



**Universidad
Finis Terrae**

UNIVERSIDAD FINIS TERRAE

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL INFORMÁTICA Y TELECOMUNICACIONES

**PROTOTIPO DE SISTEMA INTELIGENTE DE PANELES
FOTOVOLTAICOS MÓVILES PARA USO PARTICULAR**

YAMIL ANGEL AZAHARVICH LABRIN

**Trabajo de Titulación Presentado a la Facultad de Ingeniería para Optar al Título
Profesional de Ingeniero Civil Informática y Telecomunicaciones**

Profesor guía: Maria Jose Retamal Ponce

Santiago, Chile

2024

DEDICATORIA

A mi madre, Lidia Ester Labrin Sepúlveda; a mi padre, Yamil Angel Azaharvich Gonzáles; y a mi hermano mayor, Matías Felipe Azaharvich Labrin, por ser mis principales referentes, por sus enseñanzas y ejemplo constante de perseverancia, esfuerzo y compromiso. Gracias por no dejarme rendir, por su apoyo incondicional y por acompañarme en cada etapa de este camino.

A mi familia completa, así como a los amigos y compañeros que conocí a lo largo de mi vida, quienes con su compañía, aliento y comprensión fueron una fuente constante de inspiración y motivación para alcanzar este logro.

IN MEMORIAM

En memoria de mi abuelo, José Ángel Azaharvich Paz, quien partió antes de que pudiera terminar mi carrera, pero cuya sabiduría, cariño y ejemplo permanecen presentes en cada paso que doy.

Yamil Angel Azaharvich Labrin

AGRADECIMIENTO

Agradezco profundamente a quienes han sido parte fundamental de este proceso académico y personal.

A mi profesora guía, María José Retamal, por su dedicación, orientación y apoyo constante durante la realización de este trabajo de titulación. A la profesora María José Naranjo y al profesor Francisco Herrera, por compartir sus conocimientos y brindarme siempre su respaldo en los momentos más importantes de mi formación. Al profesor Darío Rojas Díaz, por enseñarme que reprobado o fracasar no es el final, sino una nueva oportunidad para aprender y superarse.

A mis padres y a mi hermano, por su apoyo emocional, motivación diaria y, sobre todo, por el sacrificio que realizaron para que pudiera estudiar esta carrera. Sin su amor y comprensión, este logro no habría sido posible.

A mis amigos de la universidad, Manuel Ignacio Navarrete Toledo, Denisse Torres y Catalina Ledesma, quienes estuvieron siempre a mi lado brindándome su apoyo incondicional durante toda la carrera.

A la Universidad Finis Terrae, por entregarme los conocimientos, las herramientas y el espacio necesario para desarrollarme profesionalmente.

A mis mejores amigos y amigas que me acompañan desde el liceo: Florencia Ibañez, Carla Jiménez, Claudia Toro y Jordan Colil, quienes siempre se preocuparon por mi avance y me apoyaron en todo momento, demostrando una amistad incondicional que trasciende el tiempo y la distancia.

Finalmente, agradezco a Dios, por acompañarme y brindarme fortaleza en cada etapa de este camino, permitiéndome mantener mi fe y perseverar aún en los momentos más difíciles.

Quisiera dejar un mensaje para quienes transitan por este mismo camino: los fracasos sólo son enseñanzas de la vida, no determinan nuestro valor ni nuestro destino. No importa el tiempo que tardes en llegar a la meta, lo fundamental es recorrerla con esfuerzo, dedicación y el deseo permanente de superarse. Cada obstáculo es una oportunidad para crecer, aprender y avanzar. A todos quienes de una u otra manera formaron parte de mi proceso, les expreso mi más sincero agradecimiento.

Yamil Angel Azaharvich Labrin

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	7
ABSTRACT.....	8
INTRODUCCIÓN.....	9
CAPÍTULO I: FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	11
1.1. Situación actual.....	11
1.1.1 Situación en Áreas Rurales y Urbanas.....	11
1.1.2 Soluciones actuales y sus limitaciones.....	12
1.1.3 Necesidad de innovación.....	13
1.2. Planteamiento del problema.....	13
1.2.1 Justificación.....	14
1.3. Solución propuesta.....	15
1.3.1 Componentes del prototipo.....	15
1.3.2 Esquema de circuitos.....	16
1.3.3 Funcionamiento del sistema.....	18
1.3.4 Resultados esperados.....	19
1.4. Objetivos.....	19
1.4.1. Objetivo general.....	19
1.4.2. Objetivos específicos.....	19
1.5. Alcances y Limitaciones.....	20
1.5.1 Alcances.....	20
1.5.2 Limitaciones.....	21
CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE.....	22
2.1 Sistemas Comerciales de Seguimiento.....	22
2.2 Prototipos DIY y Soluciones Educativas.....	22
2.3 Trabajo de Título Actual: Prototipo Automatizado de Bajo Costo.....	22
2.4 Comparativa de Soluciones.....	23
CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO.....	24
3.1 Efecto fotoeléctrico.....	24
3.2 Composición de un panel solar.....	24
3.3 Energía que entrega un panel solar.....	27
3.4 Cálculo del consumo energético del sistema.....	28
3.4.1 Ley de la potencia.....	28
3.4.2 Energía almacenada en la batería.....	28
3.4.3 Tiempo de operación.....	29
3.5 Simulación de escenarios.....	29
3.5.1 Modo Activo.....	29
3.5.2 Modo pasivo.....	30
3.5.3 Resultados del cálculo.....	31

3.6	Arduino Uno.....	31
3.6.1	Características clave del Arduino Uno.....	32
3.7	Sensores de luz (LDR - Light Dependent Resistors).....	32
3.7.1	Principio de funcionamiento.....	32
3.8	Motores paso a paso NEMA 17 para movimiento en paneles solares.....	32
3.8.1	Control mediante microcontroladores.....	32
3.8.2	Movimiento en múltiples ejes.....	33
3.9	Baterías de plomo-ácido selladas (VRLA) para sistemas de energía solar.....	33
3.9.1	Ventajas de las Baterías de plomo-ácido selladas.....	34
3.9.2	Función en el sistema.....	34
3.9.3	Consideraciones para la selección de la batería.....	34
3.10	Controladores de motores (DRV8825).....	34
3.11	Protoboard como herramienta de prototipado electrónico.....	35
3.11.1	Características principales.....	35
3.11.2	Función en el sistema.....	36
3.11.3	Ventajas en prototipado.....	36
3.12	Diseño de Rieles y Movimiento Mecánico.....	36
3.13	Shield CNC V3 como Interfaz de Control Electrónico para Motores Paso a Paso.....	37
3.13.1	Características Principales.....	37
3.13.2	Función en el Sistema.....	37
3.13.3	Ventajas para Prototipado Electrónico.....	38
CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA.....		39
4.1	Aplicación de la Metodología en el Trabajo de Título.....	39
CAPÍTULO V: DESARROLLO.....		42
5.1	Montaje y Soldadura del Módulo Sensor Fotosensible Lm393:.....	42
5.2	Conexión del Sensor de Luz al Arduino UNO:.....	43
5.2.1	Conexión de VCC:.....	43
5.2.2	Conexión de GND:.....	43
5.2.3	Conexión de DO (Digital Output):.....	43
5.2.4	Prueba de Funcionamiento con Código en Arduino:.....	44
5.2.5	Resultados de la Prueba:.....	44
5.3	Montaje y Conexión de los Motores Paso a Paso con su Controlador.....	44
5.3.1	Componentes utilizados:.....	45
5.4	Conexión de los Motores a la Shield CNC V3:.....	46
5.4.1	Shield CNC V3:.....	46
5.4.2	Controladores de Motor (DRV8825):.....	46
5.4.3	Motores Paso a Paso:.....	47
5.4.4	Fuente de Alimentación:.....	47
5.4.5	Conexión del Arduino y prueba inicial:.....	47
5.5	Plataforma y Estructura de Montaje para el Panel Solar.....	48
5.5.1	Base estructural:.....	48

5.5.2	Diseño y fabricación 3D:.....	48
5.5.3	Sistema de movimiento lineal (X e Y):.....	49
5.5.4	Eje Z y montaje del panel solar:.....	50
5.6	Construcción paso a paso del prototipo.....	50
5.6.1	Primer paso preparación de la base y medición inicial.....	51
5.6.2	Segundo Paso instalación del motor del eje X Izquierdo y alineación inicial del husillo.....	52
5.6.3	Tercer Paso ensamblaje secuencial de los ejes X Derecho, eje Y.....	53
5.6.4	Cuarto paso integración del sistema electrónico.....	55
5.6.5	Quinto paso instalación y conexión de los sensores de luz y endstops.....	56
5.6.6	Sexto paso desarrollo de la lógica de control del sistema de seguimiento solar.....	58
CAPÍTULO VI: DISCUSIÓN Y RESULTADOS.....		61
6.1	Problemas técnicos y ajustes durante la construcción.....	61
6.2	Problemas electrónicos e integración de sensores.....	62
6.3	Comportamiento del sistema durante las pruebas funcionales.....	63
6.4	Reflexiones finales, limitaciones y proyecciones.....	64
6.5	Análisis de costos y proyección a escala real.....	64
CAPÍTULO VII: TRABAJO FUTURO.....		67
7.1	Incorporación de un tercer grado de libertad (eje Z): Propuesta de mejora estructural y funcional.....	68
7.1.1	Descripción técnica de la propuesta.....	69
7.1.2	Importancia, justificación e impacto en el usuario final.....	69
7.2	Impacto energético y económico: Cobertura de cada sistema.....	70
7.2.1	Ganancia porcentual respecto al panel fijo.....	70
7.2.2	Cálculo de disminución de consumo energético en el hogar.....	71
7.2.3	Ahorro energético estimado:.....	71
7.3	Consideraciones sobre la fiabilidad y limitaciones del sistema.....	71
CAPÍTULO VIII: CONCLUSIONES.....		73
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....		75
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		79
ANEXOS.....		82
Anexo 1	Código Fuente.....	82
Anexo 2:	Código fuente Con 3 grados de libertad.....	87
Anexo 3:	Modelo 3D CAD del Prototipo Completo.....	95
Anexo 4:	Listado de Materiales y Componentes.....	95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Esquema de conexiones Esquemático.....	16
Figura 1.2: Esquema completo de conexiones.....	17
Figura 1.3: Esquema solo conexion motor sensores y endstops.....	17
Figura 1.4: Modelo Arduino Uno.....	18
Figura 1.5: Modelo Paneles solares más fotodiode.....	18
Figura 3.1: Distintos tipos de silicio.....	25
Figura 3.2: Composición de un panel solar.....	26
Figura 3.3: Capa de polímero estructural.....	26
Figura 3.4: Bateria de Plomo-Ácido 12v 12Ah.....	33
Figura 4.1 Metodología Espiral del Prototipo.....	39
Figura 5.1: Sensor Fotosensible Lm393.....	42
Figura 5.2: Diagrama de Soldadura de Cables Sensor de luz.....	43
Figura 5.3: Montaje y conexión motores paso a paso.....	45
Figura 5.4 Conexión de Motores paso a paso y batería 12V.....	46
Figura 5.5: Estructura de Montaje.....	48
Figura 5.6: Boceto de Base prototipo Motor X e Y.....	49
Figura 5.7: Bloque Rodamiento Lineal SC8MM.....	49
Figura 5.8: Soporte en L Para Motor Nema 17.....	50
Figura 5.9 Base de madera 70x70x2cm.....	51
figura 5.10 Motor eje X Izquierdo + Guías lineales.....	52
Figura 5.11 Motor eje X derecho e Izquierdo + Guías lineales y Placas.....	53
Figura 5.12 Motor eje Y + Acrilico + Aluminio de fijación.....	54
Figura 5.13 Prototipo Final Con Panel Solar 20W.....	55
Figura 5.13 Ejemplo de Conexión de motores.....	56
Figura 5.14 Ejemplo de Conexión de sensores de luz a la protoboard y la shield cnc v3.....	57
Figura 5.15 Ejemplo de Conexión Sensores Endstop (Fin de Carrera o Recorrido).....	58
Figura 7.1 Ejemplo de vista prototipo con tercer grado de libertad.....	68
Figura 7.2 Prototipo con 3 grados de libertad modelado en 3D.....	72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Comparación de soluciones de seguimiento solar.....	23
Tabla 6.1 Costos Prototipo.....	65
Tabla 6.2 Costos Prototipo Escala Real.....	66

RESUMEN

El presente trabajo de título aborda el desarrollo de un prototipo de panel solar inteligente móvil, diseñado para optimizar la captación de energía solar mediante un sistema de seguimiento en dos ejes (vertical y horizontal). Durante más de nueve meses de investigación y dos meses de construcción, se seleccionaron e integraron cuidadosamente los componentes clave: motores paso a paso NEMA 17, controladores DRV8825, sensores de luz (LDR), sensores de fin de carrera, una Shield CNC V3, y una batería de plomo-ácido sellada de 12V y 12Ah.

El sistema está basado en un microcontrolador Arduino Uno R4, encargado de coordinar de forma autónoma el movimiento del panel solar según las variaciones de luz detectadas por los sensores distribuidos en los extremos del módulo fotovoltaico. La lógica de control implementada considera rutinas de homing, seguimiento activo durante el día, y retorno nocturno al punto de origen. Las pruebas realizadas confirmaron una autonomía promedio de 3,39 horas en modo activo y 85,71 horas en modo pasivo, con desplazamientos suaves y precisos, y un consumo energético altamente controlado gracias a la implementación de microstepping y optimización de ciclos de trabajo.

Durante el proceso de desarrollo se abordaron múltiples desafíos técnicos, como el calentamiento excesivo de motores, vibraciones mecánicas, desalineaciones estructurales, y errores en la lógica de decisión. Estos fueron resueltos mediante ajustes en el diseño mecánico, uso de materiales aislantes, impresión de piezas personalizadas en 3D y refinamiento progresivo del algoritmo de control. Este prototipo representa un avance significativo hacia la implementación de sistemas solares inteligentes escalables, con potencial de integración futura de inteligencia artificial, conectividad remota y sensores ambientales complementarios.

Palabras clave

Panel solar inteligente, seguimiento solar, motores NEMA 17, Arduino Uno, DRV8825, Shield CNC V3, eficiencia energética, prototipado.

ABSTRACT

This thesis project presents the development of a smart mobile solar panel prototype, designed to optimize solar energy capture through a dual-axis tracking system (vertical and horizontal). Over the course of more than nine months of research and two months of construction, key components were carefully selected and integrated, including NEMA 17 stepper motors, DRV8825 drivers, light sensors (LDR), limit switches, a CNC Shield V3, and a sealed 12V 12Ah lead-acid battery.

The system is powered by an Arduino Uno R4 microcontroller, responsible for autonomously coordinating the movement of the solar panel according to variations in sunlight detected by sensors mounted around the module. The control logic incorporates homing routines, active tracking during the day, and automatic return to the initial position at dusk. Testing confirmed an average autonomy of 3.39 hours in active mode and 85.71 hours in passive mode, with smooth and precise movements, and tightly managed energy consumption through the implementation of microstepping and optimized duty cycles.

Throughout the development process, several technical challenges were addressed, including motor overheating, mechanical vibrations, structural misalignments, and initial logic errors. These were resolved by mechanical redesigns, use of insulating materials, 3D printing of custom components, and iterative improvements to the control algorithm. This prototype constitutes a significant step toward the implementation of scalable smart solar systems, with future potential for integration of artificial intelligence, remote connectivity, and complementary environmental sensors.

Keywords

Smart solar panel, solar tracking, NEMA 17 motors, Arduino Uno, DRV8825 drivers, CNC Shield V3, energy efficiency, prototyping.

INTRODUCCIÓN

La creciente necesidad de adoptar soluciones energéticas sostenibles ha impulsado el desarrollo de tecnologías que aprovechan fuentes renovables, como la energía solar. El presente Trabajo de Título aborda el desarrollo de un sistema inteligente de paneles fotovoltaicos móviles, con el objetivo de hacer esta tecnología más accesible para personas particulares y pequeñas empresas que no cuentan con los recursos necesarios para costear sistemas solares complejos y costosos.

El interés por las energías renovables ha adquirido una relevancia aún mayor en el contexto actual de crisis climática. En este sentido, la energía solar se ha posicionado como una de las opciones más viables y sostenibles para generar electricidad de manera descentralizada, lo que resulta especialmente importante en áreas donde la red eléctrica es limitada o inexistente. Existen estudios en Ingeniería Eléctrica que exploran diversas tecnologías para optimizar el aprovechamiento de la energía solar, lo que justifica el desarrollo de una solución tecnológica que incremente la eficiencia de los paneles solares fijos.

La motivación de este Trabajo de Título también está estrechamente ligada a la problemática económica que enfrentan muchos hogares y pequeñas empresas en su búsqueda por adoptar tecnologías solares. La energía solar puede ser una solución prometedora para reducir los costos de electricidad a largo plazo, pero la inversión inicial sigue siendo una barrera importante para muchos. Los sistemas de paneles solares fijos, que no pueden ajustarse dinámicamente a las condiciones ambientales, representan una limitación adicional, ya que su eficiencia depende de la posición del sol y de factores externos como sombras proyectadas por edificios o árboles. Esto afecta principalmente a personas y pymes con recursos limitados, quienes no pueden permitirse sistemas solares más avanzados como los rastreadores solares automáticos, que pueden costar hasta un 50% más que los sistemas fijos estándar.

Es en este contexto que surge la propuesta: desarrollar un prototipo de sistema inteligente de paneles fotovoltaicos móviles que permita optimizar la captación de energía solar de manera asequible y eficiente. Este sistema estaría diseñado para ajustarse dinámicamente en función de las condiciones solares y ambientales, utilizando sensores de luz y un carril motorizado para mejorar el rendimiento de los paneles sin necesidad de costosas tecnologías de rastreo solar. El

objetivo principal es ofrecer una solución accesible para particulares y pequeñas empresas que buscan reducir sus costos energéticos sin incurrir en grandes inversiones.

A lo largo del desarrollo de este Trabajo de Título, se han investigado diferentes aproximaciones tecnológicas que podrían implementarse para mejorar la captación de energía solar. Una de las soluciones más avanzadas son los sistemas de rastreo solar, los cuales ajustan automáticamente la posición de los paneles en función de la trayectoria del sol. Sin embargo, estos sistemas, aunque efectivos, son costosos y complejos, lo que los hace poco viables para personas o negocios con recursos limitados. Por otro lado, soluciones más económicas, como los paneles ajustables manualmente, dependen de la intervención humana y no ofrecen una optimización constante, lo que resulta en pérdidas energéticas significativas.

El presente Trabajo de Título propone una solución intermedia que combina la eficiencia de los sistemas de rastreo solar con la simplicidad y bajo costo de los sistemas solares fijos. A lo largo de este informe, se detallarán los aspectos técnicos y metodológicos que sustentan el diseño del prototipo, así como los beneficios esperados en términos de eficiencia energética y reducción de costos.

CAPÍTULO I: FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El acceso a tecnologías de energía solar más eficientes sigue siendo limitado para usuarios particulares y pequeñas empresas, principalmente debido al alto costo de los sistemas de seguimiento solar automatizado. Esta situación genera una barrera tecnológica que afecta la eficiencia de los paneles fotovoltaicos fijos, los cuales no pueden adaptarse dinámicamente a las condiciones de iluminación solar durante el día. Este capítulo establece los objetivos del Trabajo de Título, que buscan desarrollar un prototipo funcional de sistema solar inteligente móvil, diseñado para seguir la trayectoria del sol en dos ejes mediante el uso de sensores de luz y controladores de bajo costo. Se plantea el problema desde la perspectiva de la accesibilidad tecnológica, destacando la necesidad de incrementar la eficiencia energética sin recurrir a soluciones comerciales costosas. Además, se analiza el estado del arte en torno a los sistemas de seguimiento solar disponibles en el mercado, identificando sus limitaciones de aplicabilidad en sectores con recursos restringidos. Finalmente, se presenta la propuesta del presente Trabajo de Título: el diseño y construcción de una plataforma de seguimiento solar automatizado basada en Arduino, orientada a ofrecer una solución asequible y replicable para mejorar el aprovechamiento energético en contextos residenciales y microempresariales.

1.1. Situación actual

En la actualidad, la transición hacia fuentes de energía renovable ha tomado una relevancia crucial a nivel global. En particular, la energía solar fotovoltaica se ha destacado como una de las alternativas más viables y sostenibles para la generación de electricidad, especialmente en áreas donde la disponibilidad de energía eléctrica es limitada o inexistente. Sin embargo, la implementación efectiva de sistemas solares enfrenta múltiples desafíos, tanto en entornos rurales como urbanos.

1.1.1 Situación en Áreas Rurales y Urbanas

En muchas regiones rurales, la infraestructura eléctrica es deficiente o simplemente no existe, lo que limita el acceso a servicios básicos y el desarrollo económico de estas comunidades. La energía solar se presenta como una solución prometedora para estas zonas, ya que permite la generación de electricidad de manera descentralizada. No obstante, la eficiencia de

los sistemas fotovoltaicos puede verse comprometida por factores ambientales como la presencia de árboles, montañas y otros obstáculos que reducen la cantidad de luz solar que incide sobre los paneles solares. Adicionalmente, la exposición a condiciones climáticas adversas, como tormentas y polvo, puede degradar los paneles solares y reducir su vida útil, aumentando los costos de mantenimiento y disminuyendo su rentabilidad a largo plazo (Smith, 2017).

