCB),

Un método muy eficaz de creación de prototipos en esta situación es la técnica de planchado, también conocida como "método del tóner transfer", Esta técnica transfiere con precisión el diseño del circuito impreso a la placa utilizando las características del tóner utilizado en las impresoras láser y una placa de cobre.

Después de crear el diseño, se utiliza una impresora láser para imprimirlo en una hoja de papel. Es importante recordar que para que la transferencia sea correcta, el diseño debe imprimirse en modo espejo.

Luego de imprimir el diseño, se procede a preparar la placa de cobre, que es la base sobre la cual se construirá el circuito. Para eliminar cualquier suciedad o capa protectora, la placa se limpia y pule. Luego, la placa se dimensiona adecuadamente de acuerdo con el diseño del circuito.

A continuación, se coloca la hoja de diseño del circuito impreso sobre la placa de cobre, asegurándose de que el lado impreso esté en contacto directo con la placa. Use una plancha doméstica para aplicar calor y presión a la hoja. El calor derrite el tóner y lo adhiere a la placa de cobre, transfiriendo el diseño del circuito.

Una vez que se ha aplicado suficiente calor y presión, la placa se sumerge en agua la cual ablanda el papel, lo facilita su eliminación sin dañar el diseño del circuito transferido. Después de retirar el papel, se puede observar el diseño del circuito impreso en la placa de cobre.

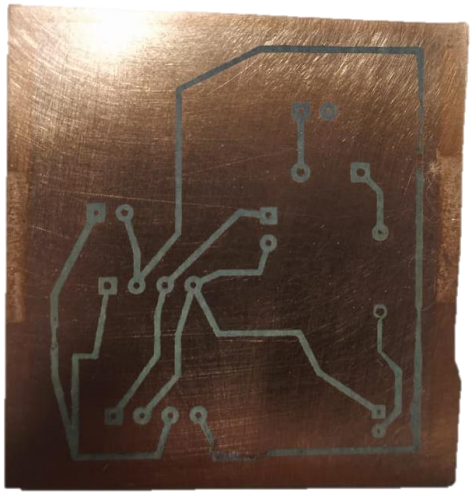


Figura 47 Circuito electrónico con método del tóner transfer

A continuación, se sumerge la placa en un agente corrosivo, como ácido férrico, para eliminar el cobre no deseado y dejar expuestas únicamente las pistas y componentes del circuito. Después de cierto tiempo, la placa se retira del agente corrosivo y se enjuaga con agua para detener el proceso de corrosión. Y luego se perforan agujeros en el tablero para poder insertar los componentes.

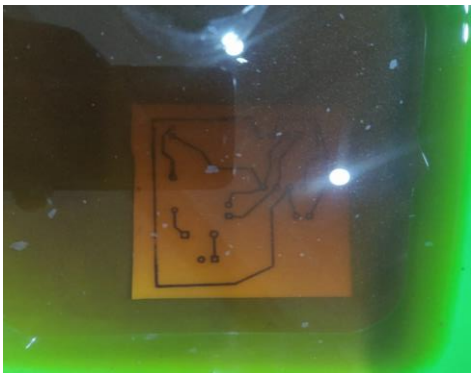


Figura 48 circuito electrónico en fritzing y máscara de componentes

Luego, se procede al montaje, el cual involucra la soldadura de los componentes en la PCB siguiendo el diseño establecido previamente. Es fundamental tener en cuenta las tolerancias de los componentes y seguir las especificaciones de soldadura adecuadas para garantizar una conexión eléctrica sólida y confiable.

Después de completar el montaje, el circuito se prueba y se examina para asegurarse de que el circuito funcione correctamente. Esto puede implicar la medición de voltajes, corrientes y señales en diferentes puntos del circuito, así como el uso de instrumentos de prueba y equipos de diagnóstico.

3.5. CONTROL DEL SISTEMA

Los sistemas de control son dispositivos que se utilizan para manejar y regular el comportamiento de sistemas dinámicos, como pueden ser procesos industriales, vehículos, aeronaves, robots, entre otros. (Ogata, 2013) Los sistemas de control se pueden clasificar en dos categorías principales: lazo abierto y lazo cerrado.

Un sistema de control en lazo abierto es aquel en el cual la salida del sistema no influye en la entrada o en la acción de control. En este tipo de sistemas, la señal de entrada se convierte en una señal de salida sin que se realice una comparación entre ambas (Dorf & Bishop, 2005), en otras palabras, no se toma en cuenta la respuesta del sistema para ajustar la entrada y lograr una salida deseada. Los sistemas de control en lazo abierto son simples y económicos, pero son propensos

a errores, ya que no se puede corregir la salida si hay perturbaciones externas o si las condiciones del sistema cambian.

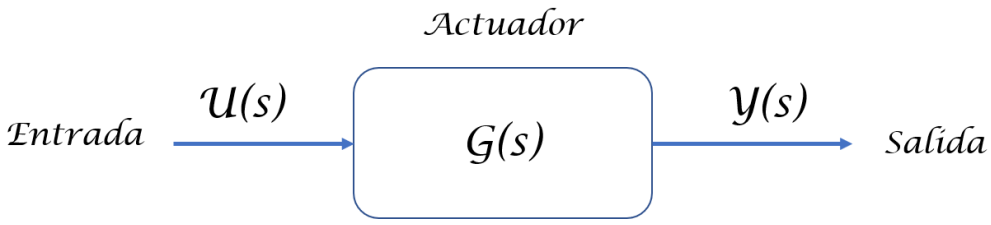


Figura 49 Representación Control en lazo abierto

Por otro lado, un sistema de control en lazo cerrado es aquel en el cual la salida del sistema se compara con una referencia o valor deseado, y se utiliza esta información para ajustar la entrada y mantener la salida en un valor deseado. (Dorf & Bishop, 2005) En este tipo de sistemas, se mide la salida del sistema y se la compara con una señal de referencia, lo que permite detectar errores y corregirlos mediante una acción de control. Los sistemas de control en lazo cerrado son más complejos y costosos que los de lazo abierto, pero son más precisos ya que pueden compensar las perturbaciones externas y las variaciones del sistema.

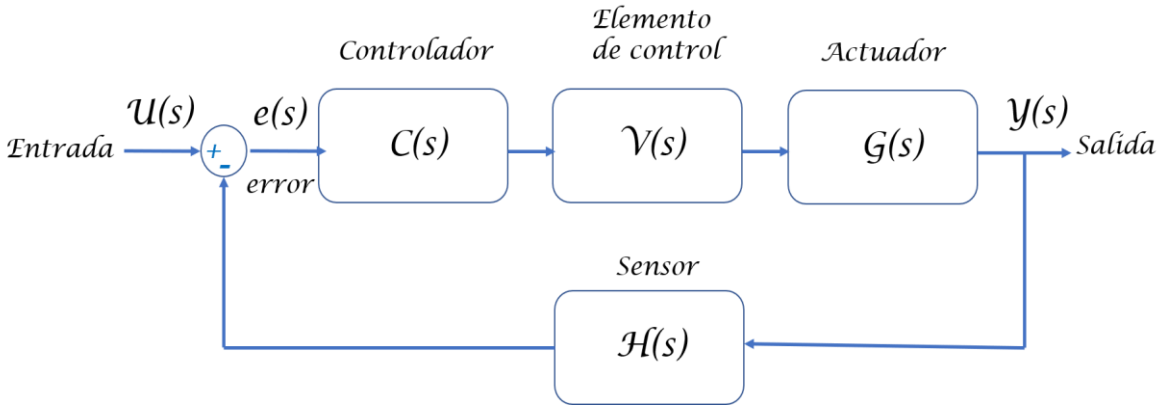


Figura 50 Representación Control en lazo cerrado

3.5.1. OBTENCIÓN FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA

Para realizar el diseño de un controlador es indispensable obtener su modelo matemático; existen varios métodos para obtener dicho modelo de planta, tales como el análisis de respuesta en frecuencia, respuestas de impulso, identificación de sistemas y modelamiento matemático, en cualquiera de los casos, primero hay que entender las características y el comportamiento de la planta. (Nise et al., 2011) En este caso, la planta se compone de un par de motores configurados para realizar movimientos angulares respecto a una posición en un tiempo específico. En este proyecto, para conocer su función de transferencia (FDT) se decidió partir de una identificación de sistemas con un acoplamiento indirecto ya que es un método práctico y rápido, que consiste en una recolección de datos experimentales. Esto se puede lograr aplicando una programación básica a dichos motores para realizar un movimiento en ángulos a una posición deseada, registrando dicho comportamiento (entradas y salidas) y minimizando el error para que el modelo y los datos obtenidos del mundo real representen el menor error posible.

Luego de tener los datos listos, estos deben ser procesados. En esta oportunidad se utilizó un toolbox de Matlab, conocido como System Identification (ver figura 51) ya que es una herramienta que permite cargar los datos experimentales, los analiza mediante técnicas estadísticas y de esa manera construye el modelo matemático que describe el sistema (ver figura 52). En la figura 53 se presenta la respuesta del sistema con un setpoint de 180 grados y fit de estimación.

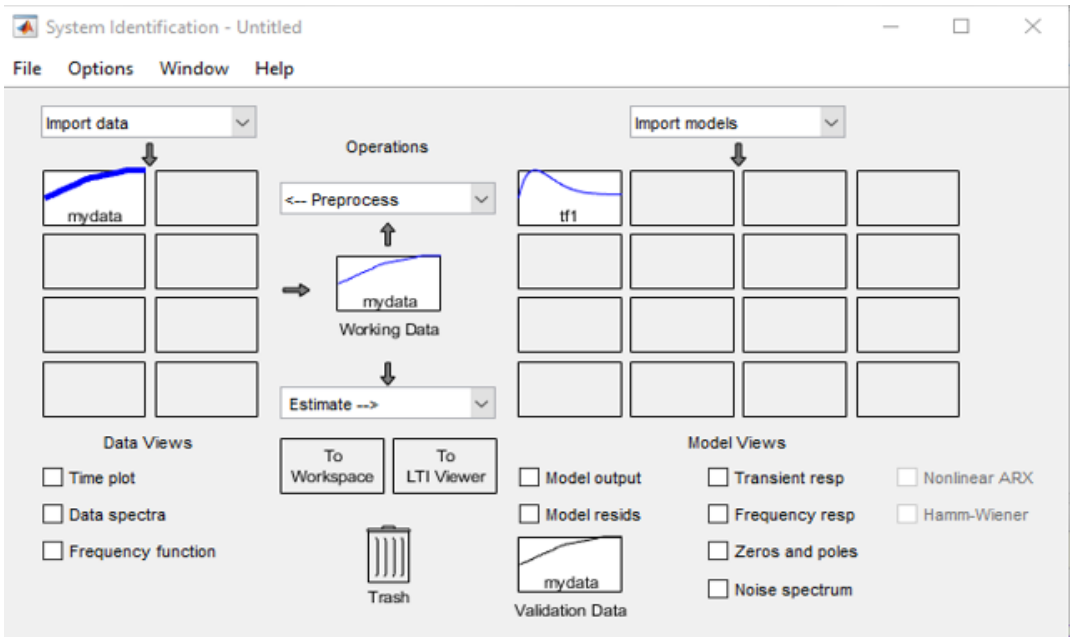


Figura 51 Importación de datos adquiridos

Fuente: creación propia

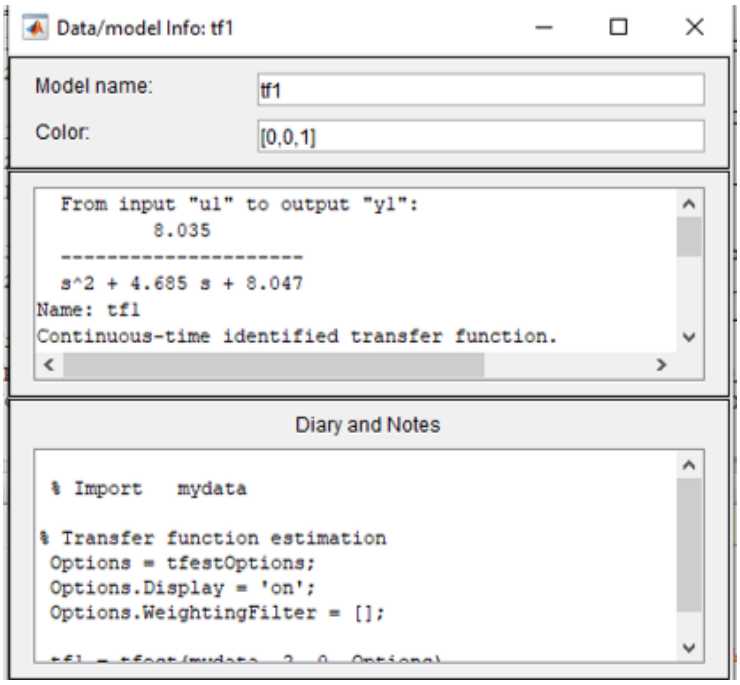


Figura 52 Obtención de FDT en tiempo continuo

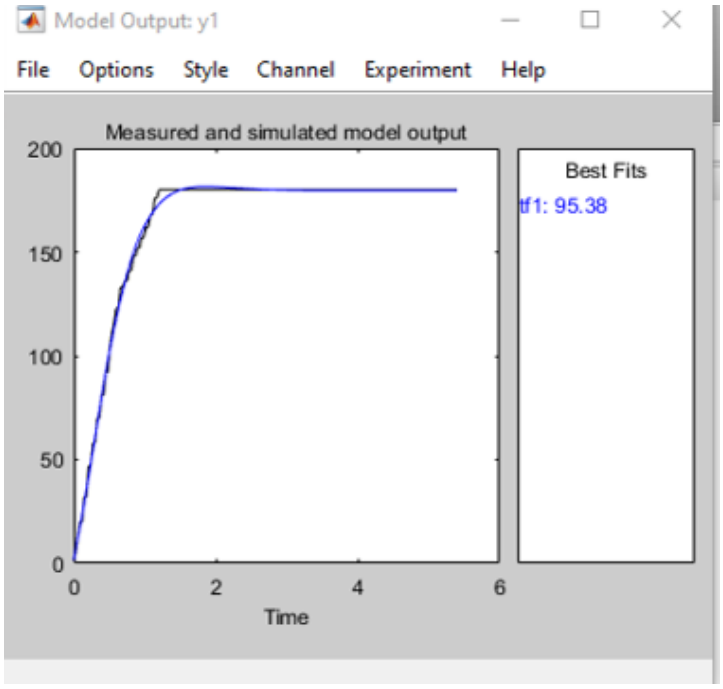


Figura 53 Respuesta del sistema con un setpoint de 180 grados y fit de estimación

CRITERIOS DE DISEÑO:

Luego de haber identificado los parámetros de la planta en lazo abierto (Tiempo de la planta, tiempo equivalente, frecuencia natural, retardo), hay que identificar, además, el orden de la misma, luego, se pasa a definir los criterios de diseño los cuales se centran en garantizar que el controlador digital pueda cumplir con los requisitos de rendimiento del sistema, como la estabilidad, la precisión, la velocidad de respuesta y la robustez. Para eso debemos conocer 4 parámetros:

a. Tiempo de muestreo (Ts): Define cada cuanto tiempo se toma la señal de la planta del mundo físico.
b. Coeficiente de amortiguamiento (Zheta): Define que tan amortiguada será la respuesta en lazo cerrado con control
c. Tiempo de establecimiento (Tssd): Define en cuánto tiempo se estabiliza la planta
d. Frecuencia del sistema (w): Hace referencia a que tan rápido responde el sistema controlado.

Luego, se hace uso del criterio del 2% para determinar el tiempo de establecimiento (Tss) expresado en la ecuación 21, el cual se estima en 1.4 segundos. A partir de esta estimación, se calcula el valor de Tssd utilizando la ecuación 22. Posteriormente, se realiza el cálculo de los demás parámetros según las ecuaciones que van desde la (23) a (32). Los resultados obtenidos para cada parámetro son los siguientes:

$$Tss = 1.4s \qquad (21)$$

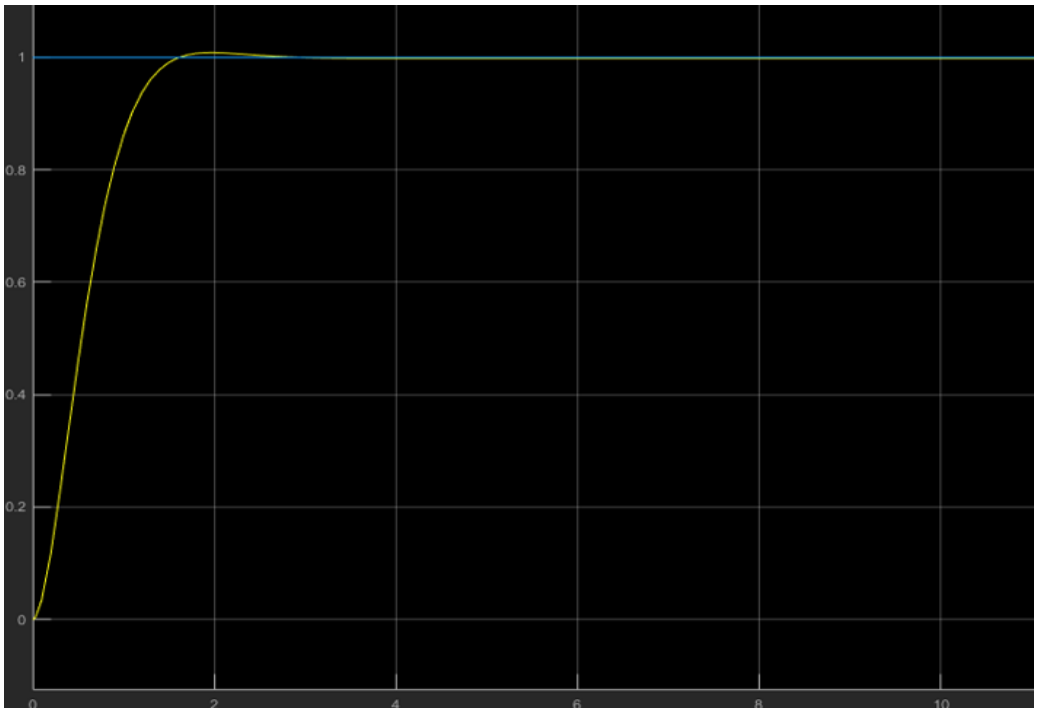


Figura 54 Simulación de la planta

$$Tssd = (1.1 - 1.5) * Tss \quad (22)$$

$$Tssd = (1.1 - 1.5) * 1.4s \quad (23)$$

Entonces:

$$1.54s < Tssd < 2.1s \quad (24)$$

$$2\zeta Wn = 4.685 \quad (25)$$

Donde

$$Wn^2 = 8.05 \quad (26)$$

$$\zeta = \frac{4.985}{(2 * Wn)} = 0.82 \quad (27)$$

$$W = \frac{4}{(Tssd * \zeta)} \quad (28)$$

$$W = \frac{4}{1.6 * 0.82} = 3.05 \quad (29)$$

$$Teq = \frac{1}{(\zeta * Wn)} = 0.43 \quad (30)$$

$$Ts = 0.2 * (Teq) < Ts < 0.6 * (Teq) \quad (31)$$

$$0.08 < Ts < 0.26 \quad (32)$$

Todos estos datos deben ser hallados y calculados ya que son necesarios para la implementación del controlador

3.5.2. CONTROL RST

El control RST es un tipo de controlador digital que se utiliza comúnmente en aplicaciones de control de procesos y sistemas de control de retroalimentación. El término RST se refiere a los coeficientes del polinomio de referencia del controlador, donde R, S y T son los coeficientes correspondientes. Los controladores RST surgieron en la década de 1980 como resultado de investigaciones y avances en el campo del control digital. Diversos estudios teóricos y prácticos han demostrado que los controladores RST pueden proporcionar un mejor rendimiento y una mayor adaptabilidad en comparación con los controladores PID convencionales, especialmente en sistemas con requisitos de respuesta transitoria rápidos o cambios en la dinámica del proceso. (Sanford et al., 2014)

Para llegar al control existen varias rutas que se pueden tomar, en este caso, se decidió partir creando un control PID analógico, con la ayuda de Matlab crear este tipo de controles puede ser bastante práctico utilizando El PID Tuner de MATLAB, una herramienta de ajuste de controladores PID perfecta para sintonizar y optimizar los controladores de manera eficiente. El PID Tuner utiliza técnicas avanzadas de optimización para ajustar automáticamente los parámetros del controlador PID de acuerdo con los requisitos y especificaciones del sistema de control. Puede trabajar tanto con sistemas de control continuos como discretos. Al utilizarlo, primero se

debe especificar el modelo del sistema que se desea controlar. Se puede ingresar el modelo del sistema directamente en la interfaz gráfica del PID Tuner o utilizar un modelo previamente definido en MATLAB. Una vez que el modelo del sistema está especificado, el PID Tuner utiliza diferentes métodos de optimización y criterios de rendimiento para ajustar los parámetros del controlador PID. Una vez que el PID Tuner haya ajustado los parámetros del controlador PID, puedes analizar y evaluar el rendimiento del sistema controlado utilizando herramientas de MATLAB como el diagrama de respuesta al escalón, el diagrama de Bode y otros análisis de respuesta en el dominio del tiempo y de la frecuencia.