En áreas urbanas, aunque la infraestructura eléctrica es más robusta, la integración de sistemas solares enfrenta otros retos. La densidad de edificios y otras construcciones puede generar sombras que afectan significativamente la captación de energía solar. Además, el crecimiento constante de las ciudades, con la construcción de nuevas edificaciones, puede alterar las condiciones de irradiación solar de los paneles instalados, reduciendo su eficiencia con el tiempo. En este contexto, la falta de sistemas que permitan a los paneles solares ajustarse dinámicamente a los cambios en el entorno limita su capacidad para operar de manera óptima (Jones, 2018).

1.1.2 Soluciones actuales y sus limitaciones

Una solución ampliamente utilizada en grandes instalaciones solares es el sistema de rastreo solar. Estos dispositivos permiten que los paneles solares sigan la trayectoria del sol a lo largo del día, ajustando su orientación para maximizar la captación de luz solar. Los rastreadores solares se dividen en dos categorías principales: los de un solo eje y los de dos ejes. Los sistemas de un solo eje permiten ajustes horizontales, mientras que los de dos ejes permiten ajustes tanto horizontales como verticales, optimizando aún más la eficiencia de captación de energía. Según Duffie y Beckman (2013), el uso de rastreadores solares puede aumentar la eficiencia de un sistema fotovoltaico en un 25% a 35% en comparación con sistemas fijos.

Sin embargo, estos sistemas no están exentos de desventajas. Su implementación requiere una inversión significativa, tanto en términos de costos iniciales como de mantenimiento, lo que los hace menos accesibles para aplicaciones residenciales o de pequeña escala. Además, la complejidad técnica de los rastreadores solares implica un mayor riesgo de fallos mecánicos y, en consecuencia, mayores costos de operación. Por ejemplo, en zonas rurales donde el acceso a servicios técnicos es limitado, cualquier falla en el sistema de rastreo podría dejar a las comunidades sin energía durante periodos prolongados (Kaldellis, 2014).

Por otro lado, los paneles solares ajustables manualmente representan una opción más económica, permitiendo a los usuarios cambiar la orientación de los paneles según la estación del año o las condiciones diarias. Sin embargo, este enfoque depende de la intervención humana y no garantiza un ajuste continuo y óptimo, lo que puede llevar a pérdidas significativas de eficiencia. Además, la falta de automatización significa que estos sistemas no pueden reaccionar de manera inmediata a cambios en el entorno, como la aparición de nubes o sombras temporales, lo que limita su efectividad en entornos urbanos dinámicos (Smith, 2017).

1.1.3 Necesidad de innovación

Dada la complejidad y los costos de los sistemas solares avanzados, existe una necesidad clara de desarrollar soluciones más accesibles y eficientes que permitan optimizar la captación de energía solar en diferentes entornos, tanto rurales como urbanos. Estas soluciones deben ser asequibles para personas particulares y pequeños negocios, y al mismo tiempo proporcionar la flexibilidad necesaria para ajustarse a las condiciones ambientales sin incurrir en costos elevados de mantenimiento. Las tecnologías actuales, aunque efectivas en grandes instalaciones, no cumplen con estos criterios en aplicaciones de pequeña escala, lo que deja espacio para nuevas propuestas que resuelvan esta problemática.

1.2. Planteamiento del problema

El desarrollo de fuentes de energía renovable ha tomado una relevancia crítica a nivel global, particularmente para proporcionar soluciones energéticas sostenibles en entornos urbanos y rurales. La energía solar fotovoltaica es una de las alternativas más accesibles y extendidas. Sin embargo, la ineficiencia de los sistemas solares fijos representa una barrera importante para los usuarios particulares, especialmente aquellos con menos recursos económicos, que no pueden costear soluciones más avanzadas como los sistemas de rastreo solar.

En entornos urbanos, los propietarios de viviendas que instalan paneles solares enfrentan obstáculos como la sombra proyectada por edificios y árboles, lo que reduce la eficiencia de sus sistemas en un 20% a 30%, según estudios sobre paneles solares instalados en zonas densamente edificadas (Ninsawat et al., 2016). Las pérdidas de eficiencia, provocadas por obstrucciones y cambios en la posición del sol, afectan principalmente a quienes no cuentan con los recursos

económicos para instalar sistemas avanzados o costosos, retrasando el retorno de su inversión inicial.

En áreas rurales, donde la infraestructura eléctrica es limitada o inexistente, familias y pequeñas comunidades que dependen de paneles solares fijos sufren un suministro insuficiente de electricidad debido a la incapacidad de los paneles para ajustarse dinámicamente a las condiciones cambiantes del entorno. En estas zonas, la eficiencia puede reducirse hasta en un 40% durante ciertas estaciones del año, especialmente en invierno o en climas nublados, afectando el acceso a servicios básicos (Feron, 2016). Estas comunidades, que suelen tener pocos recursos financieros, no pueden permitirse ampliar sus sistemas con paneles adicionales o adoptar tecnologías más avanzadas, lo que perpetúa su vulnerabilidad energética.

Asimismo, las pymes (pequeñas y medianas empresas) también se ven afectadas. Aunque muchas empresas pequeñas han adoptado sistemas solares como una medida para reducir costos operativos, la ineficiencia de los paneles solares fijos retrasa significativamente el retorno de inversión. Sin acceso a sistemas móviles o a rastreadores solares, estas empresas enfrentan altos costos iniciales y menores ahorros energéticos a lo largo del tiempo, lo que limita su competitividad y sostenibilidad a largo plazo.

A pesar de que las grandes empresas y gobiernos también se ven involucrados en la transición hacia energías renovables, el impacto más significativo recae sobre los particulares y pequeñas empresas, que no pueden permitirse los sistemas solares más avanzados. Sin soluciones asequibles, la adopción masiva de energías renovables sigue siendo limitada en estos sectores, lo que afecta negativamente tanto a la sostenibilidad ambiental como a la economía de las personas.

1.2.1 Justificación

Si este problema no se aborda adecuadamente, las personas con menos recursos financieros seguirán excluidas de las ventajas de la energía solar, y la adopción de estas tecnologías continuará siendo lenta. Las ineficiencias en los sistemas solares fijos resultan en una barrera económica significativa para los particulares y pymes, que se ven obligados a buscar otras alternativas energéticas más costosas o menos eficientes. Resolver este problema permitiría democratizar el acceso a energías renovables, mejorando la calidad de vida de las personas y contribuyendo a las metas globales de sostenibilidad.

1.3. Solución propuesta

La solución planteada consiste en el desarrollo de un prototipo de un sistema inteligente de paneles fotovoltaicos móviles diseñado para optimizar la captación de energía solar en función de las condiciones ambientales. Este sistema se distingue por su capacidad para ajustarse dinámicamente a las condiciones de radiación solar, maximizando la eficiencia en la captación de energía sin incurrir en los altos costos asociados con los sistemas de seguimiento solar tradicionales. A través de esta solución, se busca ofrecer una alternativa accesible para personas particulares y pequeñas empresas que no cuentan con los recursos necesarios para implementar tecnologías más avanzadas y costosas.

1.3.1 Componentes del prototipo

El prototipo estará compuesto por los siguientes componentes principales:

1. Paneles solares: Se utilizarán paneles fotovoltaicos del tipo policristalino, seleccionados por su rendimiento adecuado en condiciones de nubosidad. Estos paneles son más accesibles económicamente y proporcionan una eficiencia aceptable, lo que los hace ideales para usuarios de bajos recursos. Los paneles se conectarán al sistema de seguimiento solar para ajustarse de manera automática a las mejores condiciones de captación de luz solar.
2. Carril motorizado: El panel solar será montado en un carril motorizado que le permitirá desplazarse en dos ejes (horizontal y vertical), ajustando su orientación según las condiciones solares. Para asegurar durabilidad y resistencia, se utilizarán materiales ligeros pero duraderos, como el aluminio. Estos materiales garantizan la longevidad del sistema y su adecuado funcionamiento en distintas condiciones ambientales.
3. Sensores de luz: El sistema utilizará sensores de luz para medir la intensidad de la radiación solar en tiempo real. Estos datos serán procesados por el controlador del sistema, lo que permitirá ajustar automáticamente la orientación de los paneles para maximizar la captación de energía solar. Los sensores ofrecerán un seguimiento continuo de la luz solar a lo largo del día, optimizando el rendimiento del sistema.
4. Controlador y software de gestión: Se emplea un microcontrolador (como un Arduino Uno o similar) que procesa la información proveniente de los sensores y envía las instrucciones necesarias al carril motorizado para ajustar la posición del panel solar. El controlador estará

programado con algoritmos diseñados para optimizar el seguimiento solar y garantizar una operación precisa del sistema. Este microcontrolador gestionará de manera autónoma el funcionamiento del sistema y asegurará la eficiencia en el consumo de energía.

1.3.2 Esquema de circuitos

A continuación se presenta un esquema de circuito que ilustra cómo se conectarán los distintos componentes del sistema:

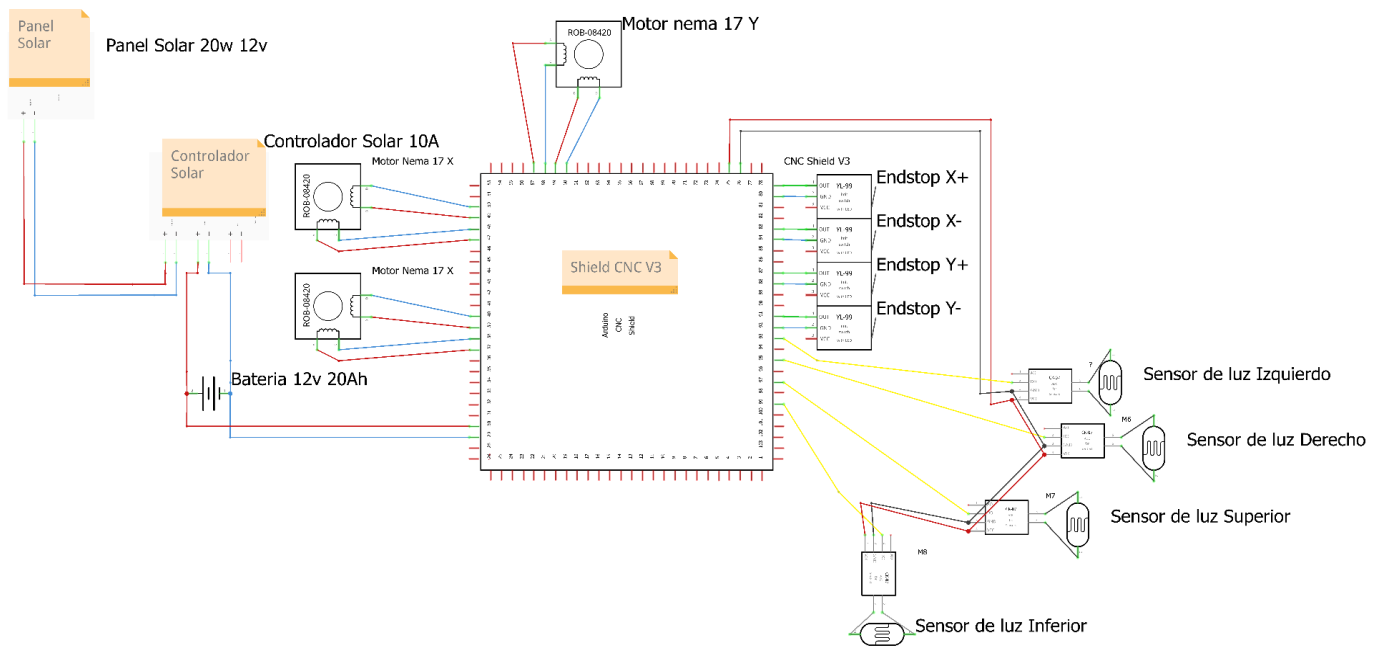


Figura 1.1: Esquema de conexiones Esquemático

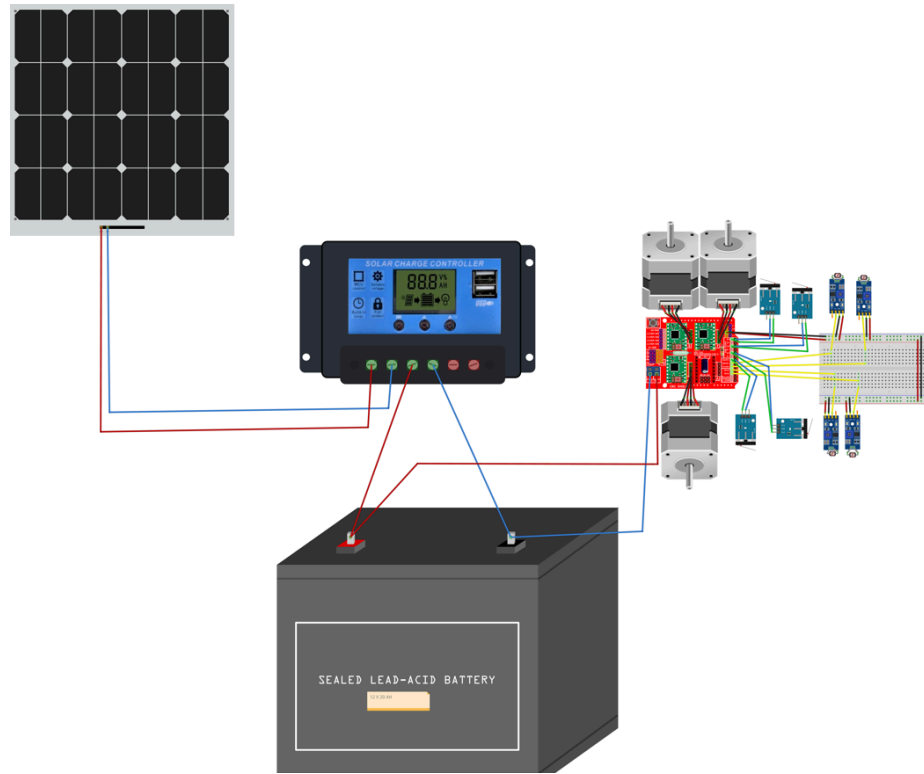


Figura 1.2: Esquema completo de conexiones

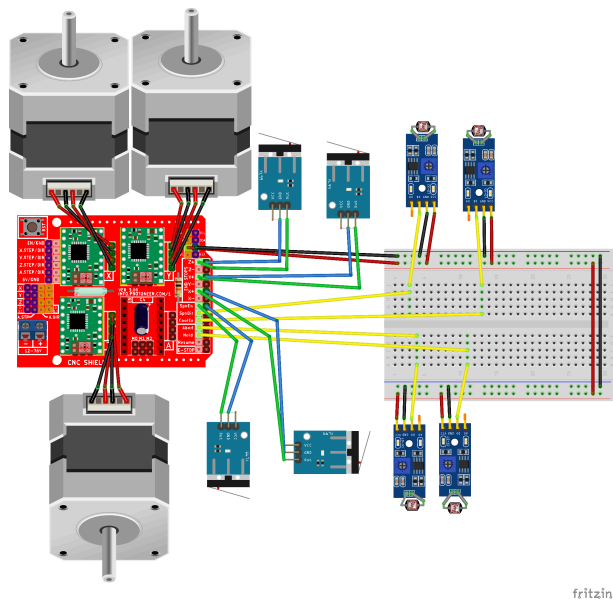


Figura 1.3: Esquema solo conexion motor sensores y endstops

1.3.3 Funcionamiento del sistema

El funcionamiento del sistema seguirá los siguientes pasos:

1. Los sensores de luz capturan la intensidad de la radiación solar en tiempo real.
2. El controlador procesa estos datos y ajusta automáticamente la orientación de los paneles solares para optimizar la captación de energía.
3. Los motores del carril motorizado moverán los paneles solares para alinearlos con la dirección de la radiación solar.

Este diseño está orientado a maximizar la eficiencia de los paneles solares en cualquier entorno, independientemente de las condiciones climáticas o de iluminación.

- Arduino Uno

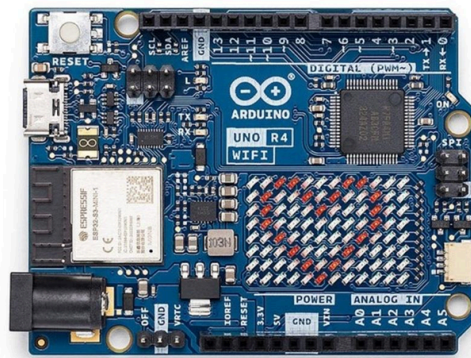


Figura 1.4: Modelo Arduino Uno

- Panel solar



Figura 1.5: Modelo Paneles solares más fotodiodo

1.3.4 Resultados esperados

Se espera que este sistema inteligente permita una mayor captación de energía solar en comparación con los sistemas fijos tradicionales, especialmente en entornos urbanos y rurales donde existan obstrucciones que reducen la eficiencia de los paneles solares. La capacidad del sistema para ajustarse automáticamente a las condiciones ambientales reducirá las pérdidas de energía, permitiendo que los paneles funcionen a su máximo potencial en todo momento.

Además, este prototipo ofrecerá una solución asequible y eficiente, dirigida a personas y pequeñas empresas que no cuentan con los recursos para implementar sistemas solares avanzados. Al reducir el costo y la complejidad técnica, el sistema democratiza el acceso a tecnologías de energía renovable, contribuyendo a un mayor uso de energías limpias en una amplia gama de aplicaciones.

Este enfoque innovador, basado en la accesibilidad, eficiencia y simplicidad de operación, responde a la necesidad de hacer la energía solar más accesible y eficiente para sectores con menos recursos. De esta manera, se espera que el sistema tenga un impacto positivo en la adopción de tecnologías solares en entornos rurales y urbanos, fomentando un modelo energético más sostenible y eficiente.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Desarrollar un prototipo funcional de un sistema inteligente de paneles fotovoltaicos móviles para uso particular, que optimice la captación de energía solar en entornos con obstrucciones y condiciones cambiantes.

1.4.2. Objetivos específicos

- Investigar sobre los sistemas de seguimiento solar existentes y técnicas de diseño para optimizar la captación de energía solar en entornos con obstrucciones.
- Diseñar el hardware del sistema, carril motorizado.
- Implementar el software de control para gestionar dinámicamente la orientación de los paneles solares basándose en datos de sensores y condiciones ambientales.
- Probar y evaluar el rendimiento del prototipo en diferentes entornos, realizando ajustes necesarios para mejorar su eficiencia.

1.5. Alcances y Limitaciones

1.5.1 Alcances

El desarrollo del prototipo de un sistema inteligente de paneles fotovoltaicos móviles está diseñado para mejorar la eficiencia energética de los sistemas solares, haciéndolos más accesibles para personas y pequeñas empresas que no disponen de los recursos necesarios para invertir en sistemas de rastreo solar costosos. El Trabajo de Título tiene como alcance principal beneficiar a los siguientes grupos:

- Particulares con recursos limitados: La solución está destinada a propietarios de viviendas que buscan reducir sus costos energéticos mediante la adopción de tecnología solar, pero que enfrentan la barrera de los altos costos asociados con sistemas solares más avanzados. El prototipo propuesto permitirá maximizar la eficiencia de los paneles solares sin necesidad de realizar grandes inversiones, facilitando el acceso a energía limpia y más económica.
- Pequeñas y medianas empresas (pymes): Las pymes que han adoptado tecnologías solares para reducir costos operativos, pero que se ven afectadas por la ineficiencia de los paneles solares fijos, se beneficiarán de esta solución. El sistema inteligente de paneles móviles optimizará la captación de energía, lo que permitirá a estas empresas reducir aún más sus costos de operación y acelerar el retorno de la inversión en energía solar.
- Comunidades rurales con acceso limitado a electricidad: En zonas rurales, donde la red eléctrica es deficiente o inexistente, las familias y pequeñas comunidades que dependen de la energía solar podrán mejorar el suministro energético mediante el aumento en la eficiencia de sus paneles solares. Esto contribuirá a un acceso más fiable a servicios básicos como iluminación, refrigeración y comunicaciones.

1.5.2 Limitaciones

- Recursos disponibles: El Trabajo de Título estará limitado por el tiempo, el presupuesto y el acceso a tecnologías y materiales específicos. Dentro de estas limitaciones, las soluciones viables tendrán prioridad.
- Alcance geográfico: El análisis se centrará en entornos urbanos específicos y puede no ser generalizable a otras ubicaciones geográficas. En el diseño del sistema de seguimiento solar, se tomarán en cuenta las particularidades y limitaciones de cada entorno urbano.
- Aspectos Legales y Regulatorios: El Trabajo de Título no cubrirá todos los aspectos legales y regulatorios relacionados con la instalación de sistemas solares en todos los entornos.
- El prototipo no está dirigido a grandes empresas o instalaciones a gran escala, ya que su enfoque se centra en usuarios residenciales y pequeñas empresas que buscan una solución asequible y eficiente para sus necesidades energéticas.

CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE

El seguimiento solar es una técnica consolidada para aumentar la captación fotovoltaica, mejorando la eficiencia entre un 20 % y un 50 % frente a sistemas fijos, según estudios del National Renewable Energy Laboratory (NREL). Sin embargo, su alta sofisticación y costo limitan su adopción en pequeñas instalaciones.

2.1 Sistemas Comerciales de Seguimiento

Empresas como Soltec, líder en tecnología de rastreo solar, ofrecen sistemas como el SF7. Este tracker de doble eje ofrece un rendimiento superior para grandes proyectos solares. A pesar de su eficiencia, este tipo de equipos tiene costos estimados en el rango de \$1.200.000 a \$1.800.000 CLP, sumado a la compleja instalación profesional requerida.

2.2 Prototipos DIY y Soluciones Educativas

Existe un creciente ecosistema de proyectos académicos y de fabricación casera (DIY), que emplean microcontroladores como Arduino y sensores LDR. Estos prototipos son educativos y de bajo costo (aproximadamente \$60.000 a \$100.000 CLP), pero suelen carecer de:

- Durabilidad
- Sincronización entre ejes
- Manejo eficiente del consumo energético

No obstante, ofrecen una base valiosa para experimentar con tecnologías de seguimiento solar.

2.3 Trabajo de Título Actual: Prototipo Automatizado de Bajo Costo

El diseño presentado en este informe se posiciona como una alternativa intermedia:

- Utiliza lógica pasiva que apaga los motores tras cada movimiento para ahorrar energía, lo que es inusual en prototipos DIY existentes.

- Se basa en componentes comunes, Arduino y controladores DRV8825, montados de manera modular con impresión 3D.
- Aún se encuentra en fase de prototipo. Su costo total permanece por definir, pues se espera completar un presupuesto final.

2.4 Comparativa de Soluciones

Sistema	Costo Estimado (CLP)	Tipo de Seguimiento	Aplicación	Principales Limitaciones
Soltec SF7 (Industrial)	\$1.200.000 - \$1.800.000	Doble eje automatizado	Plantas solares a gran escala	Alto costo, instalación profesional
Sistema tipo DIY educativo	\$60.000 - \$100.000	Un eje manual o automático	Entornos educativos	Baja durabilidad, sin eficiencia energética optimizada
Trabajo de Título Actual (Este Prototipo con lo 3 ejes de libertad)	\$200.000 - \$300.000	Triple Eje automatizado con lógica Pasiva	Uso residencial o en Pymes	Prototipo, sin carcasa industrial ni sensores ambientales.

Tabla 2.1 Comparación de soluciones de seguimiento solar.

Como se observa, el presente prototipo busca ocupar un lugar intermedio entre las soluciones industriales y educativas, proponiendo una alternativa funcional y automatizada, pero a bajo costo, que pueda ser adoptada por personas o pequeñas empresas que deseen incorporar tecnologías de energía renovable de forma más accesible.

Esta propuesta se diferencia por incluir una lógica de control basada en detección de luz en tiempo real, automatización en dos ejes, ahorro energético mediante desactivación de motores en estado pasivo, y potencial de escalamiento. Además, al construirse bajo un enfoque de prototipado iterativo y personalización mediante impresión 3D, representa una solución adaptable a diversos contextos y limitaciones técnicas.

CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO

3.1 Efecto fotoeléctrico

El efecto fotoeléctrico es el fenómeno que permite la conversión de la energía luminosa en energía eléctrica, y es fundamental para el funcionamiento de los paneles solares. Este efecto fue explicado por Albert Einstein en 1905, marcando un avance crucial en la física cuántica y en las tecnologías de conversión de energía solar. Según Einstein (1905), cuando la luz incide sobre un material semiconductor, los fotones (partículas de luz) transfieren su energía a los electrones del material. Si la energía del fotón es suficiente, es decir, mayor que la función de trabajo del material, los electrones son liberados del átomo. Este fenómeno es la base para la generación de electricidad en las celdas solares, ya que los electrones liberados pueden ser dirigidos a través de un circuito externo, creando una corriente eléctrica.

Este principio es esencial en las celdas fotovoltaicas, que están diseñadas específicamente para maximizar este efecto. Los materiales semiconductores, como el silicio, son especialmente adecuados para este propósito debido a sus propiedades electrónicas. En una celda solar, el silicio está dopado con impurezas para crear una estructura de unión p-n, que facilita la separación de los electrones y la creación de un campo eléctrico interno. Cuando los fotones de la luz solar golpean la celda, generan pares electrón-hueco que son separados por el campo eléctrico, resultando en una corriente eléctrica usable (Einstein, 1905).

Además, el estudio del efecto fotoeléctrico ha llevado a desarrollos tecnológicos en la optimización de los materiales usados en celdas solares, permitiendo la creación de dispositivos más eficientes y duraderos. La comprensión detallada de este fenómeno sigue siendo un área activa de investigación, con avances que buscan mejorar la eficiencia de conversión y reducir los costos de producción de energía solar.

3.2 Composición de un panel solar

Un panel solar es un dispositivo compuesto por múltiples celdas fotovoltaicas, diseñadas para capturar la luz solar y convertirla en electricidad. Estas celdas están generalmente hechas de

silicio, un material semiconductor que es fundamental para el funcionamiento del panel. El silicio se utiliza en dos formas principales: monocristalino, policristalino y una no tan común que es la capa fina (amorfos), cada uno con sus ventajas y desventajas en términos de eficiencia y costo (Messenger & Ventre, 2012).



Figura 3.1: Distintos tipos de silicio

Cada celda fotovoltaica consiste en una fina capa de silicio dopado, que se divide en una capa de tipo p (positiva) y una capa de tipo n (negativa), formando lo que se conoce como una unión p-n. Esta estructura es crítica porque permite la creación de un campo eléctrico interno. Cuando la luz solar golpea la celda, los fotones liberan electrones en la capa de tipo n, creando una corriente que puede ser recogida y utilizada como electricidad (Messenger & Ventre, 2012).

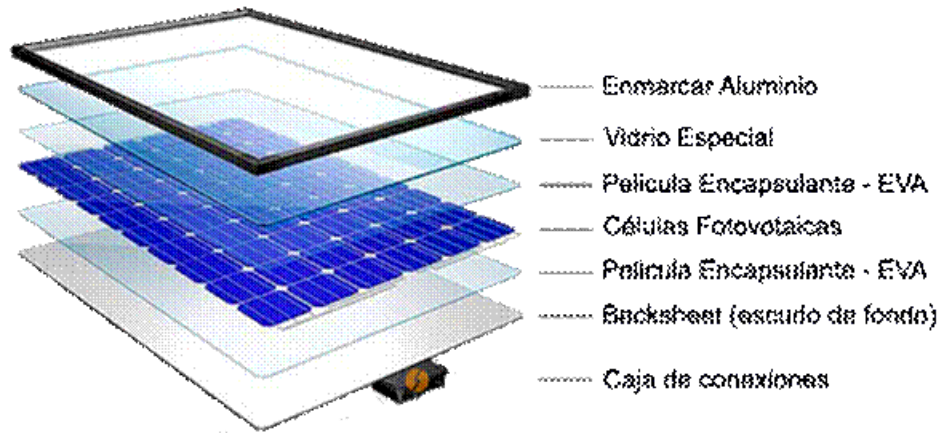


Figura 3.2: Composición de un panel solar

Además de las celdas, un panel solar incluye otros componentes importantes. La cubierta de vidrio templado protege las celdas fotovoltaicas de las inclemencias del tiempo y el impacto físico. El vidrio utilizado es altamente transparente para maximizar la cantidad de luz que llega a las celdas. Entre el vidrio y las celdas, hay una capa de encapsulación, generalmente hecha de etileno-vinil-acetato (EVA), que protege las celdas de la humedad y otros contaminantes. En la parte posterior del panel, una capa de polímero proporciona soporte estructural y protección adicional. El marco, típicamente hecho de aluminio, asegura la rigidez del panel y facilita su instalación (Messenger & Ventre, 2012).



Figura 3.3: Capa de polímero estructural

Los avances en la tecnología de los materiales han permitido la mejora continua de los paneles solares, tanto en términos de eficiencia como de durabilidad. Por ejemplo, el desarrollo

de capas antirreflectantes y materiales más resistentes al calor ha mejorado significativamente la eficiencia de los paneles en diversas condiciones ambientales. Este progreso ha hecho que la energía solar sea una opción cada vez más viable para una amplia gama de aplicaciones, desde pequeños sistemas domésticos hasta grandes instalaciones comerciales.

3.3 Energía que entrega un panel solar

La cantidad de energía que un panel solar puede entregar depende de varios factores, incluidos el tamaño del panel, la eficiencia de las celdas solares, la intensidad de la luz solar y las condiciones ambientales. La eficiencia de un panel solar se define como la proporción de la energía solar que incide sobre el panel que se convierte en energía eléctrica utilizable. Esta eficiencia varía según el tipo de celdas solares utilizadas; por ejemplo, los paneles monocristalinos suelen tener una eficiencia superior, típicamente entre 17% y 22%, mientras que los paneles policristalinos tienen una eficiencia ligeramente menor, entre 15% y 17% (Duffie & Beckman, 2013).

Para calcular la energía que un panel solar puede producir, es fundamental considerar la irradiancia solar, que es la cantidad de energía solar recibida por unidad de superficie, medida en vatios por metro cuadrado (W/m^2). Bajo condiciones ideales, como en un día soleado sin nubes, la irradiancia solar promedio es de aproximadamente $1000 \text{ W}/\text{m}^2$. La potencia que un panel solar puede generar se calcula multiplicando la irradiancia solar, la eficiencia del panel y el área del panel. Por ejemplo, un panel de 1.6 m^2 con una eficiencia del 20% bajo una irradiancia solar de $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ puede generar una potencia de 320W (Duffie & Beckman, 2013).

Además, la energía que un panel solar produce a lo largo del día varía debido a la posición del sol, la inclinación del panel y la presencia de sombras u obstáculos. Los sistemas de seguimiento solar pueden aumentar significativamente la captación de energía al ajustar la orientación del panel para seguir al sol a lo largo del día. Sin embargo, el uso de estos sistemas debe balancearse con el costo y la complejidad adicional que introducen. A pesar de estos desafíos, la energía solar sigue siendo una fuente prometedora y en crecimiento de energía limpia y renovable, con un potencial significativo para satisfacer las demandas energéticas futuras de manera sostenible (Duffie & Beckman, 2013).

3.4 Cálculo del consumo energético del sistema

En el diseño del sistema de panel solar inteligente móvil, es fundamental analizar el consumo energético de cada componente para garantizar la correcta selección de la batería y lograr un funcionamiento eficiente. Esto implica aplicar principios básicos de electricidad y energía para calcular la potencia consumida y estimar el tiempo de autonomía del sistema.

3.4.1 Ley de la potencia

La potencia eléctrica consumida por un dispositivo se define como el producto del voltaje aplicado y la corriente que fluye a través de este. Según Tipler y Mosca (2007):

"La potencia eléctrica es una medida de la energía transferida o consumida por unidad de tiempo en un circuito eléctrico."

La relación matemática es:

$$P = V * I$$

Donde:

P: Potencia consumida (vatios, W).

V: Voltaje aplicado al componente (voltios, V).

I: Corriente que consume el componente (amperios, A).

3.4.2 Energía almacenada en la batería

La capacidad total de una batería se puede expresar en términos de energía almacenada, que depende del voltaje nominal y la capacidad en amperios-hora. Según Kalogirou (2014):

"La energía disponible en una batería se calcula multiplicando el voltaje nominal por la capacidad en amperios-hora, resultando en vatios-hora."

Matemáticamente:

$$E_b = V_b * C_b$$

Donde:

E_b : Energía almacenada en la batería (vatios-hora, Wh).

V_b : Voltaje nominal de la batería (voltios, V).

C_b : Capacidad de la batería (amperios-hora, Ah).

3.4.3 Tiempo de operación

El tiempo de autonomía de una batería se calcula considerando la capacidad de la batería y el consumo total de corriente del sistema. Masters (2013) explica que:

"El tiempo de operación de un sistema alimentado por baterías depende de la relación entre la capacidad de la batería y la corriente consumida por el sistema".

La fórmula utilizada es:

$$T = C_b \div I_{Total}$$

Donde:

T: Tiempo de operación (horas, h).

C_b : Capacidad de la batería (amperios-hora, Ah).

I_{Total} : Corriente total consumida por el sistema (amperios, A).

3.5 Simulación de escenarios

3.5.1 Modo Activo

En el modo activo, el sistema de seguimiento solar opera con todos sus componentes principales permanentemente energizados, sin importar si el panel requiere reposicionamiento en ese momento o no. En este estado, el microcontrolador (Arduino), los sensores de luz (LDR), los motores paso a paso, los drivers y los sensores de fin de carrera (endstops) permanecen encendidos y listos para actuar de manera continua a lo largo del día.

Esta configuración permite que el sistema ejecute movimientos de ajuste de forma inmediata ante cualquier cambio en la posición del sol o la aparición de una sombra, garantizando una reacción instantánea y máxima precisión en el seguimiento solar. Los motores y sus drivers reciben alimentación constante, por lo que pueden actuar sin demoras cada vez que los sensores detectan la necesidad de corregir la orientación del panel.

El principal beneficio de este modo es la capacidad del sistema para mantener el panel solar en la posición óptima en todo momento, maximizando así la captación de energía y

reduciendo al mínimo las pérdidas por desviaciones angulares o por la presencia de sombras accidentales. Sin embargo, esta estrategia conlleva un consumo energético significativamente elevado, ya que los motores y sus componentes electrónicos consumen energía de manera continua, lo que reduce la autonomía del sistema en comparación con el modo pasivo.

El modo activo resulta especialmente adecuado para aplicaciones donde la precisión en el seguimiento y la respuesta inmediata son factores críticos, y donde la disponibilidad de energía no constituye una limitación relevante.

Para determinar el consumo total de corriente eléctrica durante el funcionamiento en modo activo, se emplea la siguiente expresión, la cual considera el aporte de todos los componentes energizados simultáneamente en este estado operativo:

$$I_{Total\ Activo} = 2 \times I_{Motor} + 2 \times I_{Controlador} + I_{Arduino} + I_{Sensores}$$

3.5.2 Modo pasivo

En el modo pasivo, el sistema se encuentra en un estado de bajo consumo energético, diseñado para maximizar la autonomía de la batería. De este modo, únicamente permanecen encendidos el microcontrolador (Arduino) y los sensores de luz (LDR), que se encargan de monitorizar en tiempo real la presencia y posición de la radiación solar. Los motores paso a paso, los drivers y los sensores de fin de carrera (endstops) permanecen apagados y no consumen energía durante este periodo, activándose únicamente cuando los sensores detectan un cambio significativo en la iluminación o la aparición de una sombra que requiera reposicionar el panel solar.

Este enfoque permite que el sistema mantenga un consumo energético mínimo durante largos intervalos, encendiendo los actuadores sólo de manera puntual y por cortos lapsos de tiempo. De esta forma, el modo pasivo resulta especialmente ventajoso para aplicaciones donde la optimización de la autonomía es prioritaria, ya que reduce considerablemente la demanda sobre la batería respecto al modo activo.

El consumo total de corriente eléctrica en modo pasivo se determina mediante la siguiente expresión, que considera únicamente los elementos que permanecen energizados de manera continua en este estado:

$$I_{Total Pasivo} = I_{Arduino} + I_{Sensores}$$

3.5.3 Resultados del cálculo

Considerando que cada driver está ajustado para entregar una corriente de 1.7 A a cada motor paso a paso, el cálculo del consumo total de corriente en modo activo se realiza de la siguiente manera:

$$I_{Total Activo} = 3 \times 1.7A + 3 \times 0.5A + 0.09A + 0.05A = 6.74A$$

Con una batería de 12V y 12Ah, la autonomía estimada en modo activo es:

$$T_{Activo} = \frac{12Ah}{6.74A} = 1.78 \text{ horas}$$

En modo pasivo, el consumo total corresponde únicamente al Arduino y los sensores de luz, por lo que la autonomía es considerablemente mayor:

$$I_{Total Pasivo} = 0.09A + 0.05A = 0.14A$$

Con una batería de 12V y 12Ah, la autonomía estimada en modo pasivo es:

$$T_{Pasivo} = \frac{12Ah}{0.14A} = 85.71 \text{ horas}$$

- Modo activo: el tiempo de operación estimado es $T_{Activo} = 1.78$ horas.
- Modo pasivo: el tiempo de operación estimado es $T_{Pasivo} = 85.71$ horas.

3.6 Arduino Uno

El Arduino Uno es una plataforma de hardware libre ampliamente utilizada para el control y programación de dispositivos electrónicos. Se basa en un microcontrolador ATmega328P y es compatible con una amplia variedad de sensores y módulos de expansión (Arduino, n.d.).

En este Trabajo de Título, el Arduino Uno actuará como el cerebro del sistema, encargándose de recibir los datos de los sensores de luz y controlar el movimiento de los motores que ajustarán la orientación de los paneles solares.

3.6.1 Características clave del Arduino Uno

- Simplicidad y versatilidad: El Arduino Uno es uno de los modelos más utilizados por su facilidad de uso y gran cantidad de bibliotecas disponibles (Banzi & Shiloh, 2014).
- Compatibilidad con módulos de comunicación: Aunque no cuenta con conectividad inalámbrica integrada, el Arduino Uno puede ampliarse fácilmente con módulos de Bluetooth o Wi-Fi para permitir el control remoto del sistema o la supervisión desde una aplicación móvil (Monk, 2013).

3.7 Sensores de luz (LDR - Light Dependent Resistors)

Los sensores de luz (LDR) son esenciales para medir la intensidad de la luz solar y optimizar la orientación de los paneles solares. Estos sensores varían su resistencia según la cantidad de luz recibida, proporcionando datos en tiempo real que el Arduino Uno utiliza para mover los paneles (Electronics Tutorials, n.d.).

3.7.1 Principio de funcionamiento

A medida que la luz solar incide sobre los sensores, la resistencia del LDR cambia, lo que genera una señal que el Arduino puede interpretar para ajustar la posición de los paneles solares hacia la zona de mayor luminosidad.

3.8 Motores paso a paso NEMA 17 para movimiento en paneles solares

Los motores paso a paso NEMA 17 son los encargados del movimiento preciso de los paneles solares en función de la información proporcionada por los sensores de luz. A diferencia de los motores de corriente continua (DC), los motores paso a paso ofrecen un control más exacto, lo que es esencial para ajustar la orientación de los paneles en múltiples ejes y maximizar la captación de luz solar.

3.8.1 Control mediante microcontroladores

El Arduino Uno actúa como la unidad de control principal y, junto con un controlador de motores como el DRV8825, gestiona las señales necesarias para operar los motores. Según el Project Hub de Arduino (n.d.), "los motores paso a paso permiten un control de posición preciso

al dividir cada revolución del motor en pasos individuales." Esto facilita la implementación de movimientos exactos en los ejes vertical (arriba-abajo) y horizontal (izquierda-derecha).

3.8.2 Movimiento en múltiples ejes

La capacidad de los motores paso a paso de moverse en pasos incrementales permite un control independiente y sincronizado para cada eje. Según Ahmad et al. (2020), "los sistemas de seguimiento solar en múltiples ejes aumentan significativamente la eficiencia energética en comparación con los sistemas fijos, ya que pueden maximizar la exposición al sol durante todo el día".

- Eje Vertical: Controlado por dos motores NEMA 17 sincronizados, que permiten mover el panel hacia arriba o abajo.
- Eje horizontal: Controlado por un tercer motor NEMA 17 con un sistema de riel y correa, para deslizar el panel de lado a lado.

3.9 Baterías de plomo-ácido selladas (VRLA) para sistemas de energía solar

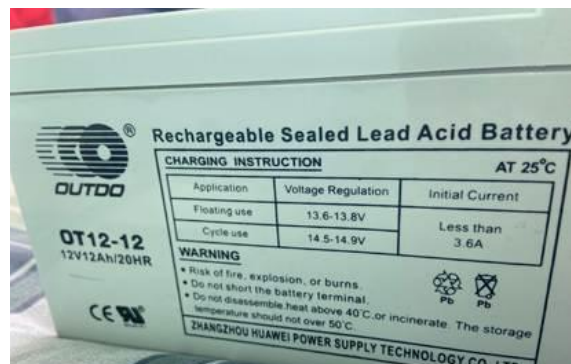


Figura 3.4: Batería de Plomo-Ácido 12v 12Ah

En este Trabajo de Título, se optó por utilizar una batería de 12V y 12Ah, específicamente una batería de plomo-ácido sellada (VRLA), en lugar de baterías de polímero de litio (Li-Po). Según Rashid (2019), "las baterías VRLA ofrecen un equilibrio ideal entre densidad energética, durabilidad y costo, lo que las hace adecuadas para aplicaciones estacionarias".