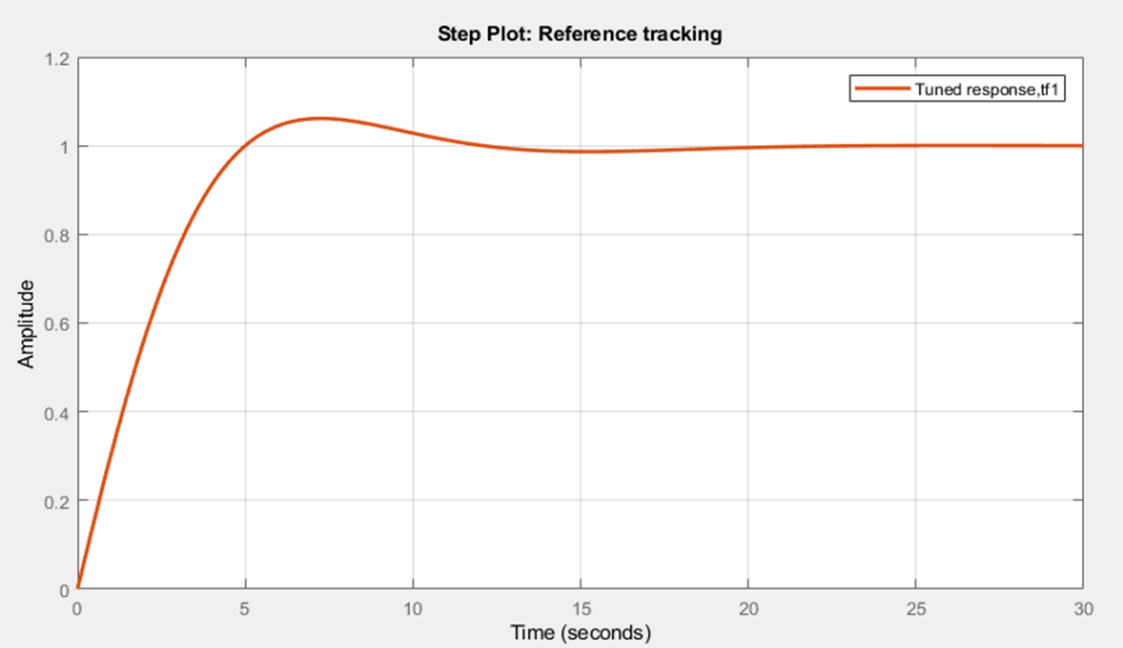


Figura 55 Simulación en Matlab PID Tuner

En la "Figura 55 Simulación en Matlab PID Tuner" se presentan las ecuaciones que representan el controlador PID ajustado utilizando la herramienta PID Tuner de MATLAB. Los parámetros ajustados son representados por las ecuaciones 33, 34, y 35

$$Kp = 2.013 \quad (33)$$

$$Ki = 4.073 \quad (34)$$

$$Kd = 0.2198 \quad (35)$$

Entonces utilizando los valores anteriores, se calculan los siguientes parámetros del controlador PID que están expresados en las ecuaciones 36 y 37.

$$Ti = Kp/Ki = 0.49 \quad (36)$$
$$Td = Kd/Kp = 0.109 \quad (37)$$

El controlador PID resultante se representa mediante la función de transferencia dada en la ecuación 38

$$PID(s) = Kp\,(1 + \frac{1}{Tis} + Tds) \quad (38)$$

Sustituyendo los valores calculados, la función de transferencia final del controlador PID está dada en la ecuación:

$$PID(s) = \frac{0.1s^2 + 0.49s + 1}{0.49s} \quad (39)$$

Estas ecuaciones representan el controlador PID optimizado para el sistema de control bajo estudio, lo que permitirá analizar y evaluar su rendimiento utilizando herramientas de MATLAB, como el diagrama de respuesta al escalón y el diagrama de Bode, entre otros análisis en el dominio del tiempo y de la frecuencia.

Luego de sintonizar el PID correctamente, el siguiente paso es enmascarar el PID en un RST resolviendo la ecuación canónica hallando los polinomios correspondientes y declarando a R=T.

$$S(q^{-1}) = 1 - q^{-1} \quad (40)$$
$$R(q^{-1}) = T(q^{-1}) = r0 + r1q^{-1} + r2q^{-1} \quad (41)$$

Donde los valores de r0, r1 y r2 están dados en las ecuaciones 42,43 y 44

$$r0 = kp\left(1 + \frac{1}{Tis + Tds}\right) = 4.83 \quad (42)$$

$$r1 = -kp\left(1 + \frac{2Td}{Ts}\right) = -6.84 \quad (43)$$

$$r2 = \frac{Kp * Td}{Ts} = 2.41 \quad (44)$$

Entonces se tiene:

$$\frac{R(q^{-1})}{S(q^{-1})} =)\frac{(4.83\ -\ 6.84\ (Sq^{-1}) + 2.41Sq^{-1})}{(1 - (Sq^{-1})} \quad (45)$$

En términos de exponentes positivos:

$$\frac{R(q)}{S(q)} = \frac{4.83q^2\ -\ 6.84\ q^1 + 2.41}{q^2 - q} \quad (45)$$

La ecuación 45 representa la forma enmascarada del controlador PID en el dominio discreto, con los coeficientes correspondientes ajustados según la sintonización realizada previamente.

3.5.3.REALIZACIÓN CANÓNICA

La realización canónica hace referencia a la conversión de un bloque de control a ecuaciones de recurrencia que son susceptibles de ser programadas es un controlador. Es un método utilizado para representar sistemas de control mediante el uso de variables de estado y ecuaciones de evolución temporal. Proporciona una forma estructurada y sistemática de describir el comportamiento dinámico de un sistema de control y es útil para el análisis y diseño de sistemas de control.

Partiendo de la estructura general de un controlador digital compuesto por dos bloques donde se codifican 3 polinomios (polinomio R, S y T) que forman funciones de transferencia en tiempo discreto, hasta conseguir representarlas en una ecuación en recurrencia donde la salida se convertirá en la ley de control compuesta por el setpoint y la señal de error

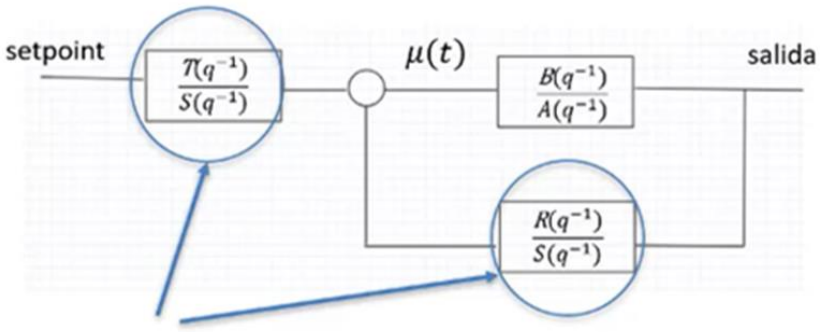


Figura 56 Gráfico polinomios R S T

$$\mu[kh] = ni * e[kh] + (a_{-1}q^{i-1} + a_{i-2}q^{i-2} + \dots a0) * \chi[kh] \quad (46)$$

La primera característica que debe cumplir el sistema es que la función debe ser estrictamente propia (orden del numerador < orden del denominador).

$$\frac{R(q)}{S(q)} = \frac{4.83q^{2} - 6.84\,q^{1} + 2.41}{q\ 〚\hat{}2〛 - q} \quad (47)$$

Siendo estrictamente propia en términos de entrada y salida del error:

$$\frac{\mu[kh]}{e[kh]} = 4.83 - \frac{2.01 + 2.41}{q^{2} - q} \quad (48)$$

Luego de asegurarse de cumplir la primera condición, se despeja la salida y se declara una variable auxiliar y de ella se despeja el error teniendo en cuenta la variable de mayor desplazamiento.

$$\frac{\mu[kh]}{e[kh]} = n_4 + \frac{a_3q^3 + a_2q^2 + a_1q + a_0}{q^4 + d_3q^3 + d_2q^2 + d_1q + d_0} \quad (49)$$

$$\mu[kh] = n_4e[kh] + \frac{a_3q^3 + a_2q^2 + a_1q + a_0}{q^4 + d_3q^3 + d_2q^2 + d_1q + d_0}e[kh] \quad (50)$$

$$x[kh] = \frac{e[kh]}{q^4 + d_3q^3 + d_2q^2 + d_1q + d_0} \quad (51)$$

$$e[kh] = \ (q^4 + d_3q^3 + d_2q^2 + d_1q + d_0)x[kh] \tag{52}$$

$$e[kh] = \ x[kh + 4h] + d_3\, x[kh + 3h] + d_2\, x[kh + 2h] + d_1\, x[kh + h] + d_0\, x[kh] \tag{53}$$

entonces

$$\mu[kh] = \ 4.83 \ - \ \frac{2.01 \ + \ 2.41}{q^2 - q} * \ e[kh] \tag{54}$$

$$Variable\ aux\colon x[kh] = \frac{e[kh]}{q^2 - q} \tag{55}$$

$$\Rightarrow e[kh] = \ x[kh] * (q \ \ ^2 - q) \tag{56}$$

$$e[kh] = \ x[kh + 2h] \ - \ x[kh + h] \tag{57}$$

Variable de mayor desplazamiento:

$$x[kh + 2h] = e[kh] + x[kh + h] \tag{58}$$

Seguido, se seleccionan los estados que dependen del orden de la planta:

$$x1[kh] = x[kh] \tag{59}$$

$$x2[kh] = x[kh + h] \tag{60}$$

Se desplazan los estados:

$$x1[kh + h] = x[kh + h] = x2[kh] \tag{61}$$

$$x2[kh + 2h] = e[kh] \ + x[kh + h] \tag{62}$$

Finalmente, se procede a obtener la salida del controlador:

$$\mu[kh] \ = \ 4.83e[kh] \ - 2.01x[kh + h] + 2.41x[kh] \tag{63}$$

$$\Rightarrow \ \mu[kh] \ = \ 4.83e[kh] \ - 2.01\ x2[kh] + 2.41\ x1[kh] \tag{64}$$

En espacio de estados:

$$\mu[kh] = [x_1[kh+h]\ x_2[kh+h]\ x_3[kh+h]\ x_4[kh+h]\ ] = \lfloor 0\ 1\ 0 \quad 0\ 0\ 0\ 1 \quad 0\ 0\ -d_0\ 0\ -d_1\ 0\ -d_2\ 1 \quad -d_3\ \ ][x_1[kh]\ x_2[kh]\ x_3[kh]\ x_4[kh]\ ] + e[kh][0\ 0\ 0\ 1\ ] \tag{65}$$

$$\mu[kh] = [a_0\ a_1\ a_2\ a_3\ ][x_1[kh]\ x_2[kh]\ x_3[kh]\ x_4[kh]\ ] + n_4 e[kh]$$

$$\Rightarrow [x1[kh+h]] = [1]\ [x2[kh]] \tag{66}$$

$$\Rightarrow [x2[kh+h]] = [1]\ [x2[kh]] + e[kh][1] \tag{67}$$

$$\Rightarrow \mu[kh] = [2.41][x1[kh]] - [2.01][x2[kh]] + [4.83]e[kh] \tag{68}$$

(69)

3.6. INTEGRACIÓN DE SISTEMA DE CONTROL EN ARDUINO:

En este apartado se va a generar una secuencia de código por cada realización, teniendo en claro la correcta determinación de cada variable de bloque (lazo del *setpoint* y lazo de realimentación). El lazo de realimentación estará compuesto por los polinomios R(z) y S(z) y la función del lazo de setpoint deberá depender del resultado de operar las FDT de la dinámica de seguimiento y de los polinomios T(z) y S(z). En primera instancia, este 'setpoint' estará construido sin dinámica de seguimiento, por lo que su función entonces dependerá de los polinomios T(z) y S(z) donde T(z)= R(z), teniendo, entonces, una misma realización para dos funciones distintas (ver figura 57).