3.9.1 Ventajas de las Baterías de plomo-ácido selladas

Según Rashid (2019), "las baterías de plomo-ácido son ampliamente utilizadas en sistemas de almacenamiento energético debido a su alta densidad de energía, bajo costo inicial y vida útil razonable cuando se opera dentro de los límites recomendados". En este Trabajo de Título, su capacidad de 12 Ah permite alimentar componentes electrónicos durante periodos prolongados, incluso en ausencia de luz solar directa.

3.9.2 Función en el sistema

La batería de plomo-ácido de 12V y 12Ah desempeña un papel clave en el funcionamiento autónomo del sistema:

- Alimentación del Arduino Uno: Proporciona la energía necesaria para controlar los motores y sensores.
- Suministro a los motores NEMA 17: Al ser componentes de mayor demanda energética, su operación depende de la estabilidad del voltaje proporcionado por la batería.
- Respaldo energético: Permite que el sistema funcione durante períodos de sombra o poca luz solar, garantizando la operatividad incluso en condiciones adversas.
- Autonomía: Según los cálculos realizados, esta batería puede mantener el sistema activo durante aproximadamente 3.39 horas en modo activo y hasta 85.71 horas en modo pasivo.
- Además, estas baterías son menos sensibles a cambios de temperatura en comparación con baterías Li-Po, lo que las hace más confiables para condiciones ambientales variables.

3.9.3 Consideraciones para la selección de la batería

De acuerdo con Kalogirou (2014), "la selección adecuada de la batería debe basarse en el consumo total del sistema y el tiempo de autonomía requerido, considerando tanto los modos activo como pasivo del sistema". En este caso, la batería de 12Ah puede soportar aproximadamente 1.78 horas en modo activo y 85.71 horas en modo pasivo, como se detalla en los cálculos previos.

3.10 Controladores de motores (DRV8825)

El controlador de motores DRV8825 es un componente esencial en sistemas que utilizan motores paso a paso, ya que permite manejar de manera eficiente señales de control para

movimientos precisos. Según Texas Instruments (2021), "el DRV8825 soporta hasta 2.5A por fase con un adecuado disipador y ofrece control de micropasos hasta resoluciones de 1/32 de paso". Esto lo convierte en una opción ideal para proyectos que requieren movimientos suaves y precisos, como el seguimiento solar en múltiples ejes.

En el prototipo, el DRV8825 se utiliza para controlar los motores NEMA 17. Sus características principales incluyen:

- Control de microstepping: Mejora la resolución del motor dividiendo cada paso en fracciones más pequeñas.
- Protección integrada: Protección contra sobrecorriente y sobrecalentamiento, garantizando la durabilidad del sistema.
- Ajuste de corriente: Permite configurar la corriente de salida, evitando sobrecalentamientos y optimizando el consumo energético.

3.11 Protoboard como herramienta de prototipado electrónico

En el desarrollo del sistema de panel solar inteligente móvil, la protoboard juega un papel fundamental como herramienta de prototipado para realizar las conexiones eléctricas entre los componentes. Según Horowitz y Hill (2015), "una protoboard permite ensamblar circuitos electrónicos sin necesidad de soldadura, facilitando cambios y ajustes rápidos durante la etapa de diseño".

3.11.1 Características principales

La protoboard utilizada en este Trabajo de Título cuenta con filas y columnas de conexiones organizadas en un sistema de malla estándar. Estas características permiten:

- Conexión eficiente: Componentes como resistencias, cables, sensores y controladores se integran fácilmente.
- Distribución de energía: Las líneas laterales, identificadas por colores (rojo para positivo y azul para negativo), facilitan la distribución de voltaje y tierra desde la fuente de alimentación.
- Flexibilidad: El sistema modular permite modificar las conexiones según los requerimientos del prototipo sin la necesidad de herramientas adicionales.

3.11.2 Función en el sistema

En este Trabajo de Título, la protoboard se utiliza para:

- Interconectar los sensores de luz: Los sensores están conectados al Arduino Uno a través de la protoboard, lo que facilita la lectura de señales y su procesamiento.
- Integrar los controladores de los motores NEMA 17: Los DRV8825 están montados en la protoboard, desde donde reciben señales de control y energía de la fuente principal.
- Pruebas y ajustes: La protoboard permite probar configuraciones de circuitos antes de realizar una implementación definitiva.

3.11.3 Ventajas en prototipado

De acuerdo con Tocci y Widmer (2020), "la protoboard es una herramienta clave en la ingeniería electrónica por su capacidad de simplificar el desarrollo de circuitos y reducir costos en las etapas iniciales de diseño." Su uso garantiza que los errores en el circuito puedan corregirse sin comprometer la integridad de los componentes.

3.12 Diseño de Rieles y Movimiento Mecánico

Para implementar un sistema de seguimiento solar eficiente, se requiere un diseño mecánico que permita el movimiento en dos ejes: vertical (arriba-abajo) y horizontal (izquierda-derecha). Según Ahmad et al. (2020), "los sistemas de movimiento lineal, como rieles y husillos, son ideales para proporcionar precisión en aplicaciones solares, ya que reducen la fricción y aumentan la estabilidad del sistema."

En este Trabajo de Título, se utilizaron motores NEMA 17 con husillos integrados para el movimiento vertical y un sistema de riel con correa para el movimiento horizontal. Las ventajas de este diseño incluyen:

- Precisión: Los husillos permiten movimientos incrementales exactos.
- Baja Fricción: Los rieles minimizan el desgaste mecánico y el consumo energético.
- Estabilidad: La distribución del peso del panel solar en ambos ejes asegura una operación eficiente incluso en condiciones de viento moderado.

3.13 Shield CNC V3 como Interfaz de Control Electrónico para Motores Paso a Paso

En el contexto del diseño y construcción de sistemas mecatrónicos como el seguimiento solar automatizado, la Shield CNC V3 representa una solución eficiente, estandarizada y modular para el control de motores paso a paso. Esta shield, ampliamente utilizada en proyectos de automatización de escritorio y sistemas de control numérico computarizado (CNC), permite gestionar simultáneamente varios motores a través de una interfaz directa con una placa Arduino, sin necesidad de realizar cableado complejo ni conexiones soldadas.

3.13.1 Características Principales

La Shield CNC V3 es una placa de expansión que se monta directamente sobre un Arduino UNO, y está diseñada específicamente para el control de hasta tres ejes (X, Y, Z) mediante el uso de controladores tipo DRV8825 o A4988. Sus principales características incluyen:

- Compatibilidad con controladores DRV8825 y A4988, facilitando el control de motores paso a paso bipolares.
- Distribución estandarizada de pines, permitiendo el acceso directo a las señales STEP y DIR de cada eje.
- Conectores dedicados para sensores de fin de carrera (endstops) y salidas de alimentación para VMOT y GND, simplificando la distribución de energía a los controladores.
- Configuración de microstepping mediante jumpers internos, lo que permite establecer resoluciones como 1/2, 1/4, 1/8, hasta 1/16 de paso, mejorando la precisión del movimiento.

Según Monk (2017), “las shields de control para Arduino representan una forma eficaz de encapsular funcionalidad compleja en módulos reutilizables, disminuyendo errores de conexión y acelerando el prototipado electrónico” (p. 135).

3.13.2 Función en el Sistema

En el desarrollo del presente prototipo de seguimiento solar inteligente, la Shield CNC V3 cumple funciones críticas:

- Control simultáneo de tres motores paso a paso NEMA 17, asignados a los ejes X, Y y Z, cada uno con su correspondiente controlador DRV8825.

- Facilitación de conexiones organizadas: al montar los controladores sobre la shield, se evita el uso extensivo de protoboards o soldaduras, lo que mejora la robustez del sistema.
- Distribución de energía centralizada, aprovechando los conectores VMOT y GND para alimentar directamente los motores desde la batería principal de 12 V.
- Interconexión directa con sensores de fin de carrera, habilitando las rutinas de homing y límites de seguridad programables.

Estas características convierten a la Shield CNC V3 en un componente ideal para sistemas de movimiento controlado por microcontroladores, ya que proporciona estabilidad eléctrica, orden estructural y compatibilidad con la lógica de programación de Arduino.

3.12.3 Ventajas para Prototipado Electrónico

A diferencia de las conexiones en protoboard, la Shield CNC V3 está diseñada para uso repetitivo, de larga duración y en condiciones semi-industriales. Esto permite una transición fluida entre el prototipado y el pre-ensamblaje final. Tal como señalan Axelson y Ganssle (2019), “la modularidad y durabilidad de las shields especializadas convierten al ecosistema Arduino en una plataforma viable incluso en contextos semi-profesionales” (p. 212).

En particular, el uso de esta shield en este Trabajo de Título permitió reducir errores de conexión, mejorar el orden del circuito, facilitar pruebas de código y garantizar una mejor gestión térmica para los controladores, aspectos críticos cuando se trabaja con cargas móviles como los motores paso a paso.

CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA

El desarrollo de este Trabajo de Título se basa en la metodología Ciclo en Espiral, que es particularmente adecuada para proyectos de investigación y desarrollo donde la iteración y la evaluación continua son esenciales. Este enfoque ha sido y seguirá siendo clave para asegurar un progreso estructurado y flexible, permitiendo ajustes continuos según los resultados obtenidos en cada fase del Trabajo de Título.

4.1 Aplicación de la Metodología en el Trabajo de Título

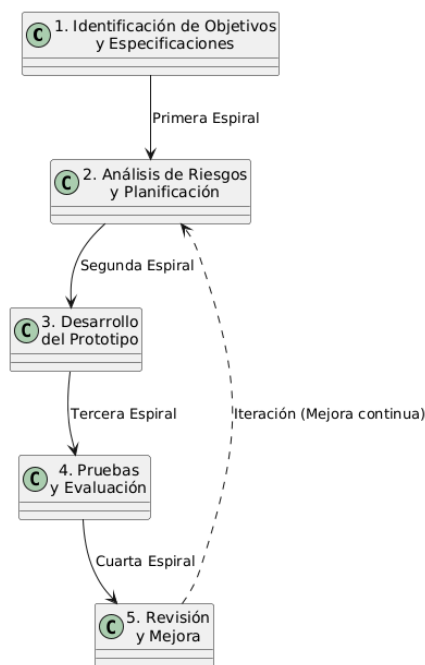


Figura 4.1 Metodología Espiral del Prototipo

A lo largo del desarrollo del Trabajo de Título, la metodología del Ciclo en Espiral se aplicará de la siguiente manera:

1. Identificación de Objetivos y Especificaciones (Primera Espiral):
 - En las etapas iniciales del Trabajo de Título, se aplicó la primera espiral del ciclo para establecer los objetivos generales y específicos del Trabajo de Título. Esta fase incluyó una revisión exhaustiva de la literatura relacionada con los sistemas solares y tecnologías de seguimiento solar, lo que permitió definir claramente las

metas del Trabajo de Título, como la mejora de la eficiencia de los paneles solares para usuarios con recursos limitados.

- Durante esta espiral, también se establecieron los requisitos técnicos preliminares que guiarán las fases de desarrollo, asegurando que el prototipo responda a las necesidades identificadas y cumpla con los criterios de accesibilidad y eficiencia.

2. Análisis de Riesgos y Planificación (Segunda Espiral):

- En la siguiente fase, se llevó a cabo un análisis detallado de los posibles riesgos que podrían surgir durante el desarrollo del prototipo, tales como limitaciones en la capacidad de los sensores de luz, desafíos en la programación del controlador, o restricciones presupuestarias. Este análisis se utilizó para desarrollar un plan de mitigación de riesgos que ayudará a evitar contratiempos importantes durante el desarrollo.
- A continuación, se elaboró un cronograma flexible que guiará el Trabajo de Título en las siguientes fases, permitiendo ajustes según sea necesario para adaptarse a los avances logrados y a los desafíos que se presenten.

3. Desarrollo del Prototipo (Tercera Espiral):

- La tercera espiral se centra en el desarrollo del prototipo inicial, con un enfoque en el diseño del circuito, la selección de componentes y la programación del controlador. Esta fase es la más extensa, permitiendo experimentar con diferentes configuraciones y hacer ajustes según los resultados de las pruebas preliminares.
- Esta fase incluye la integración de los sensores de luz, el desarrollo del carril motorizado y la programación necesaria para que el sistema ajuste automáticamente la orientación de los paneles solares.

4. Pruebas y Evaluación (Cuarta Espiral):

- Una vez construido el prototipo, se procederá a la cuarta espiral, donde se realizarán pruebas exhaustivas del sistema para evaluar su rendimiento en diferentes condiciones. Las pruebas incluirán la medición de la eficiencia energética, la capacidad de ajuste dinámico y la fiabilidad del sistema en diversos escenarios climáticos.

- Los resultados de estas pruebas se analizarán para determinar el cumplimiento de los objetivos iniciales y para identificar áreas de mejora en el diseño y la programación del sistema.
5. Revisión y Mejora (Quinta Espiral y subsiguientes):
- En la última espiral, y en cualquier iteración adicional que sea necesaria, se revisarán los resultados obtenidos durante las pruebas y se implementarán mejoras en el prototipo. Esto podría incluir ajustes en los componentes, optimización del software o mejoras en la estructura física del prototipo.
 - Este ciclo de revisión y mejora se repetirá hasta que el prototipo alcance el nivel de rendimiento y eficiencia deseado, asegurando que se cumplan todos los objetivos del Trabajo de Título.

CAPÍTULO V: DESARROLLO

Para llevar a cabo la construcción del prototipo del sistema inteligente de paneles fotovoltaicos móviles, fue necesario integrar diversos componentes electrónicos que permitirán automatizar el movimiento de los paneles según las condiciones ambientales. Entre estos componentes, los sensores de luz juegan un papel fundamental, ya que son los encargados de medir la intensidad de la radiación solar y enviar esta información al microcontrolador para que ajuste la orientación de los paneles en tiempo real. La correcta conexión de estos sensores y su comunicación con el Arduino UNO es crucial para garantizar el funcionamiento eficiente del sistema.

Dada la naturaleza de este Trabajo de Título, se optó por utilizar un módulo con fototransistor, el cual ofrece una salida digital que facilita la detección de luz. Este módulo cuenta con tres pines de conexión: VCC, GND y DO (Digital Output), que fueron conectados al Arduino siguiendo un proceso meticuloso de soldadura y verificación para asegurar la integridad de las conexiones y la precisión de las lecturas. A continuación, se describe el proceso de montaje y soldadura del sensor de luz.

5.1 Montaje y Soldadura del Módulo Sensor Fotosensible Lm393:



Figura 5.1: Sensor Fotosensible Lm393

El primer paso consistió en realizar la soldadura del sensor de luz al Arduino UNO. El sensor utilizado fue un módulo con fototransistor que incluye tres pines de conexión: VCC

(alimentación), GND (tierra) y DO (salida digital). Para garantizar una conexión segura y estable, se procedió a soldar cables a cada uno de estos pines de la siguiente manera:

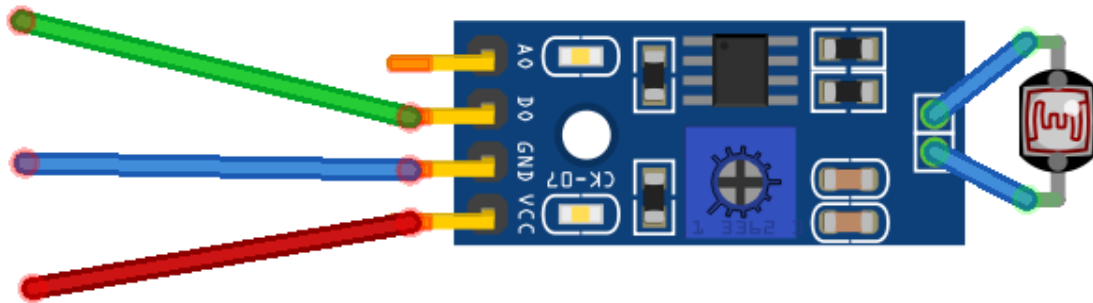


Figura 5.2: Diagrama de Soldadura de Cables Sensor de luz

Luego de la soldadura, se verificó la firmeza de las uniones y se aseguró que no existieran cortocircuitos entre los cables adyacentes. Para proteger las uniones, se utilizó cinta aislante en cada punto de soldadura.

5.2 Conexión del Sensor de Luz al Arduino UNO:

Tras la soldadura de los cables al sensor, se procedió a conectar cada uno de estos cables al Arduino UNO:

5.2.1 Conexión de VCC:

El cable rojo, que corresponde al pin VCC, se conectó al pin de 5V del Arduino, proporcionando la alimentación necesaria para el funcionamiento del sensor.

5.2.2 Conexión de GND:

El cable naranja, conectado al pin GND del sensor, se conectó a un pin de GND del Arduino, estableciendo la referencia de tierra para el circuito.

5.2.3 Conexión de DO (Digital Output):

El cable amarillo, conectado al pin DO del sensor, se conectó al pin Digital 2 (D2) del Arduino. Este pin se utilizará para leer el estado del sensor.

5.2.4 Prueba de Funcionamiento con Código en Arduino:

Con las conexiones verificadas, se procedió a cargar un código de prueba en el Arduino UNO para validar la operación del sensor. El código se diseñó para leer el estado del pin DO del sensor y enviar el valor a través del monitor serial.

5.2.5 Resultados de la Prueba:

Luego de cargar el código, se verificó la operación del sensor mediante el monitor serial de Arduino IDE. Al exponer el sensor a una fuente de luz, el monitor serial mostró el mensaje “Luz detectada”, confirmando que el sensor estaba funcionando correctamente. Por otro lado, al cubrir el sensor o colocarlo en la oscuridad, el monitor serial mostró el mensaje “No hay luz detectada”.

Además, se realizaron ajustes en el potenciómetro del módulo (ubicado en el tornillo azul) para calibrar el umbral de detección del sensor. Con esto, se pudo ajustar la sensibilidad del sensor a diferentes niveles de iluminación, asegurando un rendimiento óptimo en diferentes condiciones de luz.

5.3 Montaje y Conexión de los Motores Paso a Paso con su Controlador

Para lograr el movimiento preciso de los paneles solares, se utilizarán motores paso a paso que permitirán el desplazamiento en dos ejes (horizontal y vertical). Estos motores se controlarán a través de un controlador de motores, que estará conectado al Arduino UNO y a una protoboard para realizar las conexiones necesarias.

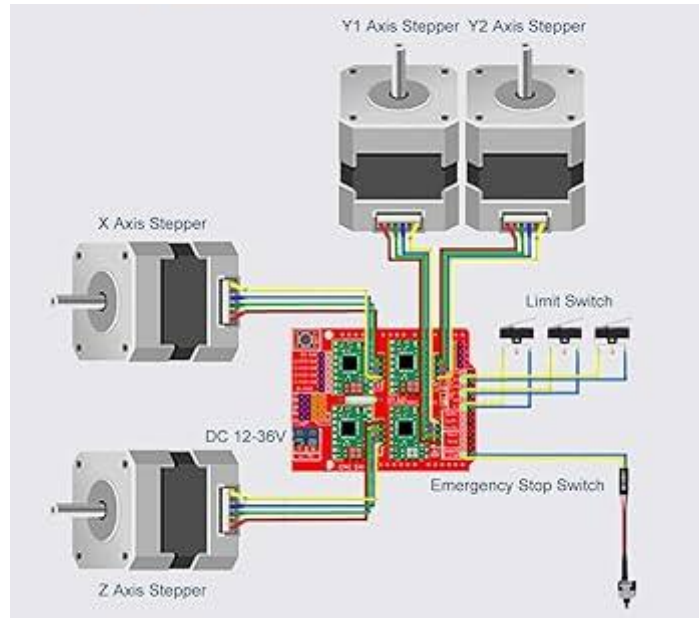


Figura 5.3: Montaje y conexión motores paso a paso

5.3.1 Componentes utilizados:

- Motor Paso a Paso (NEMA 17 Con husillo): Motor de alta precisión ideal para aplicaciones que requieren movimientos controlados, como el seguimiento solar.
- Controlador de Motores (DRV8825): Permite el control preciso de los motores paso a paso.
- Shield CNC V3: Placa de expansión diseñada para facilitar el control de motores paso a paso desde un Arduino. Permite conectar fácilmente controladores como el DRV8825, y ofrece una distribución ordenada de pines para proyectos de automatización y control de movimiento.
- Protoboard: Utilizada para realizar las conexiones entre el controlador, los motores y el Arduino.
- Fuente de Alimentación (Batería): Proporcionará la energía necesaria para los motores y el controlador.