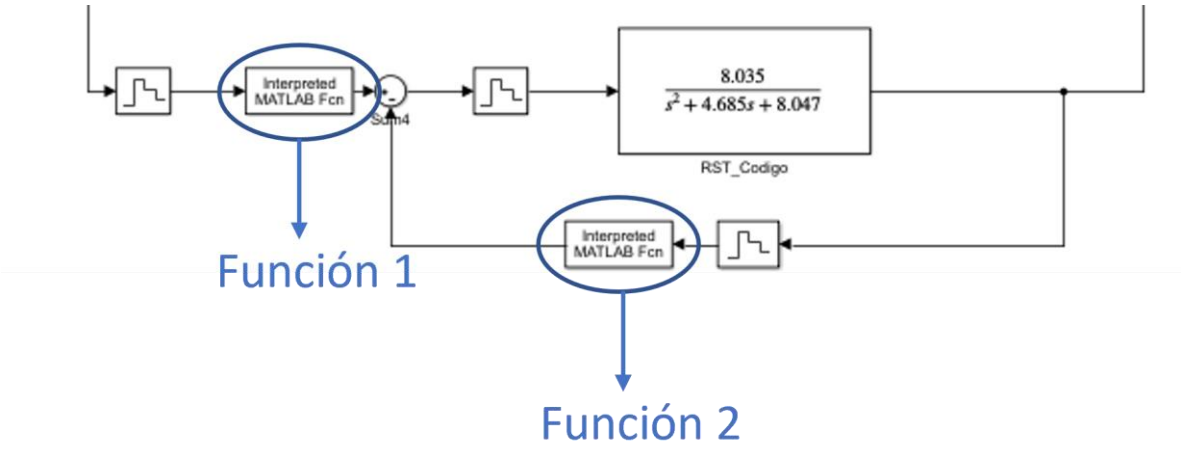


Figura 57 gráfico sistema de control

Para cada una de las funciones se va a generar una secuencia de código a implementar, para eso es importante determinar cuál es la entrada de cada una de las funciones, en todo caso, la variable de entrada para el lazo de realimentación será la variable medida (ángulo) y la variable para el lazo de seguimiento será el setpoint (referencia). Las dos salidas de cada bloque se van a operar y la diferencia de esas salidas es lo que se llevará a una función de saturación y luego a la planta.

Primero, se trasladan las variables de estado halladas en la realización canónica a variables de código, por lo que entonces en código se tiene lo correspondiente a las ecuaciones 70-73:

$$x2s = x2 + ek \tag{70}$$

$$uk = 2.41x1 - 2.01x2 + 4.83ek \tag{71}$$

$$x1 = x1s \tag{72}$$

$$x2 = x1s \tag{73}$$

El siguiente paso da lugar al cálculo de los ángulos de posición que establecen los ‘setpoints’ o referencias angulares del sistema. Todos los datos podrán ser evidenciados desde el puerto serial. Para que los motores inicien su posicionamiento estarán condicionados a un rango de trabajo, cuando el reloj marque una hora entre 6am y 6pm estos entraran en función de acuerdo con interrupción del ‘timer’ que establece el tiempo de muestreo de la planta, según el criterio de diseño con el que se viene trabajando la planta lo que dará paso a la ejecución del control

Esta función inicializa el timer en el tiempo establecido y luego se le asocia a esa interrupción una función. Dentro de esa función se pondrá la lectura del sensor y la señal de control.

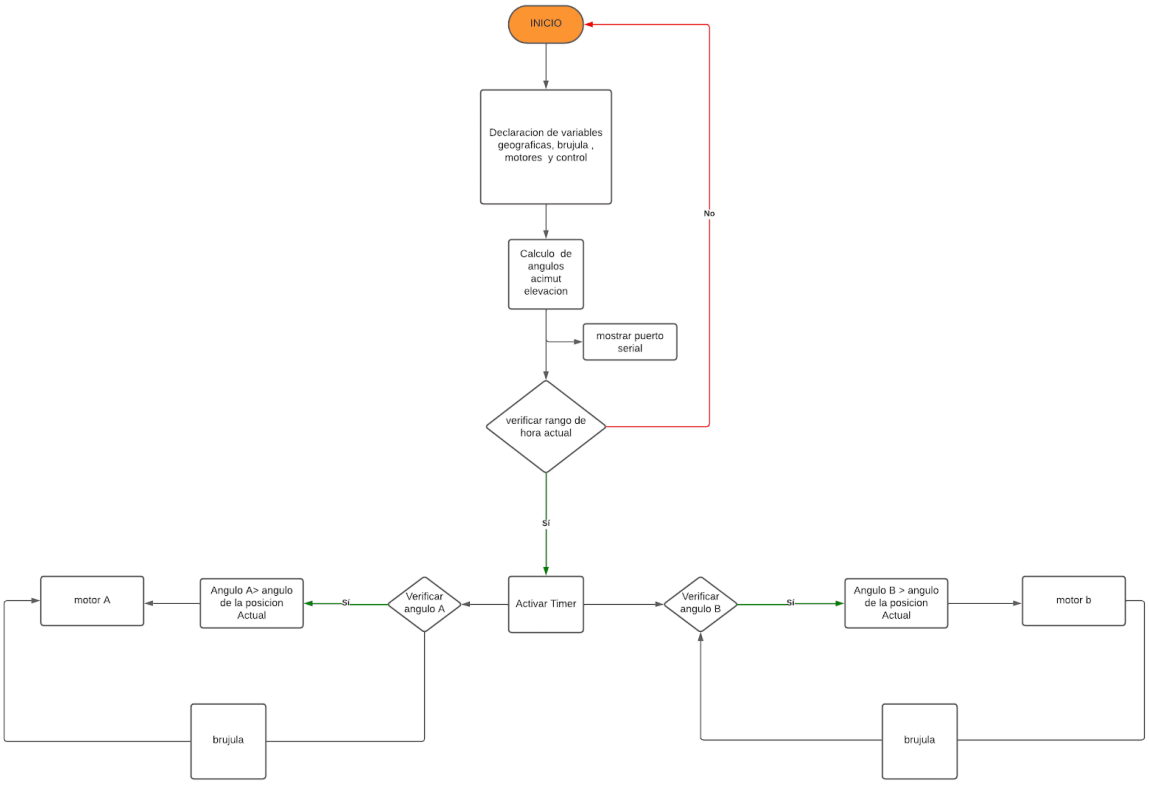


Figura 58 Diagrama de sistema de control

CAPÍTULO IV

VALIDACIÓN DEL PROTOTIPO

La validación del prototipo es una etapa crítica en el proceso de desarrollo del proyecto. Esta etapa está estrechamente relacionada con las fases 6 y 7 de la metodología V-Shape, que se centran en las "Pruebas de Sistema" y la "Validación y Verificación" respectivamente. En esta etapa, se busca asegurarse de que el prototipo desarrollado cumple con las expectativas y necesidades, al tiempo que se verifica su funcionalidad y garantiza su calidad.

4.1. FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO

La prueba de funcionamiento dio inicio con la simulación del código de control a implementar en el entorno de simulink de Matlab, gracias a esta interfaz gráfica se logró simular la respuesta de todos los sistemas dinámicos que llevaron a creación del código final.

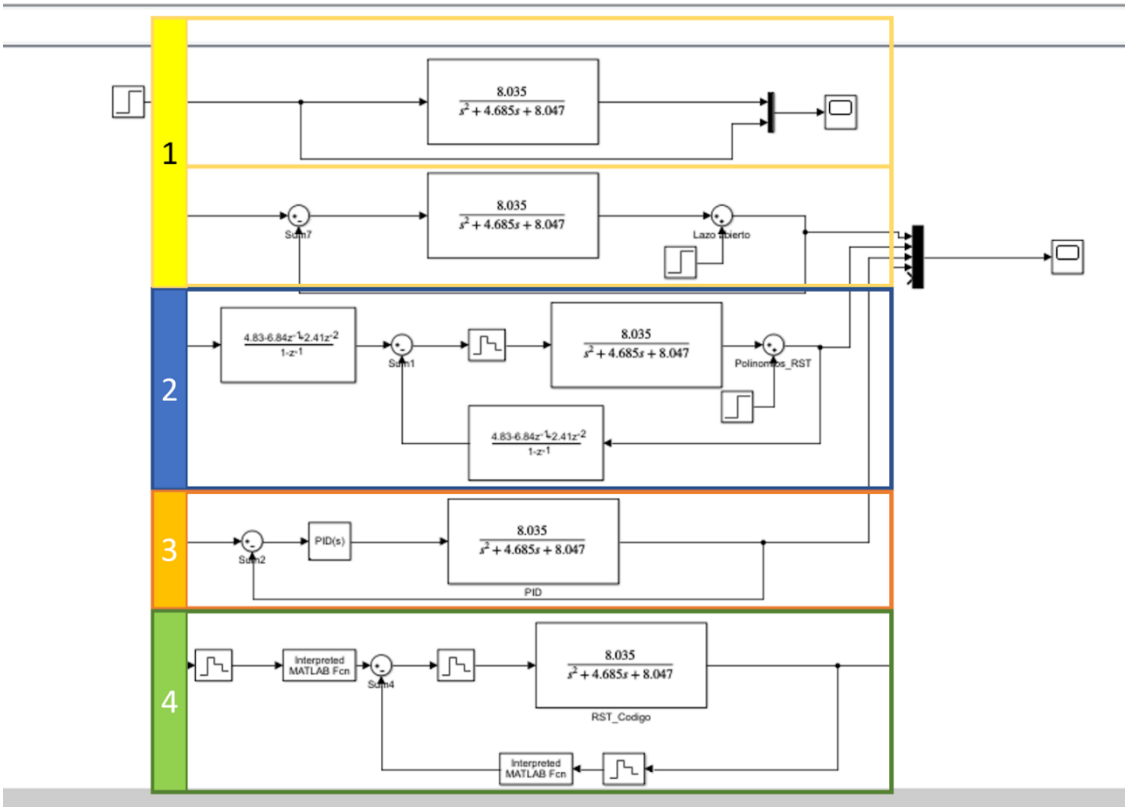


Figura 59 Código de control en simulink

En la figura 59 se ve representado en bloques las funciones que componen el sistema, todas en respuesta a una misma entrada escalón

En el primer conjunto se encuentra la función de transferencia obtenida de la identificación en lazo abierto, este apartado está subdividido en dos secciones, en la superior se evidencia la FDT en lazo abierto sin perturbaciones y la inferior presenta una perturbación a los 0.2 segundos.

En el segundo conjunto de bloques se pone a prueba el control RST diseñado, con R = T para verificar que la respuesta sea la esperada.

En el tercer conjunto de bloques se integra el PID obtenido a partir del 'PID tuner', esperando que su respuesta represente una estabilización adecuada.

En el último grupo de bloques se configuraron los códigos resultantes de la realización canónica, mismos códigos que se trasladaron al controlador digital.

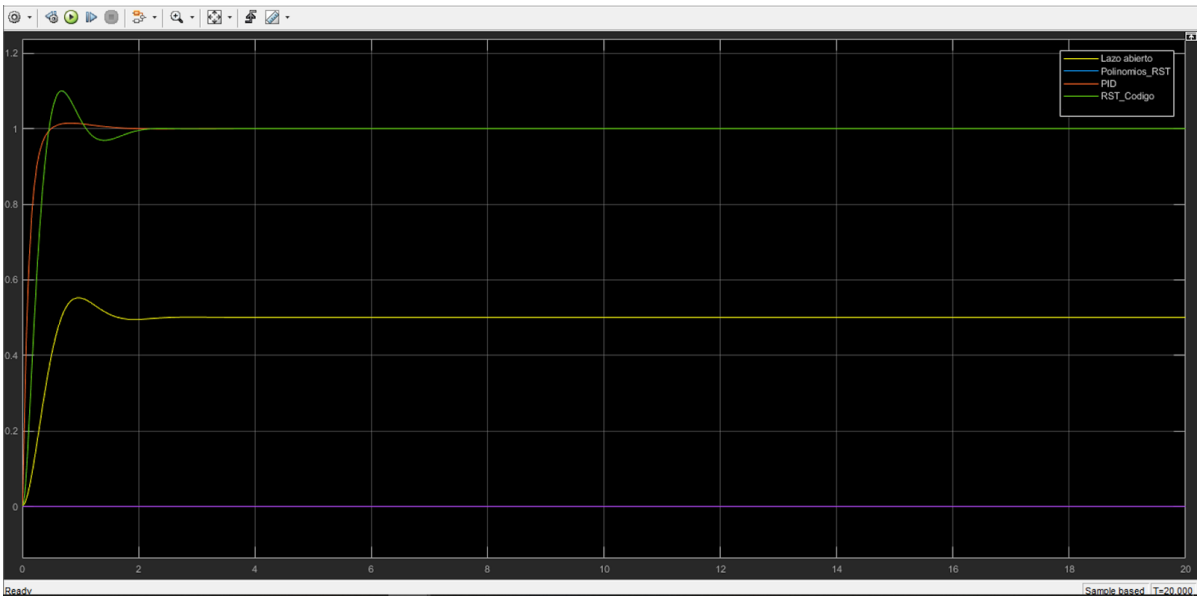


Figura 60 señal de bloques

En la figura 60 se evidencia cada comportamiento en función de una misma entrada, la línea amarilla es la señal en lazo abierto, que, aunque es estable no está siendo controlada. La función naranja es la respuesta del PID, demostrando su rápida respuesta sin ningún tipo de sobre impulso, estabilizándose y controlando su comportamiento en el valor deseado.

La línea verde representa los bloques programados en código, mismo código que irá plasmado en el controlador. Se puede ver una respuesta bastante aceptable, teniendo un pequeño sobre impulso antes del primer segundo de operación, sin embargo, se estabiliza rápidamente en el valor deseado. Detrás de ella se encuentra la respuesta a los bloques de los polinomios R y S, esta se encuentra superpuesta a la línea de código, ya que presentan la misma dinámica propuesta, de diferente forma.

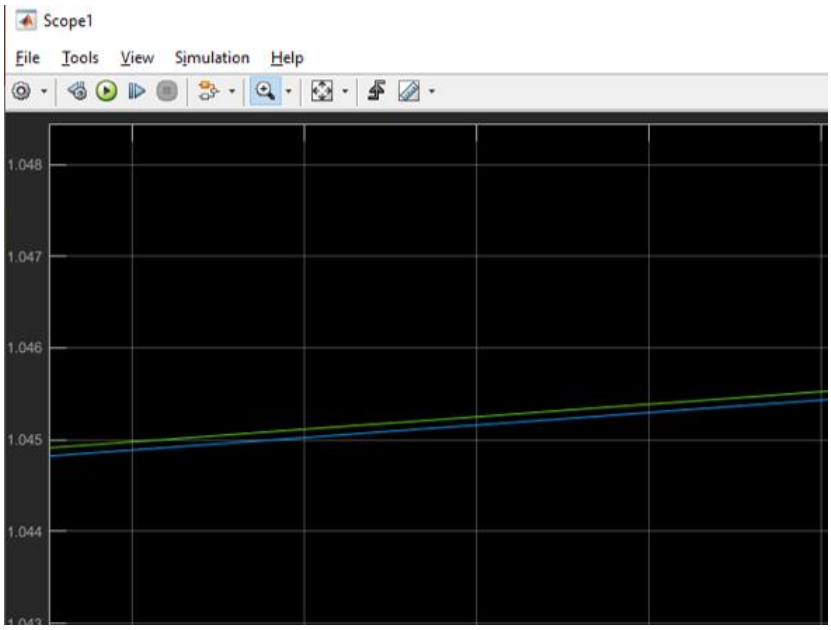


Figura 61 Señal de PID y RST superpuesta vista con zoom.

4.2. PROTOTIPO FUNCIONAL:

El proyecto de investigación y desarrollo de una estructura de posicionamiento solar con control digital ha arrojado resultados prometedores. Mediante la integración del control, algoritmos de seguimiento y actuadores precisos, se logró mejorar significativamente la eficiencia de captación de energía solar y se logró implementar una estructura funcional lista para ser puesta en marcha y comprobar su rendimiento de captación energética. El prototipo actualmente se encuentra respondiendo de manera acertada a su controlador implementado en función con el circuito y a su estructura mecánica.

Funcionamiento de control: El control está siendo efectivo demostrando su correcto posicionamiento cuando el tiempo y el setpoint se lo indica, su movimiento es lento ya que para la movilidad de la estructura se requiere gran torque, pero llega a su punto de referencia en el tiempo adecuado. Durante las pruebas realizadas, la estructura pudo seguir con una precisión aceptable la trayectoria del sol a lo largo del día, sin embargo, presenta ligeros desfases referentes al setpoint (Ver Figura 61). La señal de entrada que se está calculando está siendo comparada con una

plataforma en línea llamada *Sunearthtools* la cual es una herramienta desarrollada para el cálculo de posición solar en cualquier ubicación geográfica en una hora y fecha específica, utilizada para la instalación de paneles solares gracias a la información detallada y precisa que brinda.

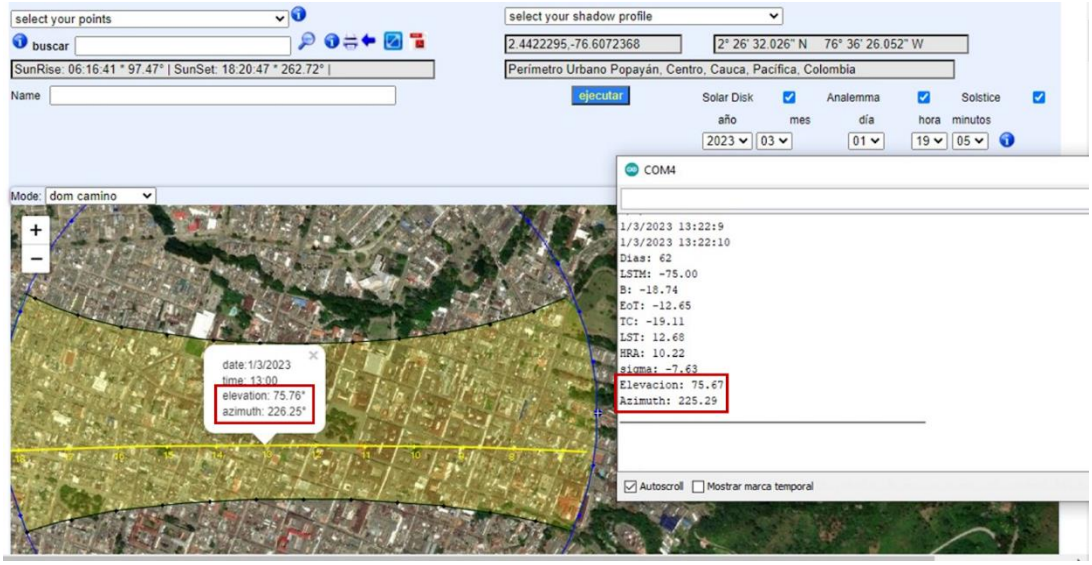


Figura 62 Comparación de plataforma Sunearthtools y resultado de algoritmos en arduino.

En el 'screenshot' se logra evidenciar los valores obtenidos de los algoritmos calculados por el código implementado, vistos desde el puerto serial de Arduino, y los valores arrojados por la plataforma virtual en un mismo rango de tiempo. Se logra ver una pequeña diferencia no significativa, siendo la elevación el cálculo más aproximado, con tan solo 0.09° de diferencia y el azimut el más desfasado con una diferencia de 0.96°. Esto puede ser debido a la hora exacta de los cálculos y al uso de decimales en el cómputo.

para calcular el porcentaje de fiabilidad o precisión, se utilizó la fórmula de la ecuación 74:

$$Precisión\ (\%)\ =\ 100\ *\left(1-\left(\frac{Valor\ Real\ -\ Valor\ Medido}{Valor\ Real}\right)\right) \qquad (74)$$

Para la elevación:

$$Precisión\ (\%) = \ 100\ * \left(1 - \left(\frac{0{,}09°}{75{,}67}\right)\right) = \ 99.88\% \tag{75}$$

Para el azimut:

$$Precisión\ (\%) = \ 100\ * \left(1 - \left(\frac{0{,}96°}{226.25°}\right)\right) = \ 99.58\% \tag{76}$$

El porcentaje de fiabilidad o precisión para la elevación es aproximadamente 99.88%, mientras que para el azimut es aproximadamente 99.58%. Estos valores indican que el programa de seguimiento creado, proporciona datos muy cercanos a los proporcionados por la aplicación 'sunearthtools', lo que implica un alto nivel de precisión y confiabilidad en el posicionamiento del sistema de seguimiento solar. La pequeña diferencia entre los valores medidos y reales sugiere un funcionamiento muy efectivo del programa de seguimiento (ver figuras 63 y 64).



Figura 63 Estructura en posición de reposo



Figura 64 estructura posicionada: Elevación=75.67°, Azimut= 225.29°

Se realizaron pruebas a los paneles solares (ver figuras 65 y 66), tanto al sistema móvil como al sistema fijo. Ambos sistemas se han sometido a condiciones reales de un día soleado en la ciudad de Popayán, Cauca, con una temperatura ambiente de 25 grados, pero a medida que el sistema operaba, se iba calentando, tal como se ha registrado en las tablas 4 y 5.