5.4 Conexión de los Motores a la Shield CNC V3:

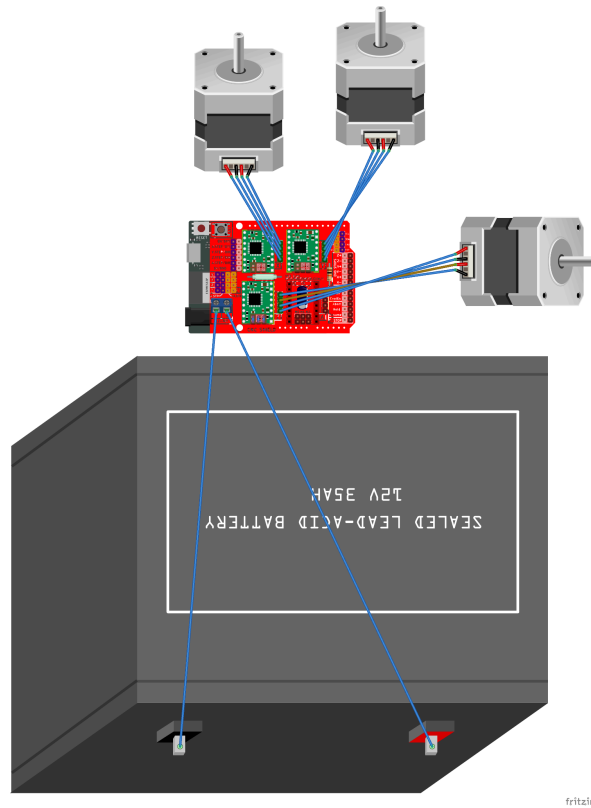


Figura 5.4 Conexión de Motores paso a paso y batería 12V

5.4.1 Shield CNC V3:

- Se conectó la Shield CNC V3 directamente sobre el Arduino UNO R4, funcionando como interfaz entre el microcontrolador y los motores.
- Antes de instalar los drivers, se colocaron jumpers en las posiciones correspondientes de los ejes X, Y, Z para configurar los micro pasos a una resolución de 1/8 de paso, lo cual permite movimientos más suaves y precisos.

5.4.2 Controladores de Motor (DRV8825):

- Se insertaron tres módulos DRV8825 en los zócalos correspondientes a los ejes X, Y y Z de la Shield CNC V3.
- Cada DRV8825 se utilizó para controlar un motor paso a paso independiente, permitiendo el control simultáneo de los tres ejes del sistema.

5.4.3 Motores Paso a Paso:

- Los cables de cada motor NEMA 17 se conectaron directamente a los terminales de salida de cada módulo DRV8825 en la Shield (correspondientes a A +, A-, B+, B-).
- La conexión se realizó cuidando el orden de las fases del motor para asegurar un funcionamiento correcto.

5.4.4 Fuente de Alimentación:

- La Shield CNC V3 fue alimentada mediante una batería externa de 12V y 12Ah, conectada a los terminales de alimentación (VMOT y GND).
- Esta fuente entrega la corriente necesaria para accionar los motores, ya que el consumo excede lo que el Arduino puede entregar por sí mismo.

5.4.5 Conexión del Arduino y prueba inicial:

- El Arduino UNO R4 fue conectado al computador mediante un cable USB para carga de código y monitoreo.
- Se cargó un programa de prueba que permitió verificar el movimiento de los motores en cada eje, asegurando que tanto la dirección como los micropasos funcionaran correctamente.

5.5 Plataforma y Estructura de Montaje para el Panel Solar



Figura 5.5: Estructura de Montaje

El diseño del prototipo de paneles solares móviles se realizó a escala, buscando una estructura funcional, resistente y adaptable al sistema de seguimiento solar. Para ello se utilizó una combinación de materiales tradicionales y tecnología de fabricación aditiva.

5.5.1 Base estructural:

Se empleó una tabla de madera prensada de 70 x 70 x 2 cm como base principal del prototipo. Esta superficie sirvió como soporte rígido para fijar, mediante tornillos, todos los componentes mecánicos y electrónicos del sistema.

5.5.2 Diseño y fabricación 3D:

Las piezas estructurales fueron diseñadas utilizando el software Shapr3D, un programa de modelado CAD paramétrico, y posteriormente impresas en una impresora 3D Creality CR-6 SE. Se diseñaron dos plataformas para los motores de los ejes X e Y, con dimensiones de 14 cm de ancho, 19 cm de largo y 0,6 cm de espesor, fabricadas en PLA. Cada una de estas plataformas incluía una extensión lateral de 7,5 cm que permitía insertarse entre el motor y las varillas de soporte.

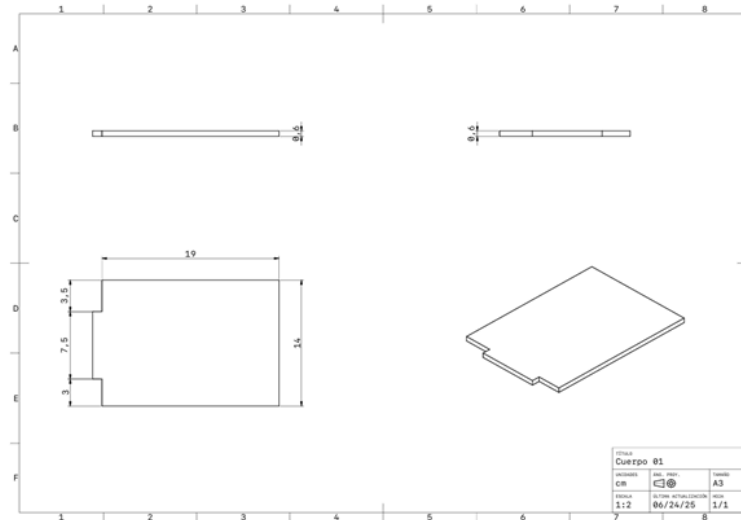


Figura 5.6: Boceto de Base prototipo Motor X e Y

5.5.3 Sistema de movimiento lineal (X e Y):

Para permitir el desplazamiento de las plataformas en los ejes X e Y, se emplearon bloques de rodamiento lineal SC8UU de 8 mm, en conjunto con varillas de aluminio del mismo diámetro. Cada Varilla integraba un SC8UU, y en el centro se instaló una base para tuerca trapezoidal T8, la cual permitía el movimiento mediante el husillo acoplado al motor NEMA 17. Tanto los SC8UU como la base T8 fueron atornillados directamente sobre las plataformas impresas.



Figura 5.7: Bloque Rodamiento Lineal SC8MM

Los motores NEMA 17 se fijaron a la base de madera utilizando soportes en “L”, asegurados con tornillos. Entre el soporte y el motor se colocó una capa de corcho, con el

propósito de reducir la transmisión de vibraciones. Este procedimiento se replicó para los tres ejes: X, Y y Z.



Figura 5.8: Soporte en L Para Motor Nema 17

Las varillas de aluminio fueron alineadas cuidadosamente para garantizar una trayectoria recta y estable. Se utilizaron soportes SK8 (dos por varilla) para sujetarlas firmemente a la base de madera. En total se instalaron 6 varillas y 12 SK8 en todo el sistema. Para evitar el desplazamiento del husillo en su extremo libre, se utilizó un rodamiento KP08 de 8 mm, que permite la rotación sin desalinización.

5.5.4 Eje Z y montaje del panel solar:

El eje Z fue montado sobre las plataformas móviles de los ejes X e Y, siguiendo la misma técnica descrita anteriormente. Sin embargo, para este eje se diseñó una plataforma más amplia, de 20 x 20 cm, fabricada esta vez en acrílico, con el fin de proporcionar mayor durabilidad y rigidez estructural, además de en vez de usar un Rodamiento Lineal SC8MM en este caso se usaron 2 por varilla para darle más estabilidad al acrílico para el panel.

Sobre esta plataforma acrílica se fijaron dos perfiles de aluminio de 45 cm cada uno, correspondientes a las dimensiones del panel solar de 20W, el cual fue montado entre dichos perfiles para asegurar una sujeción firme durante los movimientos.

5.6 Construcción paso a paso del prototipo

El desarrollo del prototipo de panel solar inteligente móvil se llevó a cabo de manera progresiva, iniciando con una fase de investigación aplicada enfocada en comprender el

funcionamiento individual de cada uno de los componentes electrónicos y mecánicos seleccionados. Esta etapa fue esencial para asegurar una correcta integración posterior y para prevenir errores de conexión o configuración que pudieran comprometer el rendimiento del sistema.

5.6.1 Primer paso preparación de la base y medición inicial

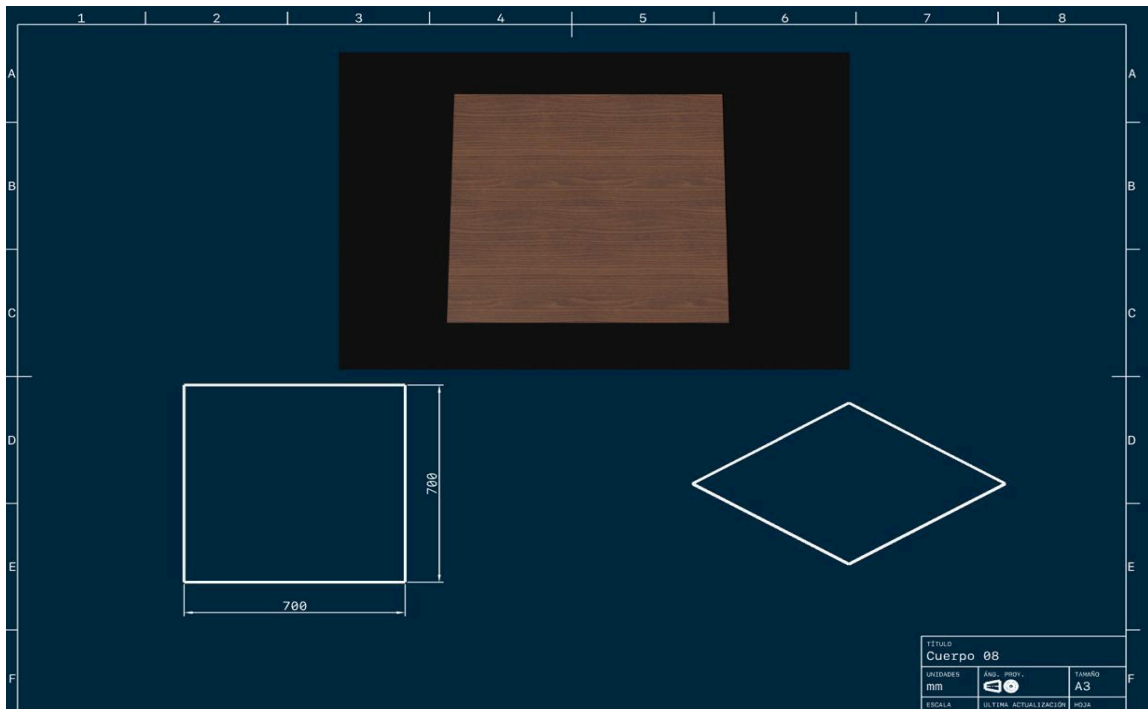


Figura 5.9 Base de madera 70x70x2cm

Antes de iniciar el ensamblaje físico del sistema, se realizó una preparación preliminar de la superficie de montaje. La base utilizada fue una tabla prensada de 70x70cmx2cm. Con el objetivo de centrar adecuadamente todos los componentes mecánicos y electrónicos del prototipo, se procedió a medir y marcar el centro de la tabla.

Para ello, se utilizaron herramientas manuales básicas como una cinta métrica (wincha) y un lápiz de carpintero, que permitieron definir una guía central de referencia. Esta marcación fue clave para asegurar una distribución simétrica de los ejes y para evitar desalineaciones durante el montaje posterior de los motores, varillas y plataformas móviles.

5.6.2 Segundo Paso instalación del motor del eje X Izquierdo y alineación inicial del husillo

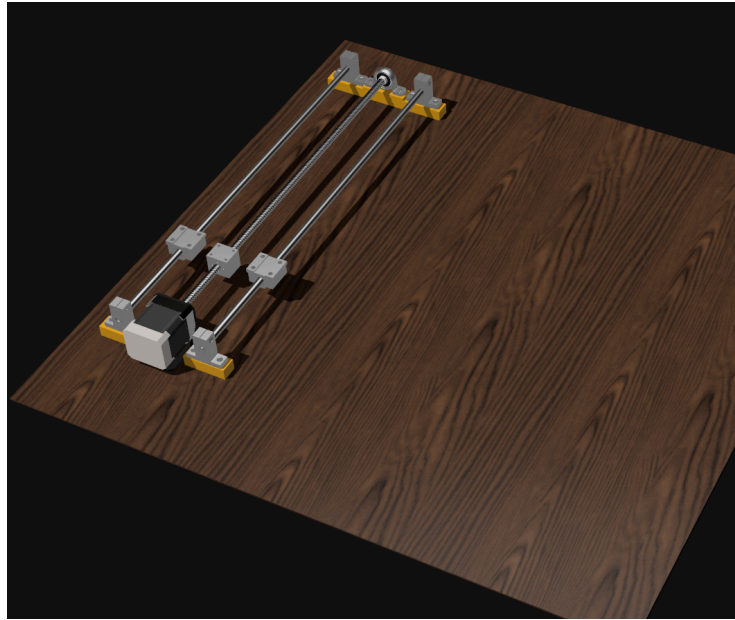


figura 5.10 Motor eje X Izquierdo + Guías lineales

El primer componente instalado sobre la base fue el motor del eje X Izquierdo, el cual se fijó directamente a la tabla de madera utilizando un soporte metálico en forma de "L". Entre el soporte y el cuerpo del motor se incorporó una pieza de corcho, cortada a medida, con el fin de minimizar la transmisión de vibraciones hacia la estructura, lo que mejora la estabilidad operativa del sistema.

Una vez asegurado el motor, se procedió a instalar el extremo opuesto del husillo. Para ello, se utilizó un rodamiento tipo KP08 de 8 mm, cuya función es mantener el husillo alineado y permitir su libre rotación. Bajo este rodamiento se colocó una estructura de soporte impresa en 3D, diseñada previamente en el software Shapr3D, cuya altura fue calculada específicamente para mantener la horizontalidad del husillo respecto al motor. Sin esta base de nivelación, el husillo tendería a inclinarse hacia abajo, lo que afectaría la precisión del movimiento lineal.

Posteriormente, se definió la posición de las dos varillas laterales de aluminio (una en el lado izquierdo y otra en el derecho del husillo). Se midió cuidadosamente la distancia entre el husillo central y cada varilla, garantizando su simetría respecto al eje longitudinal de la tabla. Al igual que en el caso del rodamiento, se utilizaron estructuras impresas en PLA para elevar las

varillas a la misma altura del husillo. Estas piezas también fueron diseñadas en Shapr3D e impresas en la máquina 3D para garantizar un ajuste preciso.

Finalmente, ambas varillas se fijaron a la base mediante tornillos, completando así el montaje inicial del sistema lineal del eje X Izquierdo.

5.6.3 Tercer Paso ensamblaje secuencial de los ejes X Derecho, eje Y

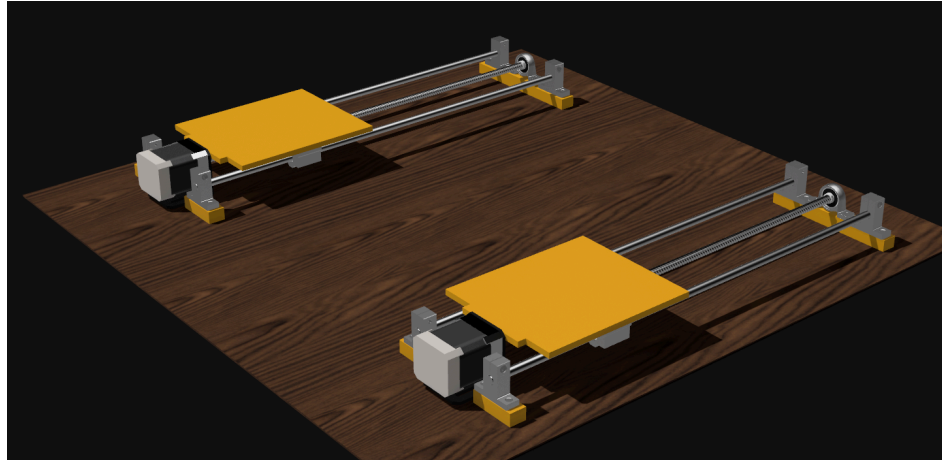


Figura 5.11 Motor eje X derecho e Izquierdo + Guías lineales y Placas

Una vez completado el montaje del eje X Izquierdo, se continuó con la instalación progresiva de los demás ejes del sistema de posicionamiento. El orden de ensamblaje fue cuidadosamente planificado para garantizar una alineación precisa y una distribución equilibrada del peso sobre la base. Para establecer correctamente la altura del motor del eje X Derecho, se utilizó como referencia la longitud total del husillo del eje Y, de 50 cm, a fin de prever la posición final del conjunto móvil superior. Con esta medición, se procedió a montar el motor del eje X Derecho aplicando el mismo procedimiento utilizado previamente en el eje X Izquierdo: fijación con soporte en “L”, aislación con corcho, instalación del husillo T8 y soporte de alineación impreso en 3D.

Con ambos ejes (X Derecho e Izquierdo) asegurados en la tabla, se colocaron los elementos de guiado lineal. En cada varilla de aluminio se instaló un bloque de rodamiento SC8UU de 8 mm, mientras que sobre los husillos se montaron las correspondientes tuercas T8, fijadas mediante bases impresas en PLA especialmente diseñadas para este fin. Se cuidó que la

altura de todos estos elementos fuera uniforme, con el fin de definir con precisión la ubicación final de las plataformas móviles.

Una vez identificada la posición óptima de las plataformas impresas en PLA, se perforan los orificios correspondientes en la base de madera para fijarlas con tornillos, asegurando que quedarán centradas y estables, capaces de soportar peso sin deformarse o romperse. Este mismo procedimiento fue replicado simétricamente para el eje X Derecho. Posteriormente, se conectaron los motores X Derecho e Izquierdo a la Shield CNC V3 ya montada sobre el Arduino UNO R4, y se cargó un código de prueba. Esta prueba permite verificar el movimiento sincronizado de las plataformas en ambos ejes, asegurando que no existieran desfasajes, bloqueos o pérdidas de pasos.

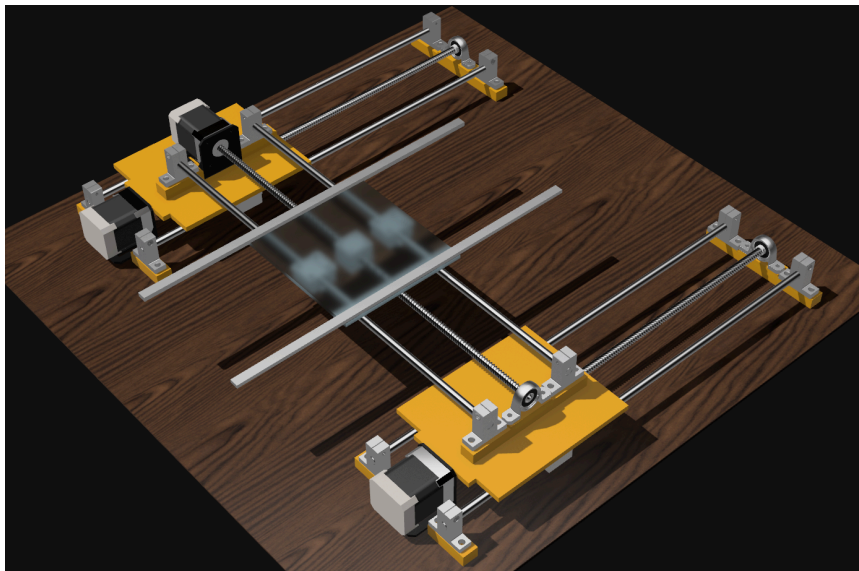


Figura 5.12 Motor eje Y + Acrílico + Aluminio de fijación

Validada la correcta operación de los ejes inferiores, se avanzó con la instalación del motor del eje Y, el cual fue montado centrado sobre la plataforma móvil inferior Motor X Izquierdo para que el peso del eje superior recayera sobre los rodamientos lineales y no directamente sobre la estructura impresa. En el extremo opuesto del husillo se instaló nuevamente un rodamiento KP08 de 8 mm sobre una base impresa en 3D, siguiendo el mismo estándar de montaje de los otros ejes. A diferencia de los ejes X Derecho e Izquierdo, las varillas del eje Y se instalaron con una separación ligeramente mayor, específicamente 4 cm más alejadas por lado, con el propósito de compensar mejor el peso del panel solar (aproximadamente 2 kg) y

proporcionar mayor estabilidad estructural al conjunto superior. En este eje se incorporaron dos bloques SC8UU por varilla, para fijar de manera segura la plataforma de acrílico de 20 x 20 cm, sobre la cual se instalaría posteriormente el panel solar. Sobre el husillo central, se montó únicamente la base para la tuerca T8, manteniendo el sistema de tracción. Finalmente, se atornilla la plataforma acrílica a los bloques de rodamiento, y se realiza una nueva prueba de funcionamiento, esta vez con los tres motores trabajando simultáneamente. Confirmado el correcto desplazamiento en los tres ejes, se fijaron dos perfiles de aluminio de 45 cm sobre la plataforma de acrílico, los cuales fueron utilizados para atornillar y asegurar el panel solar monocristalino de 20 W, completando así la estructura física del prototipo.

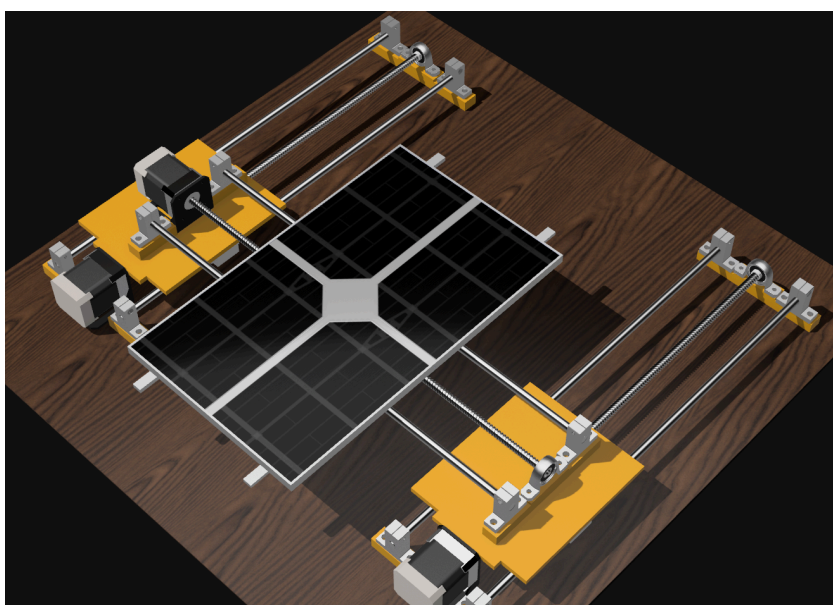


Figura 5.13 Prototipo Final Con Panel Solar 20W

5.6.4 Cuarto paso integración del sistema electrónico

Durante el montaje mecánico del prototipo, se realizaron pruebas intermedias para validar el movimiento de cada motor individual y su sincronización en los ejes X Derecho, X Izquierdo y eje Y. No obstante, la integración completa del sistema electrónico se llevó a cabo una vez finalizada la instalación estructural y mecánica. En esta etapa, se conectaron los cables de los tres motores NEMA 17 a los controladores DRV8825, previamente instalados en la Shield CNC V3. Esta shield se encontraba ya montada sobre el Arduino UNO R4, y su conexión a la fuente de alimentación se realizó mediante una batería externa de 12V y 12Ah, la cual provee la corriente

necesaria para los motores y controladores. La alimentación y conexiones fueron cuidadosamente organizadas para evitar interferencias electromagnéticas y asegurar la correcta entrega de energía, sin sobrecargar al microcontrolador ni generar fluctuaciones de voltaje.

A continuación se muestra un ejemplo de como van conectados los Motores a la Shield CNC V3, cabe mencionar que el Motor X Derecho está conectado en el espacio del eje Y, El motor Y está montado en el eje Z, por temas de escritura en la Shield CNC V3.

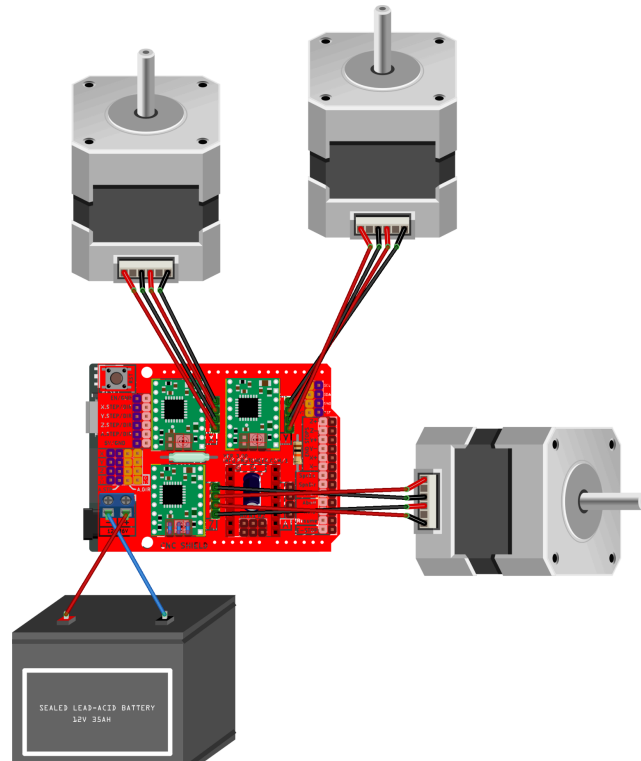


Figura 5.13 Ejemplo de Conexión de motores

5.6.5 Quinto paso instalación y conexión de los sensores de luz y endstops

Con los motores correctamente conectados y validados, se procedió a instalar los sensores de luz, los cuales constituyen el componente central del sistema de seguimiento solar inteligente. En total, se utilizaron cuatro sensores fotosensibles, dispuestos alrededor del marco del panel solar: uno en cada lado (superior, inferior, izquierdo y derecho), preferentemente centrados en cada borde.

Para su instalación, fue necesario perforar el marco de aluminio del panel, cuidando no interferir con los orificios de fijación de los perfiles. En cada punto de montaje se colocó cinta

aislante como medida de seguridad eléctrica. Luego, los sensores se fijaron sobre el marco y se conectaron a la Shield CNC V3. Dado que la Shield CNC V3 ocupa la mayoría de los pines digitales del Arduino, se optó por utilizar pines analógicos configurables como digitales, ubicados en la sección inferior de la shield, cerca del área rotulada como "Endstop". Para identificar correctamente cada pin y su función, se recurrió al manual técnico de la Shield CNC V3. La alimentación de los sensores se realizó mediante una línea de 5 V extraída directamente desde la shield, la cual fue derivada hacia una protoboard de expansión, utilizada exclusivamente para distribuir 5V y GND a cada sensor, sin ocupar pines de señal adicionales.

Una vez realizadas las conexiones, se cargó nuevamente un código de prueba diseñado durante la fase inicial del desarrollo. Este programa permitió verificar que cada sensor respondía correctamente a la presencia o ausencia de luz, enviando las señales esperadas al monitor serial.

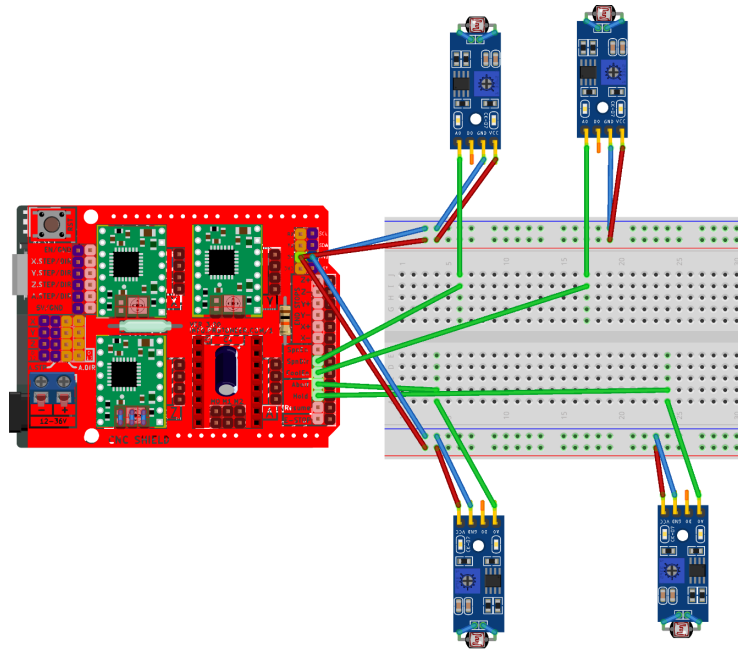


Figura 5.14 Ejemplo de Conexión de sensores de luz a la protoboard y la shield cnc v3

Posteriormente, se instalaron los sensores de fin de carrera (endstops), utilizados para delimitar el recorrido máximo de cada motor. En total, se conectaron cuatro endstops: dos para el eje Z (superior e inferior), y uno para cada uno de los ejes X e Y, dada la similitud de su lógica de movimiento. Esta configuración permite detener simultáneamente ambos motores cuando cualquiera de los dos sensores se activa, garantizando una detención segura. Cabe señalar que,

aunque la Shield CNC V3 dispone de pines etiquetados como Z+, Z-, X+, X-, Y+, Y-, internamente estos pines están interconectados, lo que impide distinguir la dirección de activación del sensor (si es superior o inferior). Esta limitación imposibilita la implementación de una lógica de "homing" confiable, necesaria para establecer una posición inicial del sistema al encenderlo o finalizar su operación.

Para resolver este problema, se habilitaron pines digitales adicionales del Arduino, conectados directamente a los endstops, de modo que el programa pueda diferenciar claramente entre sensores superiores e inferiores. La asignación específica de pines, el esquema eléctrico y el código fuente correspondiente se incluirán como anexos en este informe. Con todos los sensores y motores instalados, alimentados y verificados, el sistema quedó listo para implementar la lógica de seguimiento solar, que permitirá al panel orientarse dinámicamente en función de la radiación incidente.

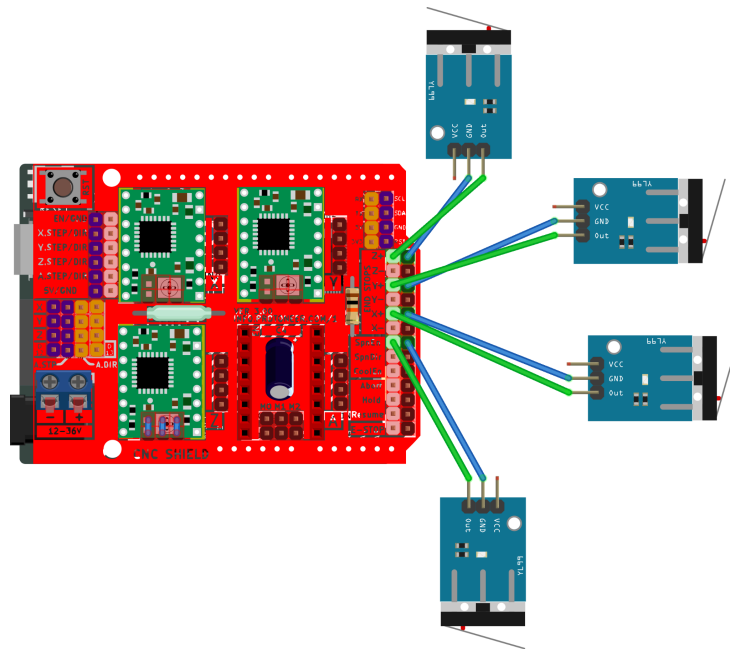


Figura 5.15 Ejemplo de Conexión Sensores Endstop (Fin de Carrera o Recorrido)

5.6.6 Sexto paso desarrollo de la lógica de control del sistema de seguimiento solar

La lógica de control del sistema fue diseñada con el objetivo de maximizar la captación de radiación solar mediante un funcionamiento autónomo, eficiente y seguro. El algoritmo fue

desarrollado en lenguaje C++, utilizando la plataforma de programación del Arduino UNO R4, y considera tanto las limitaciones del hardware disponible como la necesidad de evitar movimientos innecesarios que puedan afectar la estabilidad o el consumo energético del sistema. El núcleo del sistema está compuesto por cuatro sensores fotosensibles tipo LDR, dispuestos en los cuatro costados del panel solar (izquierda, derecha, arriba y abajo), tres motores paso a paso NEMA 17 con husillo T8 y sensores de fin de carrera (endstops) conectados en configuración normalmente cerrada (NC). Los motores están configurados con microstepping a 1/8 de paso, lo que permite alcanzar una resolución de 1600 pasos por revolución, garantizando movimientos suaves y precisos. Una de las primeras rutinas implementadas fue la función de homing automático, ejecutada tanto al encender el sistema como en condiciones de baja iluminación prolongada (interpretadas como anochecer). Esta rutina garantiza que los ejes X, Y y Z se ubiquen en una posición de referencia mecánica, evitando colisiones, pérdidas de posición o desincronizaciones durante la operación.

En cuanto al proceso de detección y decisión, el sistema interpreta las lecturas de los sensores LDR como entradas digitales, donde una señal LOW indica luz y una señal HIGH indica sombra. A partir de estas entradas, se implementó una lógica de evaluación que determina la dirección de movimiento del panel solar, priorizando aquellas zonas con mayor incidencia de luz. Para evitar reacciones a cambios momentáneos en la iluminación, se estableció una ventana de confirmación de sombra de 10 segundos. Solo si pasado ese tiempo persiste la condición de sombra, el sistema procederá a mover el eje correspondiente. En caso de múltiples sensores activados, se realiza un análisis comparativo para mover el panel en dirección hacia los sensores que detectan luz. Por ejemplo, si los sensores izquierdo y superior se encuentran en sombra, pero los sensores derecho e inferior detectan luz, el sistema desplazará el panel hacia la derecha y abajo, buscando una zona con mayor luminosidad. El sistema continuará moviéndose en busca de luz mientras no se active el fin de carrera del eje correspondiente, lo que extiende su capacidad de adaptación a condiciones variables del entorno.

En el caso de una ausencia total de luz durante 10 minutos, el sistema interpreta esta situación como anochecer y ejecuta automáticamente la rutina de retorno a la posición de origen, preparando el sistema para el siguiente ciclo de operación. La velocidad de los motores fue cuidadosamente ajustada mediante un retardo de 900 microsegundos entre pasos, lo que permite

evitar vibraciones y reducir el desgaste mecánico. Este valor fue seleccionado como compromiso entre precisión de movimiento y bajo nivel sonoro durante la operación.

En síntesis, el algoritmo de control desarrollado se sustenta sobre tres principios fundamentales:

- Confiabilidad en la detección de luz mediante sensores dispuestos estratégicamente.
- Seguridad mecánica garantizada por los sensores de fin de carrera y la rutina de homing.
- Eficiencia energética mediante desplazamientos mínimos, controlados y suaves.

Esta lógica establece una base robusta y escalable, preparada para futuras mejoras como el aprendizaje de patrones solares diarios, sin requerir modificaciones al hardware existente. El código fuente completo que implementa esta lógica de control se presenta en el **Anexo 1** al final de este documento, permitiendo su revisión detallada y reproducción por parte de terceros interesados en replicar o mejorar el prototipo. En el **Anexo 2** se encuentra un link para descargar el Modelo 3D del prototipo con las piezas necesarias que se utilizaron.

CAPÍTULO VI: DISCUSIÓN Y RESULTADOS

Durante el desarrollo del prototipo de panel solar inteligente móvil, se lograron avances significativos en la implementación de un sistema funcional capaz de seguir la trayectoria del sol en dos ejes.

6.1 Problemas técnicos y ajustes durante la construcción

Durante el proceso de montaje del sistema mecánico, surgieron diversas dificultades que fueron superadas mediante ajustes estructurales y decisiones de rediseño. Uno de los primeros desafíos se presentó al intentar alinear correctamente los motores y husillos en los ejes X Izquierdo y Derecho. Inicialmente, los motores fueron instalados sin considerar la necesidad de estructuras elevadoras para mantener la horizontalidad de las varillas respecto al husillo. Esta omisión provocó una desalineación significativa, ya que las varillas quedaban a una altura inferior, generando inclinaciones indeseadas en el sistema de movimiento. Para resolver este problema, se diseñaron e imprimieron en PLA unas estructuras de soporte personalizadas, que nivelaron correctamente tanto las varillas como el extremo libre del husillo, donde se instaló el rodamiento KP08.

En cuanto a las piezas impresas en 3D, también se identificaron errores de diseño durante las primeras pruebas. Las plataformas iniciales para los ejes X izquierdo y derecho fueron impresas sin considerar el uso de rodamientos SC8UU, lo que ocasiona desajustes dimensionales y problemas de deslizamiento, ya que las piezas impresas no ofrecían el mismo nivel de precisión ni suavidad que los bloques metálicos. Frente a esto, se optó por rediseñar las plataformas para integrar correctamente los SC8UU de 8 mm, los cuales fueron adquiridos y acoplados al sistema, mejorando notablemente el rendimiento mecánico. Otro inconveniente fue el relacionado con vibraciones y ruidos excesivos durante las primeras pruebas de movimiento de los motores NEMA 17. Estas vibraciones afectan tanto la estabilidad como la precisión del sistema. Para mitigarlas, se implementaron dos soluciones: la colocación de láminas de corcho entre los motores y sus soportes metálicos en “L”, lo cual absorbió parte del ruido estructural, y la configuración de los controladores DRV8825 en modo de microstepping a 1/8 de paso, lo cual suavizó el movimiento y redujo la exigencia sobre los motores, evitando sobrecalentamientos.

Finalmente, se presentaron dificultades al momento de fijar las varillas de aluminio de manera completamente recta y alineada con el husillo. El principal reto fue asegurar que la distancia entre el husillo central y cada varilla lateral fuera exactamente la misma, tanto en el eje X izquierdo y derecho, lo cual era crucial para un desplazamiento uniforme. Para lograrlo, se utilizaron herramientas de medición de precisión como una regla metálica y un pie de metro, lo que permitió una instalación simétrica y confiable de todos los elementos lineales.

6.2 Problemas electrónicos e integración de sensores

Durante la fase de integración del sistema electrónico, también se presentaron diversas dificultades que exigieron ajustes en el diseño y en la estrategia de conexión.

Inicialmente, el sistema fue montado utilizando únicamente una protoboard con la incorporación de capacitores de desacoplo. Sin embargo, esta configuración provocó un sobrecalentamiento tanto en los cables como en los motores, lo que comprometía la seguridad y la estabilidad del prototipo. Esta situación motivó la adquisición e incorporación de una Shield CNC V3, la cual ofrecía una interfaz más organizada y eficiente para el control de los motores paso a paso.

No obstante, el uso de esta shield implicó una nueva etapa de aprendizaje, ya que no se utilizó como plataforma CNC completa, sino como expansión para el desarrollo en Arduino IDE. Fue necesario investigar a fondo el mapeo de pines, identificar cuáles estaban internamente ocupados por los controladores DRV8825 y cuáles quedaban libres para integrar sensores adicionales. Este análisis fue fundamental para poder conectar de forma correcta los sensores de luz LDR sin interferir con las funciones críticas del sistema. En cuanto a los sensores fotosensibles, su comportamiento fue favorable desde las primeras pruebas. Se utilizaron módulos con potenciómetros multivuelta integrados, lo que facilitó su calibración en distintas condiciones lumínicas, tanto en interiores como en exteriores. Esto permitió establecer con precisión el umbral de detección de luz necesario para activar o inhibir el movimiento de los motores.

Respecto al uso de pines analógicos como digitales, no se presentaron dificultades relevantes. Tras revisar la documentación del Arduino UNO R4, se confirmó que todos los pines analógicos pueden configurarse como entradas digitales, lo que permitió ampliar la

disponibilidad de pines de señal sin necesidad de hardware adicional. Para distribuir la alimentación de 5V y GND hacia los sensores, se utilizó una protoboard auxiliar exclusivamente para líneas de energía, evitando la sobrecarga de pines en la shield.

Finalmente, la instalación de los sensores de fin de carrera (endstops) se realizó en una etapa posterior, y no presentó mayores inconvenientes. Su verificación fue principalmente física y funcional, comprobando que los motores se detuvieran correctamente al accionar manualmente cada interruptor. No se reportaron fallos en conexiones ni comportamientos erráticos asociados a estos sensores.

6.3 Comportamiento del sistema durante las pruebas funcionales

Una vez finalizado el ensamblaje del prototipo y desarrollada la lógica de control, se llevaron a cabo pruebas funcionales para evaluar la capacidad del sistema de responder correctamente a cambios en las condiciones de iluminación.

Durante estas pruebas, los sensores LDR demostraron una correcta sensibilidad y lectura frente a la presencia o ausencia de luz. No obstante, se detectaron errores en la lógica inicial del programa, específicamente en la toma de decisiones respecto a la dirección de movimiento. En las primeras versiones del código, el sistema tendía a desplazarse hacia las zonas en sombra, en lugar de orientarse hacia las zonas con mayor incidencia lumínica. Este problema fue solucionado mediante la revisión y reestructuración del algoritmo, corrigiendo la condición de evaluación lógica entre sensores. Una vez solucionado, los movimientos del panel se realizaron sin trabas ni desplazamientos erráticos.

Respecto a la velocidad y precisión del movimiento, se realizaron múltiples pruebas ajustando los tiempos entre pasos de los motores paso a paso. La configuración que ofreció mejores resultados fue un retardo de 900 microsegundos entre pasos, la cual permitió obtener un movimiento suave, silencioso y sin vibraciones, incluso en condiciones de carga. Esta velocidad evitó que los motores se sobrecalentaran y favoreció una operación continua y estable.

En etapas tempranas, los motores presentaban problemas de calentamiento, vibraciones excesivas y pérdida de pasos, especialmente cuando se operaban sin los jumpers de microstepping en la Shield CNC V3. Al incorporar los jumpers para configurar los controladores

en 1/8 de paso, se resolvieron estos inconvenientes, logrando un rendimiento estable y un comportamiento mecánico fiable.