Figura 65 Sistema de seguimiento



Figura 66 Toma de temperatura

Los paneles solares utilizados son de la marca POWEST, modelo XH100P con características que se listan en la tabla 4.

Tabla 4 CARACTERÍSTICAS PANEL SOLAR UTILIZADO

CARACTERÍSTICAS PANEL SOLAR POWEST XH100P	
Modelo	XH100P
Tipo de módulo	Poli-Cristalino
Potencia máxima del panel	100w
Voltaje en circuito abierto	22,54 voltios
Corriente en cortocircuito	5,76 amperios
Voltaje en máxima potencia	18,54 voltios
Corriente en máxima potencia	5,40 amperios
Celda (cantidad / material / número de barras colectoras)	72 / silicio multicristalino / 4 o 5
Peso	Peso 7.6kg
Dimensiones (Altura x Ancho x Profundidad)	103 cm/67 cm /3,5 cm

A continuación, en las tablas 4 y 5, se presentan los datos de: horas, ángulos, voltaje, corriente, temperatura y eficiencia del panel para convertir la energía solar incidente en electricidad utilizable (potencia real del panel sobre potencia máxima), obtenidos durante las pruebas en cada sistema.

La temperatura del panel en el momento donde se expuso al sol fue tomada con una cámara termográfica de marca Fluke PTi120, la cual permitió obtener valores de temperatura en una celda específica del panel la cual se tomó como referencia para todas las tomas

Tabla 5 PRUEBAS DEL DÍA EN SISTEMA FOTOVOLTAICO FIJO

Fuente: Creación propia

HORAS	SUNEARTHTOOLS		SISTEMA DE SEGUIMIENTO		VOLTAJE (V)	CORRIENTE (A)	TEMP (°C)	EFICIENCIA (%)
	ACIMUT	ELEVACIÓN	ACIMUT	ELEVACIÓN				
8:25 a. m.	68,71°	17,74°	180°	8°	19,5	0,72	30,2	14
9:25 a. m.	66,73°	31,62°			19,6	0,7	32,9	13,7
10:25 a. m.	62,24°	45,17°			20,2	0,68	41,7	13,7
11:25 a. m.	52,68°	57,88°			18,5	0,62	45,7	11,5
12:25 p. m.	31,19°	68,12°			20,3	0,71	45,9	14,4
1:25 p. m.	351,06°	71,23°			20,1	0,69	48,3	13,9
2:25 p. m.	317,82°	64,45°			19,8	0,7	50,1	13,9
3:25 p. m.	302,45°	52,86°			20,1	0,72	51,3	14,5
4:25 p. m.	295,45°	39,7°			20	0,75	52,8	15
5:25 p. m.	292,16°	25,97°			19,9	0,67	53,4	13,3
PROMEDIO					**19,8**	**0,7**	**45,2**	**13,8**

Luego de recolectar los datos, se procede a calcular la eficiencia del panel solar, para lo cual se calculó la potencia de salida del panel en las condiciones reales del día en Popayán, Cauca. La eficiencia del panel solar se puede calcular utilizando las ecuaciones 77 y 78. Donde se obtuvo una eficiencia en promedio de 13,8%, utilizando el panel en una posición fija, con un grado de inclinación no mayor de 10°

$$Ef = \left(\frac{Preal}{Pmax}\right) \times 100 \tag{77}$$

$$Preal = V \times I \tag{78}$$

De igual manera, para determinar la eficiencia del panel, equipado con un sistema de seguimiento solar, se aplicaron las ecuaciones previamente mencionadas (ecuaciones 73 y 74).

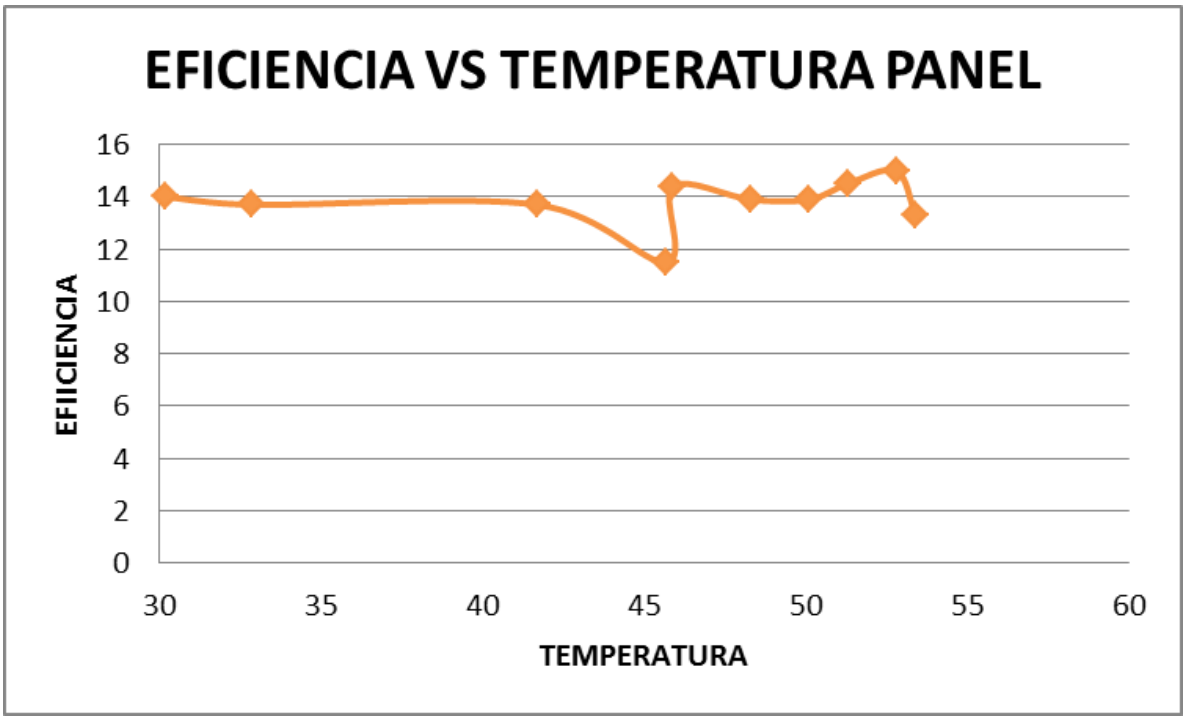


Figura 67 Gráfica eficiencia vs temperatura panel en posición fija

La eficiencia oscila en un rango relativamente estrecho, que va entre aproximadamente 11,5% y 15%, lo cual indica que hay cierta consistencia en el rendimiento del proceso a diferentes temperaturas, a medida que la temperatura aumenta, la eficiencia no sigue una tendencia clara, en este caso, por ejemplo, la eficiencia no parece disminuir con el aumento de la temperatura. Por otro lado, se pudo evidenciar en la práctica que, el cambio depende de otros factores, tales como las nubes.

Los resultados indicaron una eficiencia promedio del 24% (ver tabla 5). Esto se logró mediante el uso de un panel con un sistema de seguimiento solar de 2 ejes, el cual permite que el panel siga el movimiento del sol a lo largo del día y mantenga una posición perpendicular a los rayos solares. Esta alineación óptima aumenta significativamente la cantidad de radiación solar que llega al panel, recordando que estos valores pueden cambiar dependiendo de varios factores como lo es el clima, el envejecimiento del panel y la acumulación de suciedad o polvo en su superficie.

Tabla 6 PRUEBA DEL DÍA EN SISTEMA FOTOVOLTAICO DE 2 EJES DE MOVIMIENTO

Fuente: Creación propia

HORAS	SUNEARTHTOOLS		SISTEMA DE SEGUIMIENTO		VOLTAJE (V)	CORRIENTE (A)	TEMPERATURA (°C)	EFICIENCIA (%)
	ÁNGULO ACIMUT	ÁNGULO ELEVACIÓN	ÁNGULO ACIMUT	ÁNGULO ELEVACIÓN				
8:10 a. m.	69,12°	14,23°	68,16°	14,14°	19,6	1,18	48	23,13
9:10 a. m.	67,61°	28,18°	66,64°	28,09°	20,3	1,16	48,5	23,5
10:10 a. m.	63,93°	41,87°	62,97°	41,78°	20,7	1,2	49,2	24,8
11:10 a. m.	56,1°	54,9°	55,14°	54,81°	20,3	1,17	49,6	23,8
12:10 p. m.	38,63°	66,1°	37,66°	66,01°	20,6	1,19	49,8	24,5
1:10 p. m.	2,07°	71,64°	1,11°	71,55°	20,5	1,18	50,3	24,2
2:10 p. m.	323,84°	66,96°	322,87°	66,87°	20,4	1,16	50,5	23,7
3:10 p. m.	304,94°	56,07°	303,97°	55,98°	20,2	1,15	50,8	23,2
4:10 p. m.	296,52°	43,13°	295,56°	43,04°	21,2	1,14	51	24,2
5:10 p. m.	292,55°	29,48°	291,59°	29,39°	20,8	1,19	51,3	24,8
PROMEDIO					**20,5**	**1,2**	**50**	**24**

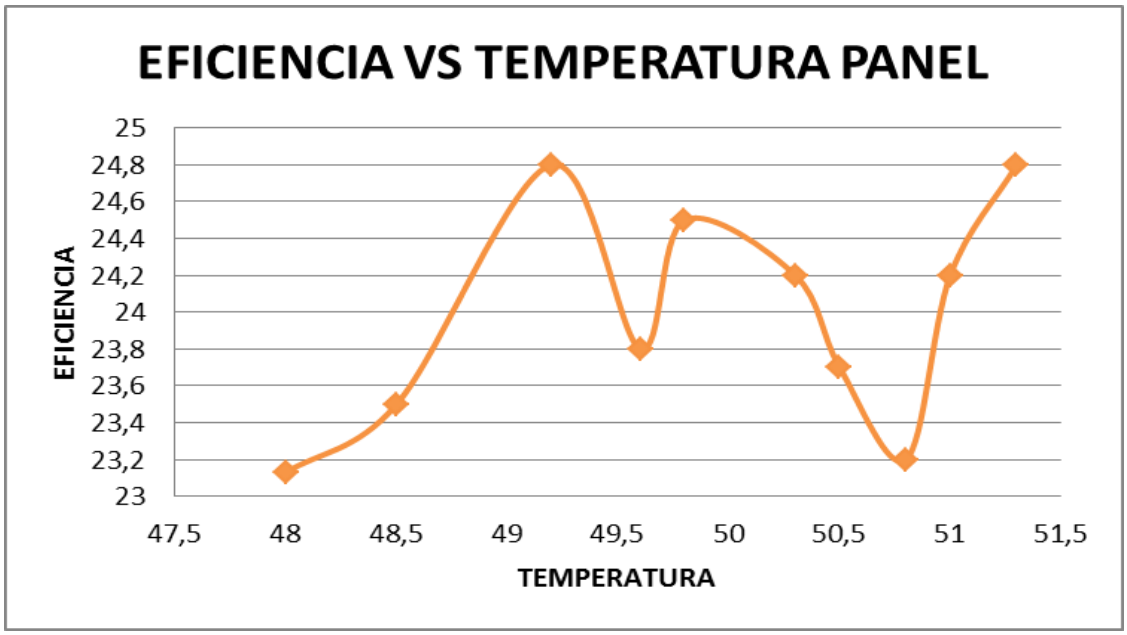


Figura 68 Gráfica eficiencia vs temperatura panel de 2 ejes de movimiento

En la figura 68 se presentan los datos de eficiencia vs temperatura, en los cuales se logra evidenciar que, no se presenta una relación significativa entre estas dos variables en los datos proporcionados.