Finalmente, se verificó la correcta ejecución del homing automático, tanto al iniciar el sistema como al finalizar la jornada operativa. Al encender el prototipo, los ejes se desplazaban hasta sus respectivos sensores de fin de carrera, estableciendo una posición de referencia segura para comenzar el seguimiento solar. En condiciones de ausencia prolongada de luz (simulación de anochecer), el sistema también logró ejecutar correctamente la rutina de retorno al origen. Si bien en algunas ocasiones el retraso de detección superó los 10 minutos programados, el algoritmo cumplió su función sin comprometer el consumo energético, manteniéndose dentro de los márgenes operacionales previstos.

6.4 Reflexiones finales, limitaciones y proyecciones

Si bien el prototipo desarrollado cumple satisfactoriamente con los objetivos de seguimiento solar en dos ejes (horizontal y vertical), existen oportunidades claras de mejora que podrían abordarse con mayores recursos y tiempo disponible.

Una de las principales limitaciones identificadas en esta etapa fue la ausencia de un tercer grado de libertad, particularmente en lo que respecta a la inclinación del panel. A pesar de estas limitaciones, el sistema en su versión actual presenta logros técnicos significativos. Aunque se trata de un prototipo a escala reducida, el panel solar logra cargar completamente la batería en 3,5 horas, en comparación con las 4 horas necesarias sin el sistema de seguimiento. Esto demuestra una mejora efectiva en la captación de energía. Además, gracias a la lógica de control implementada, el sistema permanece inactivo cuando no es necesario, logrando que el consumo energético total del mecanismo no supere el 2 % de la energía generada, lo cual valida su eficiencia operativa.

6.5 Análisis de costos y proyección a escala real

La construcción del prototipo requirió la adquisición de materiales y componentes específicos, cuyo detalle de costos se presenta a continuación, considerando valores de mercado vigentes en Chile. Posteriormente, se realiza una proyección de costos para la implementación de un sistema equivalente a escala real, capaz de operar con paneles solares de mayor potencia y un almacenamiento energético adecuado para aplicaciones residenciales o de mayor envergadura.

Esta comparación permite analizar la viabilidad económica del sistema y estimar la inversión necesaria para su escalamiento futuro.

Materia/Componente	Cantidad	Precio unitario (CLP)	Precio Total (CLP)
Panel Solar 20W 12v	1	\$15.000	\$15.000
Motor Nema 17 con husillo	3	\$28.000	\$84.000
Arduino Uno R4 Wifi	1	\$38.990	\$38.990
Shield CNC V3	1	\$3.990	\$3.990
Cable 4 pines motor(1m)	3	\$1.800	\$5.400
Soporte de guía eje lineal SK8	3	\$4.850	\$14.550
LM8UU Rodamiento cilíndrico 8 mm	4	\$2.990	\$11.960
608zz Rodamiento (Pack 4 unds)	1	\$3.290	\$3.290
Base para tuerca trapezoidal T8	1	\$3.290	\$3.290
Eje varilla lisa 8 mm × 500 mm	6	\$6.990	\$41.940
Plancha de madera 70cm×70cm×2 cm	1	\$7.000	\$7.000
Placas de acrílico para soporte	2	\$1.000	\$1.000
Tornillos y fijaciones	1 (100 unidades)	\$20.000	\$20.000
Controlador solar PWM 10 A	1	\$7.000	\$7.000
Batería 12V 12Ah	1	\$26.000	\$26.000
Sensores de luz (LDR)	4	\$400	\$1.600
Sensores endstop	4	\$1.200	\$4.800
Total estimado	\$309.970		

Tabla 6.1 Costos Prototipo

A partir del análisis de costos del prototipo, es posible proyectar el presupuesto requerido para la implementación de un sistema de seguimiento solar a escala real, considerando componentes de mayor capacidad y características adecuadas para aplicaciones residenciales o de mayor envergadura. A continuación, se presenta una estimación detallada de los principales materiales y dispositivos necesarios para escalar la solución propuesta, junto con sus respectivos valores de referencia en el mercado nacional.

Materia/Componente	Cantidad	Precio Unitario(CLP)	Precio Total(CLP)
Panel Solar 500w	1	\$100.000	\$100.000
Batería ciclo profundo 12V 100 Ah	1	\$150.000	\$150.000
Controlador solar MPPT 40 A	1	\$70.000	\$70.000
Motor NEMA 23 (3 Nm, 4 A)	2	\$49.990	\$99.980
Husillo T12 (12 mm, 600 mm, paso 4 mm)	2	\$18.000	\$36.000
Actuador lineal eléctrico (600–800 mm)	1	\$60.000	\$60.000
Arduino UNO	1	\$15.000	\$15.000
Shield, drivers y sensores (completo)	1	\$25.000	\$25.000
Placas soporte y estructura metálica	1	\$100.000	\$100.000
Tornillos, fijaciones, cables	-	-	\$30.000
Total Estimado		\$685.980	

Tabla 6.2 Costos Prototipo Escala Real

CAPÍTULO VII: TRABAJO FUTURO

Para optimizar el prototipo y prepararlo para una implementación en escala real, se proponen las siguientes mejoras:

- A pesar de que el prototipo desarrollado ha demostrado ser funcional y eficiente en condiciones de prueba controladas, existen múltiples oportunidades de mejora y expansión tecnológica que podrían ser abordadas en etapas futuras del Trabajo de Título. Uno de los principales desafíos a considerar es la autonomía energética del sistema. Si bien actualmente se utiliza una batería como fuente de respaldo, se proyecta optimizar el sistema para que pueda operar parcialmente con energía directa del panel solar durante el día, utilizando la batería solo en momentos específicos, como la ejecución del homing nocturno. Esta transición hacia una operación híbrida permitiría reducir aún más el consumo energético almacenado y aumentar la sostenibilidad del sistema.
- Por otra parte, se plantea la incorporación de conectividad inalámbrica, a través de módulos Wi-Fi o Bluetooth, lo que permitiría monitorear el estado del sistema en tiempo real mediante una aplicación móvil. Esto resulta especialmente útil cuando el sistema se encuentra instalado en zonas de difícil acceso, como techos residenciales o instalaciones rurales. Esta funcionalidad permitiría detectar errores, bloqueos o fallos en los sensores, ofreciendo al usuario alertas preventivas y datos operativos. En línea con ello, también se considera relevante la implementación de un registro interno de datos operativos, que incluya métricas como tiempos de exposición solar, niveles de luminosidad, eficiencia de carga y frecuencia de movimiento. Este registro permitiría analizar el comportamiento del sistema a largo plazo, evaluar su rendimiento bajo distintas condiciones climáticas y generar recomendaciones de ajuste o mantenimiento.
- Otro objetivo de mejora se orienta hacia el desarrollo de una lógica de control basada en aprendizaje adaptativo. La incorporación de algoritmos que le permitan al sistema reconocer patrones diarios —como horarios recurrentes de sombra o zonas de baja eficiencia— facilita un funcionamiento más inteligente e independiente de las entradas sensoriales. De este modo, el prototipo evolucionaría hacia una solución predictiva y proactiva, capaz de optimizar su rendimiento sin depender exclusivamente de la lectura en tiempo real.

- Además, se contempla la posibilidad de escalar el diseño a paneles solares de mayor tamaño, lo que implicaría ajustes estructurales significativos, especialmente en la selección de materiales, refuerzos mecánicos y motores con mayor torque. Esta ampliación permitiría aplicar el sistema a instalaciones reales en viviendas particulares o pymes, contribuyendo a la reducción del consumo energético doméstico mediante una optimización dinámica de la captación solar.

7.1 Incorporación de un tercer grado de libertad (eje Z): Propuesta de mejora estructural y funcional

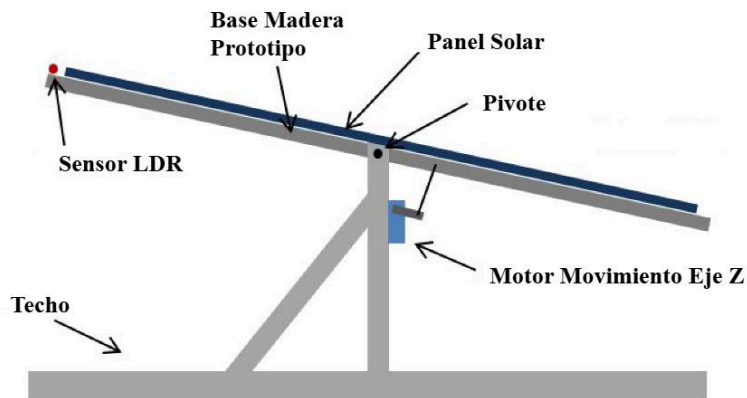


Figura 7.1 Ejemplo de vista prototipo con tercer grado de libertad

Una de las mejoras más significativas proyectadas para futuras etapas del desarrollo consiste en la incorporación de un tercer grado de libertad en el sistema de seguimiento solar, específicamente la capacidad de inclinación del panel sobre el eje Z. Es importante hacer notar que este grado de libertad, orientado a la inclinación del panel solar, constituye una propuesta de mejora respecto al sistema ya construido, agregando la posibilidad de realizar un seguimiento solar tridimensional. De esta manera, el panel no solo seguiría al sol en los ejes vertical (Y) y horizontal (X), como lo hace actualmente el prototipo, sino que también podría ajustar su ángulo de inclinación para optimizar la captación de radiación solar durante todo el año, maximizando la eficiencia energética en distintas condiciones de iluminación.

7.1.1 Descripción técnica de la propuesta

Para implementar esta mejora, se contempla el uso de un actuador lineal eléctrico conectado a su respectivo driver y gestionado a través de la CNC Shield V3. El actuador será instalado en la estructura del sistema y acoplado a la base del panel solar, la cual estará montada sobre un pivote especialmente diseñado y fijado a la estructura del techo. Este pivote permitirá que el panel se incline principalmente en el eje este-oeste, ajustando así el ángulo de incidencia respecto al sol, en un movimiento conocido como inclinación azimutal.

Adicionalmente, se incorporará un sensor de luz extra que será fijado en la parte superior del panel, junto al sensor de luz superior ya existente. La función de este nuevo sensor es proporcionar información precisa sobre la intensidad y dirección de la luz incidente, permitiendo al sistema calcular el ángulo óptimo de inclinación en tiempo real. La lógica de control será modificada para integrar este tercer sensor y el actuador, permitiendo un ajuste autónomo y eficiente de la inclinación del panel.

Al igual que en la configuración actual, cuando los sensores detecten ausencia de luz (por ejemplo, al anochecer o en condiciones de baja luminosidad), el sistema ejecutará una rutina de retorno automático: el panel volverá a una posición predeterminada, orientada hacia el punto donde el sol emerge al amanecer. Esto garantiza que el sistema esté correctamente alineado para maximizar la captación de energía desde el inicio de cada día.

7.1.2 Importancia, justificación e impacto en el usuario final

Cabe destacar que la adición de este tercer grado de libertad en el eje Z es el resultado tanto de recomendaciones recibidas en el proceso de revisión académica como de la necesidad de aumentar la versatilidad y eficiencia del sistema para su aplicación real. Este avance ampliará significativamente las capacidades técnicas del prototipo, representando un paso relevante hacia la profesionalización y escalabilidad del Trabajo de Título, facilitando su implementación en contextos productivos, urbanos o rurales.

El objetivo principal de escalar el prototipo a un sistema real es contribuir a la reducción efectiva del gasto energético en hogares particulares y pequeñas empresas. Por ejemplo, considerando una vivienda chilena promedio con un consumo mensual cercano a \$20.000 CLP (aproximadamente 125 kWh/mes), la implementación de un sistema real escalado —compuesto

por dos paneles solares de 500 W cada uno y cuatro baterías de 200Ah a 12V— permitiría cubrir la mayor parte del consumo mensual.

7.2 Impacto energético y económico: Cobertura de cada sistema

7.2.1 Ganancia porcentual respecto al panel fijo

La ganancia % del prototipo y del sistema escalado real con los 3 grados de libertad sería la siguiente (asumiendo condiciones climáticas perfectas):

- Prototipo actual (dos ejes): 25 % más energía captada.
- Sistema con tercer grado de libertad: 40 % más energía captada.

La energía generada por un panel solar se puede calcular mediante la fórmula:

$$E = P_{nominal} \times H_t \times \eta$$

Donde:

- E = Energía generada diaria (Wh)
- $P_{nominal}$ = Potencia nominal del panel (W)
- H_t = Horas solares pico equivalente (h)
- η = Eficiencia global del sistema (Normalmente entre 0.75 y 0.85 en hogares)

Considerando un sistema con dos paneles de 500 W (total 1.000 W), 4 horas solares pico diarias y una eficiencia global de 0,7, la energía mensual generada para cada configuración se estima así:

- Panel Fijo (sin seguimiento)::

$$E_{fijo} = 1000W \times 4h/día \times 0,7 \times 30 días = 84.000Wh = 84 kWh/mes$$

- Prototipo actual (seguimiento en 2 ejes, +25%):

$$E_{2 ejes} = 84 kWh/mes \times 1,25 = 105 kWh/mes$$

- Sistema a escala con 3 grados de libertad(3 ejes,+ 40%):

$$E_{3 ejes} = 84 kWh/mes \times 1,45 = 117,6 kWh/mes$$

7.2.2 Cálculo de disminución de consumo energético en el hogar

La cobertura porcentual de cada sistema sobre el consumo mensual se obtiene dividiendo la energía generada por el sistema entre el consumo mensual promedio del hogar (125 kWh), y multiplicando por 100:

- Panel fijo:

$$\text{Cobertura} = \frac{84}{125} \times 100 = 67\%$$

- Prototipo actual:

$$\text{Cobertura} = \frac{105}{125} \times 100 = 84\%$$

- Escala con 3 grados de libertad:

$$\text{Cobertura} = \frac{117.6}{125} \times 100 = 94\%$$

7.2.3 Ahorro energético estimado:

Si el hogar gasta 20.000 CLP al mes, la reducción sería proporcional a la cobertura alcanzada:

- Panel fijo: Ahorro de \$13.400 CLP/mes.
- Prototipo actual: Ahorro de \$16.800 CLP/mes.
- Tres grados de libertad: Ahorro de \$18.800 CLP/mes.

La incorporación del tercer grado de libertad no solo aporta mejoras estructurales, sino que representa un incremento sustancial en la eficiencia de captación energética del sistema fotovoltaico. Esto permite a los usuarios disminuir su dependencia de la red eléctrica convencional y experimentar un ahorro económico tangible en su boleta mensual de electricidad.

7.3 Consideraciones sobre la fiabilidad y limitaciones del sistema

Si bien la implementación de un sistema de seguimiento solar con tres grados de libertad ofrece ventajas significativas en términos de eficiencia y reducción de costos, es fundamental tener presente que no se trata de una solución 100 % fiable para reemplazar por completo el

suministro de energía eléctrica convencional en un hogar o pyme. La generación solar depende de factores que están fuera del control de cualquier persona, tales como la radiación solar diaria, la presencia de nubes o lluvias, el sombreado por edificaciones o árboles cercanos, la acumulación de polvo sobre los paneles, y la variabilidad estacional del clima.

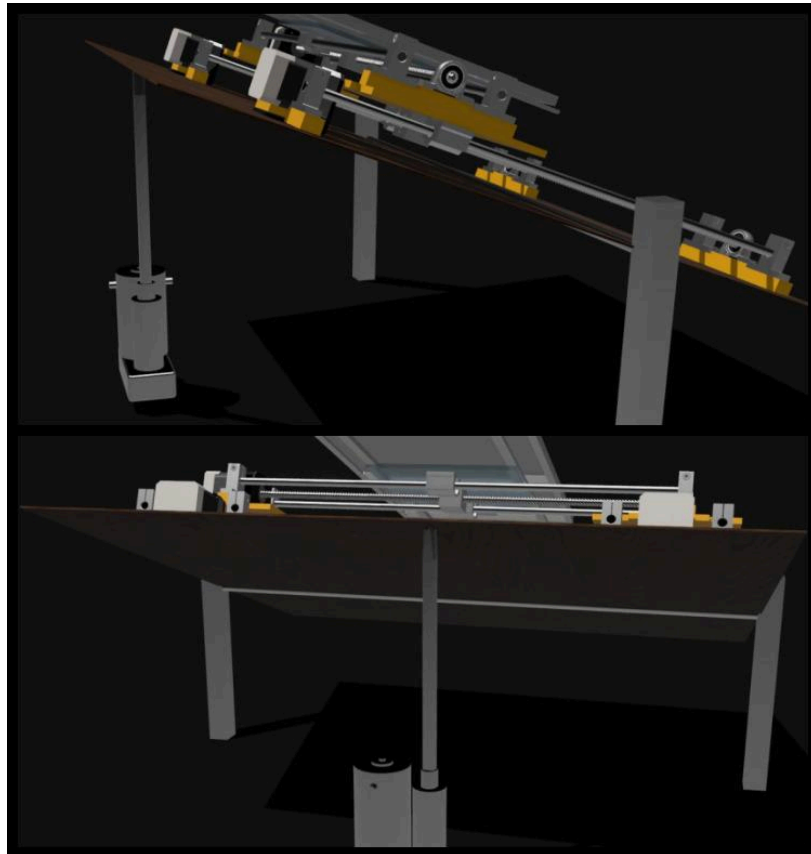


Figura 7.2 Prototipo con 3 grados de libertad modelado en 3D

Estos factores pueden afectar tanto la generación como la autonomía real del sistema, especialmente durante periodos de baja irradiancia. Por lo tanto, aunque este tipo de sistemas permite reducir considerablemente la dependencia de la red eléctrica, siempre es recomendable mantener un respaldo de energía convencional o considerar soluciones híbridas, especialmente para asegurar el suministro en situaciones críticas o de alta demanda.

En el Anexo 2 se encuentra un código con el funcionamiento de los 3 grados de libertad.

CAPÍTULO VIII: CONCLUSIONES

El desarrollo del prototipo de panel solar inteligente móvil ha representado una experiencia integral de aplicación de conocimientos teóricos y prácticos adquiridos a lo largo de la formación como ingeniero civil en informática y telecomunicaciones. Si bien el objetivo inicial del Trabajo de Título se centró en la mejora de la eficiencia energética mediante un sistema de seguimiento solar activo, los resultados finales revelaron que el mayor aporte técnico radica en la lógica de control desarrollada. El algoritmo implementado no solo permite una detección eficiente de la luz, sino que también integra decisiones inteligentes de movimiento, autonomía energética y retorno automático en condiciones de anochecer, todo ello sin necesidad de incorporar hardware adicional costoso o especializado.

Aunque el prototipo se encuentra en una etapa a escala, los ensayos funcionales confirmaron su operatividad y eficiencia en escenarios reales, reduciendo ligeramente el tiempo de carga de la batería. Con algunos ajustes estructurales y ampliación de componentes, este sistema podría escalarse con éxito al ámbito doméstico, beneficiando a usuarios particulares que buscan soluciones accesibles y sostenibles. No obstante, su uso en contextos industriales presenta mayores exigencias técnicas que superan el alcance del diseño actual. Durante el desarrollo se enfrentaron diversas limitaciones, entre ellas restricciones de espacio físico, presupuesto acotado y disponibilidad de materiales. Estas dificultades, lejos de ser obstáculos, promovieron una constante iteración en el diseño, soluciones creativas y decisiones técnicas fundamentadas. Destaca en particular el aprendizaje profundo en áreas como el control de hardware, la integración modular entre componentes electrónicos y mecánicos, y el diseño 3D de estructuras personalizadas mediante impresión. Este Trabajo de Título refleja fielmente la formación interdisciplinaria del autor, quien logró integrar hardware y software de manera armónica, automatizando un sistema funcional y eficiente. El uso de Arduino como plataforma de desarrollo facilitó la implementación de soluciones robustas y accesibles, evidenciando cómo la programación orientada al hardware puede ser tanto formativa como intuitiva para ingenieros que no se identifican inicialmente como desarrolladores de software.

Finalmente, este trabajo busca transmitir un mensaje claro a otros estudiantes e ingenieros: la innovación no requiere necesariamente de grandes recursos, sino de una mentalidad abierta, disposición a aprender constantemente, y compromiso con la mejora continua. A través de este prototipo, se demuestra que con motivación, perseverancia y un enfoque orientado a

resolver problemas concretos, es posible diseñar soluciones tecnológicas con impacto real en la vida cotidiana y potencial de crecimiento futuro.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

- **Acimut:**

Ángulo horizontal medido desde el norte geográfico en el sentido de las agujas del reloj, que indica la dirección de orientación de un panel solar respecto al sol. Es fundamental para calcular la posición óptima de los paneles solares a lo largo del día.
- **Algoritmo de control:**

Conjunto de instrucciones programadas en un microcontrolador que determinan cómo debe reaccionar el sistema ante la información proporcionada por los sensores, ajustando el movimiento de los paneles solares para optimizar la captación de energía.
- **Arduino Uno:**

Placa de desarrollo de hardware libre basada en el microcontrolador ATmega328P. Es ampliamente utilizada en proyectos de automatización y prototipado por su facilidad de uso y compatibilidad con diversos módulos y sensores.
- **Autonomía energética:**

Cantidad de tiempo durante la cual un sistema puede operar de forma independiente utilizando la energía almacenada (por ejemplo, en baterías), sin necesidad de fuentes externas de alimentación.
- **Batería de plomo-ácido sellada (VRLA):**

Tipo de batería recargable que utiliza placas de plomo y electrolito en forma de gel o absorbido en una estera de fibra de vidrio, lo que la hace segura y libre de mantenimiento. Se utiliza comúnmente en sistemas de energía solar por su bajo costo y fiabilidad.
- **Carril motorizado:**

Estructura mecánica que permite el desplazamiento controlado de los paneles solares en uno o más ejes, facilitando su orientación dinámica hacia la fuente de luz solar.