En la tabla 7 y 8 se encuentran datos como: voltajes, corrientes, temperaturas máximas y mínimas durante los días de pruebas, así como el porcentaje de eficiencia obtenido en cada uno de los días.

Durante la mayoría de las pruebas, el clima se mantuvo mayormente despejado, con solo algunos lapsos de tiempo en los que la luz del sol se veía obstaculizada por el paso de nubes. En general, la temperatura durante estos días osciló entre los 23°C y 25°C. Sin embargo, el día 3 fue una excepción, ya que estuvo un poco nublado. Esto tuvo un impacto notable en los niveles de voltaje y corriente registrados en las tablas 7 y 8, reflejando máximos y mínimos un poco menores.

Tabla 7 PRUEBAS EN SISTEMA FOTOVOLTAICO FIJO

Fuente: Creación propia

FECHAS	VOLTAJE MAX(V)	VOLTAJE MIN(V)	CORRIENTE MÁX(A)	CORRIENTE MIN(A)	TEMPERATURA MÁX(°)	TEMPERATURA MIN(°)	EFICIENCIA (%)
10/07/23	19,6	18,3	0,72	0,61	49,7	47	13,1
11/07/23	19,8	18,4	0,71	0,63	50,2	38	13,3
12/07/23	17,5	16,8	0,64	0,6	44,3	35	10,9
13/07/23	20,2	18,4	0,72	0,62	50,1	39	13,4
14/07/23	20,1	18,3	0,73	0,6	51,1	43	13,5
17/07/23	19,9	18,2	0,69	0,61	49,8	42	12,9
18/07/23	20,3	18,5	0,75	0,62	53,4	30,2	13,8
19/07/23	20,2	18,3	0,68	0,6	51,3	48	13
21/07/23	20,1	18,5	0,65	0,6	50,8	45	12,7
22/07/23	19,5	18,2	0,63	0,61	50,3	42	12,1
PROMEDIO	**19,72**	**18,19**	**0,692**	**0,61**	**50,1**	**40,92**	**13**

Tabla 8 PRUEBAS EN SISTEMA FOTOVOLTAICO DE 2 EJES DE MOVIMIENTO

Fuente: Creación propia

FECHAS	VOLTAJE MÁX(V)	VOLTAJE MIN(V)	CORRIENTE MÁX (A)	CORRIENTE MIN(A)	TEMPERATURA MÁX(°)	TEMPERATURA MÍN(°)	EFICIENCIA (%)
10/07/23	20,3	19,5	1,16	1,13	49,7	47	23,4
11/07/23	20,6	19,7	1,18	1,15	50,2	38	23,8
12/07/23	19,8	18,3	1,16	1,13	44,3	35	22,5
13/07/23	20,4	19,3	1,15	1,12	50,1	39	23,3
14/07/23	20,2	19,1	1,19	1,14	51,1	43	23,6
17/07/23	20,8	19,8	1,19	1,16	49,8	42	23,9
18/07/23	20,6	19,4	1,15	1,12	49,2	44	23,5
19/07/23	21,2	19,6	1,2	1,14	51,3	48	24
21/07/23	20,7	19,4	1,19	1,16	50,8	45	23,8
22/07/23	20,1	19,3	1,14	1,12	50,3	42	23,2
PROMEDIO	**20,47**	**19,34**	**1,171**	**1,137**	**49,68**	**42,3**	**23,5**

Los resultados obtenidos del proyecto de implementación de una estructura de posicionamiento solar con control digital, prometen mejoras significativas en la producción de energía renovable. A través de la combinación de estos algoritmos de control sofisticados y actuadores de alta precisión, la estructura pudo ajustar automáticamente la posición de los paneles solares en tiempo real, y se ve reflejado de forma significativa en la captación de energía solar para el sistema propuesto, con una eficiencia del 24%, por lo tanto, ha logrado captar un 10.2% más de energía en comparación con el sistema estático, el cual tiene una eficiencia promedio de 13.8%. Esto significa que el sistema de seguimiento solar de 2 ejes puede generar significativamente más electricidad a partir de la misma cantidad de luz solar disponible, lo que lo convierte en una opción más eficiente desde el punto de vista energético.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en las tablas 4 y 5, el ángulo de inclinación de los paneles solares juega un papel crucial en la eficiencia de recolección de energía. La radiación solar incide en la tierra desde diferentes ángulos durante el día y a lo largo del año, y el ajuste del ángulo de los paneles puede optimizar la cantidad de radiación capturada. A continuación, se explican los efectos del ángulo de inclinación y cómo se puede optimizar la ubicación de los paneles solares:

Efecto del ángulo de inclinación:

Ángulo de inclinación óptimo: El ángulo de inclinación óptimo de los paneles solares depende de la ubicación geográfica. En general, para obtener la máxima eficiencia, el ángulo debe ajustarse de manera que los paneles estén perpendiculares a los rayos solares en el momento de mayor radiación. En verano, esto significa un ángulo más vertical, mientras que en invierno un ángulo más horizontal sería más efectivo. (Duffie & Beckman, 2013)

Pérdida de eficiencia: Si los paneles están demasiado inclinados hacia el sol (perpendicular al plano de la Tierra), pueden recibir más radiación, pero solo durante breves períodos del día, lo que puede limitar su producción de energía. Por otro

lado, si están en un ángulo muy plano, pueden recibir una mayor cantidad de radiación durante más tiempo, pero la intensidad por unidad de área es menor (Jacobson & Jadhav, 2018).

Optimización de la ubicación:

Latitud geográfica: El ángulo de inclinación ideal para los paneles solares se puede calcular aproximadamente utilizando la latitud del lugar donde se instalan. La inclinación debería ser igual a la latitud geográfica para maximizar la captura de radiación solar promedio a lo largo del año (Jacobson & Jadhav, 2018).

Ajuste estacional:

Para obtener un rendimiento óptimo durante todo el año, algunos sistemas de paneles solares permiten ajustar el ángulo de inclinación de forma estacional. Esto implica un ángulo más vertical en verano y un ángulo más horizontal en invierno (Jacobson & Jadhav, 2018).

Seguimiento solar:

La forma ideal de optimizar la ubicación de los paneles es mediante el uso de sistemas de seguimiento solar. Este sistema mueve los paneles a lo largo del día para seguir la trayectoria del sol, manteniéndolos perpendiculares a los rayos solares en todo momento. Aunque mantener los motores en movimiento durante toda su trayectoria puede traducirse en un consumo adicional, esto puede mitigarse realizando movimientos periódicos cada que haya un cambio de al menos 5 grados para que la emisión de rayos solares vuelva a ser perpendicular (Duffie & Beckman, 2013).

Considerar sombras:

Es importante evitar sombras en los paneles solares, ya que incluso una pequeña sombra puede reducir drásticamente su eficiencia. Siempre que sea posible, se

debe colocar los paneles en áreas donde no se proyecten sombras de edificios, árboles u otros obstáculos.

CONCLUSIONES

En esta investigación, se evaluó la incidencia que tiene el ángulo de inclinación, de un sistema fotovoltaico de dos ejes controlado, en la eficiencia de recolección de energía y cómo se puede optimizar su ubicación para aprovechar al máximo la radiación solar. Teniendo en cuenta el desarrollo del presente trabajo, es posible concluir lo siguiente:

Siguiendo la metodología de diseño mecatrónico V-Shaped, fue posible desarrollar un adecuado prototipo de sistema de control de seguimiento solar para celdas fotovoltaicas. Un aspecto crítico a considerar fue la definición precisa de las cargas que afectan al sistema. Apoyándose en el software CAD, se determinó un factor de seguridad de 11, indicando que la estructura base diseñada es capaz de soportar los esfuerzos mecánicos de 196N, proporcionados por la masa del panel solar con soporte de 20 kg.

Después de llevar a cabo rigurosas pruebas y comparaciones entre el sistema de control de seguimiento solar diseñado y el software en línea ‘SunEarthtools’, se ha determinado que el sistema propuesto alcanza un alto nivel de fiabilidad en el posicionamiento del 99%. Estos resultados se respaldan por la respuesta precisa del ángulo de elevación del sistema, con un 99.88% de precisión, junto con un ángulo de Azimut que exhibe una precisión del 99.57%. Estos datos validan la excelencia del sistema de control de seguimiento solar, para aplicaciones ingenieriles y soluciones de energía sostenible.

El sistema de seguimiento solar propuesto ha demostrado ser significativamente más eficiente energéticamente en comparación con un sistema fotovoltaico convencional o estático. A través de su capacidad de rastrear el movimiento del sol a lo largo del día, el sistema de seguimiento solar ha logrado una eficiencia en captación de energía de 24% en comparación con el sistema fijo, el cual logró una captación del 13.8%, por ende, la implementación de un sistema de seguimiento

solar de 2 ejes, es una opción prometedora para aprovechar, de manera más eficiente, la energía solar disponible en la región, debido a su aumento del 10.2% de eficiencia, en comparación con un sistema fijo.

TRABAJOS FUTUROS

Este proyecto se enfocó en aumentar los niveles de captación de radiación solar en paneles solares utilizando un sistema de seguimiento, pero hay algunos problemas que condicionan la eficiencia estando a una mayor exposición de radiación; una de ellas es alcanzar altas temperaturas que pueden traducirse en una disminución de la eficiencia (Cepeda & Sierra, 2017). La eficiencia típica de un panel solar se mide en condiciones estándar de prueba (STC) a una temperatura de alrededor de 25°C. A medida que la temperatura del panel aumenta por encima de esta referencia, su eficiencia disminuirá. Esto se debe a que mientras la corriente de cortocircuito aumenta ligeramente con el aumento de la temperatura, la tensión de circuito abierto disminuye significativamente con el aumento de la temperatura, resultando una reducción de la potencia eléctrica (Mazón Hernández,2014), este problema también podría ser atacado con un sistema más robusto enfocado en mantener una temperatura óptima de trabajo sin sacrificar la eficiencia. Una de las propuestas es adaptar algún sistema de ventilación o flujo de aire. Es importante permitir un flujo de aire adecuado alrededor de los paneles solares para ayudar a disipar el calor. Esto se puede lograr mediante la instalación de separadores o soportes elevados que permitan la circulación del aire. También se pueden utilizar paneles solares con diseño de marco abierto que faciliten el flujo de aire. También se podría mitigar implementando revestimientos reflectantes: La aplicación de revestimientos reflectantes en la superficie de los paneles solares puede ayudar a reducir la absorción de calor. Estos revestimientos reflejan parte de la radiación solar incidente, lo que disminuye la temperatura de los paneles. Además, se podría adaptar también un sistema más complejo haciendo uso de tecnología de enfriamiento: Algunos sistemas de paneles solares utilizan tecnologías de enfriamiento por agua o aire, para mantener una temperatura más baja en los paneles solares. Estos sistemas ayudan a disipar el calor de manera más eficiente y mantener una temperatura óptima de funcionamiento.

REFERENCIAS

Alvarez Brotons, X. (2004). Control predictivo de canales de riego utilizando modelos de predicción de tipo Muskingum (primer orden) y de tipo Hayami (segundo orden). Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona - Enginyeria de Camins, Canals i Ports, 2240, 5–12. https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3330/34059-5.pdf

Ardobot Robótica SAS Motor a pasos NEMA 17 17HS4401. (s. f.). Recuperado 26 de enero de 2023, de https://www.ardobot.co/motor-a-pasos-nema-17-17hs4401.html

Arduino. (s. f.). Arduino Mega 2560 | Arduino.cl - Compra tu Arduino en Línea. Recuperado 26 de enero de 2023, de https://arduino.cl/arduino-mega-2560/

Avello, A. (2014). Teoría de Máquinas.

BUDYNAS, RICHARD G. NISBETT, K. J. (2014). Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley. Igarss 2014, 1, 1–5.

Cepeda, J., & Sierra, A. (2017). Aspectos que afectan la eficiencia en los paneles fotovoltaicos y sus potenciales soluciones. NAFA SCR Document, 07/80, 17.

Datasheet Stepper Motor NEMA 17. (2018). NEMA 17 Stepper Motor Datasheet. 6200490(mm), 2–3. pbclinear.com

David, J., Castro, M., Guillermo, J., & Luna, P. (2016). PUEBLA.

Dorf, R. C., & Bishop, R. H. (2005). Sistemas de Control Moderno. En Pearson Educación S.A.: Vol. 10 ed. (pp. 1–6).

Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). Solar engineering of thermal processes. Wiley.

Energía solar (Qué es, Concepto y Definición Significados.com. (s. f.). Recuperado 13 de junio de 2021, de https://www.significados.com/energia-solar/

Estudio y desarrollo de celdas solares. (s. f.). Recuperado 6 de diciembre de 2021, de https://inaoe.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1009/1467/1/VelandiaCOJ.pdf

Fernández, J. (2016). Caracterización de módulos fotovoltaicos con dispositivo portátil. U Carlos III Madrid, 1–156. https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/6037/PFC_Julio_Fernandez_Fericholа.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Granda-Gutiérrez, E. E., Orta-Salomón, O. A., Díaz-Guillén, J. C., Jimenez, M. A., Osorio, M., & González, M. A. (2013). Modelado y Simulación de Celdas y Paneles Solares. ISSN:1405-2172. Congr. Int. Ing. Electrón. Mem. Electro 2013, October, 17–22. https://doi.org/10.13140/2.1.4192.8968

Guevara, O. (2013). Análisis del proceso de enseñanza aprendizaje de la disciplina proyecto arquitectónico, en la carrera de arquitectura, en el contexto del aula. 501. http://www.tdx.cat/handle/10803/116191

Handson Technology User Manual 3-Axis CNC/Stepper Motor Shield for Arduino. (s. f.). www.handsontec.com

IDEAM. (2015). Irradiación Global Horizontal Medio Diario Anual. Ideam, 1. http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html%0Ahttp://atlas.ideam.gov.co/presentacion/

IDEAM, & UPME. (2005). Mapas de Brillo Solar. Atlas de Radiación Solar de Colombia, 41–57.

I. E.-, Fotovoltaicas, C., & 1.1. (2011). Capítulo 1, INGENIERÍA, U. N. A. D. M. F. DE, ELECTRÓNICA. Universidad nacional autónoma de méxico facultad de ingeniería ingeniería eléctrica - electrónica.

Inc, P. (s. f.). Compass Module 3-Axis HMC5883L (#29133). www.parallax.com

Ipa, P., & Di, S. (2017). DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA. 1–78.

Jacobson, M. Z., & Jadhav, V. (2018). World estimates of PV optimal tilt angles and ratios of sunlight incident upon tilted and tracked PV panels relative to horizontal panels. Solar Energy, 169, 55–66. https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.04.030

La Energía Solar. (2020). La Energía Solar. La Energía Solar, 1–33.

Lanciano, N., & Camino, N. (2008). Del ángulo de la geometría a los ángulos en el cielo. Dificultades para la conceptualización de las coordenadas astronómicas acimut y altura. Enseñanza de Ciencias. Revista de investigación y experiencias didácticas, 26(1), 77–92. https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.3691

Lindao, W. E. (2020). Propuesta de Diseño de un Sistema de Energía Solar Fotovoltaica. Caso de Aplicación en Casa Comunal de Cooperativa Los Paracaidistas en la Ciudad de Guayaquil. Journal of Chemical Information and Modeling, 87.

Lorenzón, E. E. (2020). Sistemas y Organizaciones. Sistemas y Organizaciones. https://doi.org/10.35537/10915/99629

Maiti, & Bidinger. (2009). Cambio climático en Colombia. Journal of Chemical Information and Modeling, 53(9), 1689–1699.

Mazón Hernández, R. Renewable energies and energy efficiency - UPCT. Available at: https://www.upct.es/~ditf/vsc.pdf

Mecanismos de Transmisión Circular. (s. f.). Recuperado 13 de junio de 2023, de https://www.pizarratecnologica.com/2022/01/mecanismos-de-transmision-circular.html

Nise, N., Perez, M., Perez, A., Perez, E., Nise, N., Simrock, S., Siddique, N., & Carrillo, A. (2011). Enhancer A ntenna A zimuth Position Control System. En CAS 2007 - CERN Accelerator School: Digital Signal Processing, Proceedings (Vol. 517). http://150.185.9.18/fondo_editorial/images/PDF/CUPUL/SISTEMA DE CONTROL 1.pdf

Ogata, K. (2013). Ingeniería de Control Moderna (Pearson (Ed.); Quinta edi).

Pereira, U. T. de. (s. f.). SISTEMA DE CONTROL DE PROCESOS. https://www.ptonline.com/articles/how-to-get-better-mfi-results

Pérez, M., Pérez, H., Pérez, A., & Berenguer, E. (2007). Introducción a los sistemas de control. Universidad Nacional de San Juan, 1, 1–69. http://dea.unsj.edu.ar/control1/apuntes/unidad1y2.pdf

Phan, T. P., Chao, P. C. P., Cai, J. J., Wang, Y. J., Wang, S. C., & Wong, K. (2018). A novel 6-DOF force/torque sensor for COBOTs and its calibration method. Proceedings of 4th IEEE International Conference on Applied System Innovation 2018, ICASI 2018, 1228–1231. https://doi.org/10.1109/ICASI.2018.8394511

Pololu Robotics & Electronics. (2010). A4988 Stepper Motor Driver Carrier. Www.Pololu.Com, 12, 2–6.

Quispe, P., U, E. J., Quispe, P., & U, E. H. (2020). Facultad de Ingeniería Carrera de Ingeniería Industrial ACADÉMICO DE BACHILLER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL Estudio numérico de la eficiencia de paneles fotovoltaicos con diferente inclinación aplicado en Arequipa Autores Gonzales Condori , Elvis Gilmar Ramír.

Reda, I., & Nrel, A. A. (2005). Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications (Revised). National Renewable Energy Laboratory Nrel/Tp-560-34302, January, 1–56.

Salamanca Céspedes, J. E. (2013). Celdas Fotovoltaicas De Alta Eficiencia Y Sistema De Paneles Solares Del Cubesat Colombia 1. Redes de Ingeniería, 3(2), 41. https://doi.org/10.14483/2248762x.6381

Sanford, J., Young, C., Popa, D., Bugnariu, N., & Patterson, R. (2014). Grip pressure measurements during activities of daily life. Next-Generation Robots and Systems, 9116, 91160H. https://doi.org/10.1117/12.2060167

Sobrino, E. (2006). Sistema de regulación fotovoltaico basado en microcontrolador.

1–64. https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/5493/Memòria.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Toranzo, N. M., Cervantes, A. L., Henríquez, J., & Costa, O. E. (2015). Seguidor Solar, optimizando el aprovechamiento de la energía solar ; Solar tracker, optimizing of improvement of the solar energy. Ingeniería Energética, 36(2), 190–199.

Álvarez Espinosa, A. C., Ordoñez, D. A., Nieto, A., Wills, W., Romero, G., Calderón, S. L., & & Delgado, R. (2015). Compromiso de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero: Consecuencias económicas. Departamento Nacional de Planeación DNP. Documento, 440.

Andrade-Castañeda, H. J., Arteaga-Céspedes, C. C., & Segura-Madrigal, M. A. (2017). Emisión de gases de efecto invernadero por uso de combustibles fósiles en Ibagué, Tolima (Colombia). Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 18(1), 103–112. https://doi.org/10.21930/rcta.vol18_num1_art:561

Heylen Polo Cano, Ambrosio Valencia Romero, Javier Roldan Mckinley. (2012). Vista de Una metodología para la evaluación de la seguridad estructural de un sistema de seguimiento solar en Colombia. *revista educacion en ingenieria*, *7, N°. 1*, 92–10. https://educacioneningenieria.org/index.php/edi/article/view/260/157

Cano, D. A. (2016). Sistema fotovoltaico conectado a red orientado a autoconsumo ubicado en el edificio de laboratorios de estructuras y materiales de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (Bogotá - Colombia).

Foladori, G., & Tommasino, H. (2012). La solución técnica a los problemas ambientales. Revista Katálysis, 15(1), 79–83. https://doi.org/10.1590/s1414-49802012000100008

Mukrimaa, S. S., Nurdyansyah, Fahyuni, E. F., YULIA CITRA, A., Schulz, N. D., د ,غسان., Taniredja, T., Faridli, E. M., & Harmianto, S. (2016) Jurnal Penelitian Pendidikan Guru Sekolah Dasar, 6(August), 128.

Pereira-Blanco, M. J. (2016). Tratamiento Jurídico De Las Energías Renovables En Colombia : Ahorro Energético , Eficiencia. Revista Jurídica Mario Alario D'Filippo, IX(17), 43–68.

Pinzón, L. V. (2016). Alternativa en el aprovechamiento de energía solar ante crisis energética en Colombia. Universidad Militar Nueva Granada, 25. https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/15275/PinzonArevaloLadyViviana2016.pdf?sequence=1

Rojas, E. (2020). Optimización del rendimiento de sistemas fotovoltaicos mediante la implementación de un prototipo de mecanismo seguidor con cuerdas para la orientación solar automática MSCOSA. 1–119. https://manglar.uninorte.edu.co/bitstream/handle/10584/10161/1042348508.pdf?sequence=1&isAllowed=y