- **Célula fotovoltaica:**
Dispositivo semiconductor que convierte la luz solar directamente en electricidad mediante el efecto fotoeléctrico. Varias células conforman un panel solar.
- **Controlador DRV8825:**
Circuito integrado utilizado para controlar motores paso a paso, permitiendo el ajuste de microstepping y protecciones contra sobrecorriente y sobrecalentamiento.
- **Ciclo de trabajo (duty cycle):**
Proporción del tiempo en que un sistema está activo respecto al tiempo total de operación, importante para la eficiencia energética y la duración de los componentes electrónicos y mecánicos.
- **Eficiencia energética:**
Relación entre la energía útil obtenida y la energía consumida o disponible en un sistema, expresada generalmente como porcentaje. En sistemas fotovoltaicos, mide la cantidad de energía solar convertida en electricidad útil.
- **Eje (X, Y, Z):**
Direcciones de movimiento posibles para el panel solar en el sistema. El eje X corresponde al desplazamiento horizontal, el eje Y al vertical, y el eje Z puede referirse a inclinación o rotación adicional.
- **Efecto fotoeléctrico:**
Fenómeno físico mediante el cual ciertos materiales liberan electrones cuando son expuestos a la luz, base fundamental de la generación eléctrica en celdas solares.
- **Endstop (Sensor de fin de carrera):**
Dispositivo electrónico que detecta el límite físico de desplazamiento de un eje. Se utiliza para establecer posiciones de referencia (homing) y evitar movimientos fuera del rango seguro.
- **Fuente de alimentación:**
Dispositivo que suministra energía eléctrica al sistema, ya sea desde la red, baterías o paneles solares.
- **Homing:**
Procedimiento automático mediante el cual el sistema lleva los motores a una

posición de referencia inicial, generalmente utilizando sensores de fin de carrera, asegurando que los movimientos posteriores sean precisos.

- **Horas de luz viables:**

Cantidad de horas diarias en las que la radiación solar es suficiente para la captación eficiente de energía por parte del sistema fotovoltaico. Este valor varía según la ubicación geográfica, la estación del año y las condiciones climáticas.
- **Husillo:**

Componente mecánico en forma de tornillo utilizado para convertir el movimiento rotacional del motor en desplazamiento lineal de los paneles solares.
- **Irradiancia solar:**

Cantidad de energía solar que incide por unidad de superficie sobre el panel, medida en W/m^2 . Es un parámetro clave para calcular la potencia generada por los paneles solares.
- **LDR (Light Dependent Resistor):**

Resistencia variable cuya magnitud depende de la cantidad de luz incidente. Se emplea como sensor para detectar la intensidad de la radiación solar y guiar el movimiento de los paneles.
- **Microstepping:**

Técnica de control de motores paso a paso que permite dividir cada paso completo del motor en fracciones menores, logrando movimientos más suaves y precisos.
- **Panel fotovoltaico (Panel solar):**

Dispositivo formado por varias celdas fotovoltaicas conectadas, capaz de transformar la energía luminosa del sol en energía eléctrica utilizable.
- **Placa Shield CNC V3:**

Placa de expansión para Arduino Uno diseñada para facilitar el control simultáneo de hasta tres motores paso a paso y la conexión de sensores de fin de carrera, comúnmente utilizada en proyectos de automatización y robótica.
- **Policristalino / Monocristalino:**

Tipos de material de las celdas solares. El silicio policristalino está compuesto por

múltiples cristales, es más económico y menos eficiente; el monocristalino está formado por un solo cristal y ofrece mayor eficiencia pero a mayor costo.

- **Potencia eléctrica:**

Magnitud física que representa la cantidad de energía eléctrica transferida o consumida por unidad de tiempo, medida en vatios (W). Se calcula como el producto del voltaje y la corriente ($P = V \times I$).
- **Prototipado:**

Fase del desarrollo en la que se construyen versiones preliminares del sistema para probar conceptos, validar soluciones y ajustar diseños antes de la fabricación final.
- **Protoboard:**

Placa para el montaje provisional de circuitos electrónicos sin necesidad de soldaduras, utilizada para experimentar, probar y modificar conexiones fácilmente durante la fase de desarrollo.
- **Rastreador solar (tracker):**

Sistema automatizado que ajusta la orientación de los paneles solares siguiendo la trayectoria del sol a lo largo del día para maximizar la captación de energía.
- **Seguimiento solar en dos ejes / tres ejes:**

Metodología en la que los paneles solares se mueven automáticamente para seguir la posición del sol en el plano horizontal (azimut) y vertical (elevación), o añadiendo un tercer eje de inclinación o rotación para mayor precisión y cobertura.
- **Sensor fotosensible (Fototransistor/Fotodiodo):**

Componente electrónico que responde a la luz, utilizado para medir la intensidad lumínica y proporcionar señales eléctricas proporcionales.
- **Sistema pasivo / activo:**

El sistema activo mantiene todos sus componentes energizados y listos para reaccionar instantáneamente, mientras que el sistema pasivo optimiza la autonomía apagando motores y actuadores cuando no es necesario mover el panel.
- **Voltaje (Tensión eléctrica):**

Diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos, que impulsa el flujo de corriente eléctrica. Se mide en voltios (V).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Feron, S. (2016). Sustainability of Off-Grid Photovoltaic Systems for Rural Electrification in Developing Countries: A Review. *Sustainability*, 8(12), 1326.
<https://doi.org/10.3390/su8121326>
2. Ninsawat, S., & Hossain, M. D. (2016). Identifying Potential Area and Financial Prospects of Rooftop Solar Photovoltaics (PV). *Sustainability*, 8(10), 1068.
<https://doi.org/10.3390/su8101068>
3. Schmidt, T. S., & Born, R. (2015). Photovoltaic Systems: Efficiency and Adaptation in Urban Environments. *Renewable Energy Journal*, 42(3), 251-258.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.01.028>
4. Axelson, J., & Ganssle, J. (2019). *Embedded Systems: Design and Applications*. McGraw-Hill Education.
5. Horowitz, P., & Hill, W. (2015). *The Art of Electronics* (3rd ed.). Cambridge University Press.
6. Monk, S. (2017). *Programming Arduino: Getting Started with Sketches* (2nd ed.). McGraw-Hill Education.
7. Tocci, R., & Widmer, N. (2020). *Digital Systems: Principles and Applications* (12th ed.). Pearson Education.
8. Lopez, R., & Kouloumpis, V. (2017). Impact of Shadow on the Performance of Photovoltaic Systems. *Journal of Solar Energy Engineering*, 139(5), 1-10.
<https://doi.org/10.1115/1.4037756>
9. González, A., & Pérez, M. (2018). Adaptación y Eficiencia de Paneles Solares en Zonas Urbanas: Un Estudio Comparativo. *Energía y Sociedad*, 12(4), 98-112.
<https://doi.org/10.1016/j.ener.2018.04.005>
10. Arduino. (n.d.). *Arduino Uno Rev3*. Arduino Official Website.
<https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3>
11. Banzi, M., & Shiloh, M. (2014). *Getting Started with Arduino*. O'Reilly Media.
12. Monk, S. (2013). *Programming Arduino: Getting Started with Sketches*. McGraw-Hill Education.
13. Elprocus. (n.d.). *HC-05 Bluetooth Module*. Elprocus.
<https://www.elprocus.com/hc-05-bluetooth-module/>

14. Sparkfun. (n.d.). ESP8266 Wi-Fi Module. Sparkfun.
<https://www.sparkfun.com/products/13678>
15. Electronics Tutorials. (n.d.). LDR (Light Dependent Resistor).
https://www.electronics-tutorials.ws/io/io_3.html
16. Arduino Project Hub. (n.d.). Motor Control with Arduino: DC Motor.
<https://create.arduino.cc/projecthub/motor-control-with-arduino-dc-motor>
17. Battery University. (n.d.). Li-Po Battery Technology.
<https://batteryuniversity.com/article/bu-808-how-to-prolong-lithium-based-batteries>
18. Electronics Hub. (n.d.). L298N Motor Driver Module.
<https://www.electronicshub.org/l298n-motor-driver-module-arduino/>
19. Kalogirou, S. A. (2014). *Solar Energy Engineering: Processes and Systems* (2.^a ed.). Academic Press.
20. Masters, G. M. (2013). *Renewable and Efficient Electric Power Systems* (2.^a ed.). Wiley.
21. Tipler, P. A., & Mosca, G. (2007). *Física para ciencias e ingeniería* (6.^a ed.). Editorial Reverté.
22. Ahmad, S., Malik, A. S., Xia, L., & Asharif, N. (2020). Solar tracking systems: A review of design challenges and opportunities. *Renewable Energy*, 148, 921-934.
23. Arduino Project Hub. (n.d.). Stepper motor control with Arduino. Recuperado de <https://create.arduino.cc/projecthub>
24. Kalogirou, S. A. (2014). *Solar Energy Engineering: Processes and Systems* (2.^a ed.). Academic Press.
25. Kalogirou, S. A. (2014). *Solar Energy Engineering: Processes and Systems* (2.^a ed.). Academic Press.
26. Rashid, M. H. (2019). *Power Electronics Handbook: Devices, Circuits, and Applications* (4.^a ed.). Academic Press.
27. Triacs. (n.d.). Batería 12 volt 12Ah. Recuperado de <https://triacs.cl/baterias/245-bateria-12-volt-12ah->
28. Ahmad, S., Malik, A. S., Xia, L., & Asharif, N. (2020). Solar tracking systems: A review of design challenges and opportunities. *Renewable Energy*, 148, 921-934.
29. Rashid, M. H. (2019). *Power Electronics Handbook: Devices, Circuits, and Applications* (4.^a ed.). Academic Press.

30. Texas Instruments. (2021). DRV8825 Stepper Motor Controller. Recuperado de <https://www.ti.com>
31. National Renewable Energy Laboratory. (2016). Energy Storage Requirements for Achieving 50% Solar Photovoltaic Energy Penetration in California. Recuperado de <https://www.nrel.gov/docs/fy16osti/66595.pdf>
32. Soltec.(2023).SF7 Tracker. Recuperado de <https://soltec.com/en/solutions/products/sf7-solar-tracker/>
33. Souza, M. de. (2022). Desenvolvimento de um sistema de rastreamento solar de um eixo baseado em Arduino. Universidade Federal de Minas Gerais. Recuperado de <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/76789>
34. Comisión Nacional de Energía, Chile (2024). “Tarifas de Energía Eléctrica Residencial.
35. Suman, S., & Kothari, D.P. (2013). “Optimal Design of Solar Tracking Systems: A Review.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 392–402.
36. Duffie, J.A., & Beckman, W.A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes* (4th Edition). John Wiley & Sons.

ANEXOS

Anexo 1 Código Fuente

```
// Pines motores
#define DIR_X 5
#define STEP_X 2
#define DIR_Y 6
#define STEP_Y 3
#define DIR_Z 7
#define STEP_Z 4
#define ENABLE 8

// Pines sensores de luz
#define LDR_IZQ A0
#define LDR_DER A1
#define LDR_ARRIBA A2
#define LDR_ABAJO A3

// Pines sensores de fin de carrera (endstop)
#define X_MIN_ENDSTOP 9
#define Y_MAX_ENDSTOP 10
#define Z_MAX_ENDSTOP 11
#define Z_MIN_ENDSTOP 12

// Configuración
const int delay_microsegundos = 900;
const unsigned long TIEMPO_ANOCHECER_MS = 600000;
const unsigned long TIEMPO_CONFIRMACION_SOMBRA = 10000;
const unsigned long TIMEOUT_HOMING_MS = 10000;
const int PASOS_VISIBLES = 1600;

// Variables
unsigned long tiempoSinLuz = 0;
unsigned long tiempoSombra = 0;
bool motoresActivos = false;
```

```

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(DIR_X, OUTPUT); pinMode(STEP_X, OUTPUT);
  pinMode(DIR_Y, OUTPUT); pinMode(STEP_Y, OUTPUT);
  pinMode(DIR_Z, OUTPUT); pinMode(STEP_Z, OUTPUT);
  pinMode(ENABLE, OUTPUT); digitalWrite(ENABLE, HIGH);

  pinMode(LDR_IZQ, INPUT); pinMode(LDR_DER, INPUT);
  pinMode(LDR_ARRIBA, INPUT); pinMode(LDR_ABAJO, INPUT);

  pinMode(X_MIN_ENDSTOP, INPUT_PULLUP);
  pinMode(Y_MAX_ENDSTOP, INPUT_PULLUP);
  pinMode(Z_MAX_ENDSTOP, INPUT_PULLUP);
  pinMode(Z_MIN_ENDSTOP, INPUT_PULLUP);

  Serial.println("🟢 Iniciando sistema con HOMING");
  homingInicial();
}

void loop() {
  bool luzIzq = digitalRead(LDR_IZQ) == LOW;
  bool luzDer = digitalRead(LDR_DER) == LOW;
  bool luzArr = digitalRead(LDR_ARRIBA) == LOW;
  bool luzAba = digitalRead(LDR_ABAJO) == LOW;

  int sensoresConLuz = luzIzq + luzDer + luzArr + luzAba;

  if (sensoresConLuz == 4) {
    motoresActivos = false;
    digitalWrite(ENABLE, HIGH);
    tiempoSinLuz = 0;
    tiempoSombra = 0;
    Serial.println("✅ Todos los sensores detectan LUZ → Motores apagados");
  } else {
    if (!motoresActivos) {
      if (tiempoSombra == 0) tiempoSombra = millis();
      if (millis() - tiempoSombra >= TIEMPO_CONFIRMACION_SOMBRA) {

```

```

motoresActivos = true;
digitalWrite(ENABLE, LOW);
Serial.println("⚠ Sombra confirmada → Activando motores");
} else {
  Serial.println("🕒 Esperando confirmación de sombra...");
}
} else {
  moverInteligente(luzIzq, luzDer, luzArr, luzAba);
}

if (sensoresConLuz == 0) {
  if (tiempoSinLuz == 0) tiempoSinLuz = millis();
  else if (millis() - tiempoSinLuz >= TIEMPO_ANOCHECER_MS) {
    Serial.println("🌙 ANOCHECER DETECTADO → Volviendo a posición inicial...");
    homingNocturno();
    tiempoSinLuz = 0;
  }
  else {
    tiempoSinLuz = 0;
  }
}

delay(500);
}

// --- HOMING ---
void homingInicial() {
  Serial.println("🏠 Iniciando HOMING automático...");
  digitalWrite(ENABLE, LOW);

  digitalWrite(DIR_X, LOW); digitalWrite(DIR_Y, LOW);
  unsigned long inicio = millis();
  while (digitalRead(X_MIN_ENDSTOP) == LOW && millis() - inicio < TIMEOUT_HOMING_MS) {
    digitalWrite(STEP_X, HIGH); digitalWrite(STEP_Y, HIGH);
    delayMicroseconds(delay_microsegundos);
    digitalWrite(STEP_X, LOW); digitalWrite(STEP_Y, LOW);
    delayMicroseconds(delay_microsegundos);
  }
}

```

```

}

digitalWrite(DIR_Z, LOW);
inicio = millis();
while (digitalRead(Z_MIN_ENDSTOP) == LOW && millis() - inicio < TIMEOUT_HOMING_MS) {
    digitalWrite(STEP_Z, HIGH);
    delayMicroseconds(delay_microsegundos);
    digitalWrite(STEP_Z, LOW);
    delayMicroseconds(delay_microsegundos);
}

digitalWrite(ENABLE, HIGH);
Serial.println("✅ HOMING completado");
delay(1000);
}

// --- LÓGICA INTELIGENTE ---
void moverInteligente(bool izq, bool der, bool arr, bool aba) {
    if (der && !izq && digitalRead(Z_MAX_ENDSTOP) == LOW) {
        moverMotor(DIR_Z, STEP_Z, HIGH, PASOS_VISIBLES);
        Serial.println("🔄 Movimiento Z derecha hacia la luz");
    } else if (izq && !der && digitalRead(Z_MIN_ENDSTOP) == LOW) {
        moverMotor(DIR_Z, STEP_Z, LOW, PASOS_VISIBLES);
        Serial.println("🔄 Movimiento Z izquierda hacia la luz");
    }
}

if (arr && !aba && digitalRead(Y_MAX_ENDSTOP) == LOW) {
    moverMotorXY(true, PASOS_VISIBLES);
    Serial.println("🔄 Movimiento XY arriba hacia la luz");
} else if (aba && !arr && digitalRead(X_MIN_ENDSTOP) == LOW) {
    moverMotorXY(false, PASOS_VISIBLES);
    Serial.println("🔄 Movimiento XY abajo hacia la luz");
}
}

// --- MOTORES ---
void moverMotor(int pinDir, int pinStep, bool direccion, int pasos) {

```

```

digitalWrite(pinDir, direccion);
for (int i = 0; i < pasos; i++) {
    digitalWrite(pinStep, HIGH);
    delayMicroseconds(delay_microsegundos);
    digitalWrite(pinStep, LOW);
    delayMicroseconds(delay_microsegundos);
}
}

void moverMotorXY(bool arriba, int pasos) {
    digitalWrite(DIR_X, arriba);
    digitalWrite(DIR_Y, arriba);
    for (int i = 0; i < pasos; i++) {
        digitalWrite(STEP_X, HIGH); digitalWrite(STEP_Y, HIGH);
        delayMicroseconds(delay_microsegundos);
        digitalWrite(STEP_X, LOW); digitalWrite(STEP_Y, LOW);
        delayMicroseconds(delay_microsegundos);
    }
}

// --- HOMING NOCTURNO ---
void homingNocturno() {
    digitalWrite(ENABLE, LOW);

    digitalWrite(DIR_X, LOW); digitalWrite(DIR_Y, LOW);
    unsigned long inicio = millis();
    while (digitalRead(X_MIN_ENDSTOP) == LOW && millis() - inicio < TIMEOUT_HOMING_MS) {
        digitalWrite(STEP_X, HIGH); digitalWrite(STEP_Y, HIGH);
        delayMicroseconds(delay_microsegundos);
        digitalWrite(STEP_X, LOW); digitalWrite(STEP_Y, LOW);
        delayMicroseconds(delay_microsegundos);
    }

    digitalWrite(DIR_Z, LOW);
    inicio = millis();
    while (digitalRead(Z_MIN_ENDSTOP) == LOW && millis() - inicio < TIMEOUT_HOMING_MS) {
        digitalWrite(STEP_Z, HIGH);

```

```

delayMicroseconds(delay_microsegundos);
digitalWrite(STEP_Z, LOW);
delayMicroseconds(delay_microsegundos);
}

digitalWrite(ENABLE, HIGH);
Serial.println("✅ Retorno por anochecer completado.");
}

```

Anexo 2: Código fuente Con 3 grados de libertad

```

// Pines motores
#define DIR_X 5
#define STEP_X 2
#define DIR_Y 6
#define STEP_Y 3
#define DIR_Z 7
#define STEP_Z 4
#define DIR_A 13 // Motor actuador eje A (inclinación acimut)
#define STEP_A 12
#define ENABLE 8

// Pines sensores de luz
#define LDR_IZQ A0
#define LDR_DER A1
#define LDR_ARRIBA A2
#define LDR_ABAJO A3
#define LDR_SOLAR A4 // Sensor que sigue al sol en trayectoria este-oeste

// Pines sensores de fin de carrera (endstop)
#define X_MIN_ENDSTOP 9
#define Y_MAX_ENDSTOP 10
#define Z_MAX_ENDSTOP 11

```

```

#define Z_MIN_ENDSTOP 12
// (por ahora, sin endstop para A)

const int delay_microsegundos = 900;
const unsigned long TIEMPO_ANOCHECER_MS = 600000;
const unsigned long TIEMPO_CONFIRMACION_SOMBRA = 10000;
const unsigned long TIMEOUT_HOMING_MS = 10000;
const int PASOS_VISIBLES = 1600;
const int PASOS_ACTUADOR = 800; // Ajustable según carrera deseada

// Variables
unsigned long tiempoSinLuz = 0;
unsigned long tiempoSombra = 0;
bool motoresActivos = false;
bool ultimaLecturaLuzSolar = true; // Estado anterior del sensor solar

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(DIR_X, OUTPUT); pinMode(STEP_X, OUTPUT);
  pinMode(DIR_Y, OUTPUT); pinMode(STEP_Y, OUTPUT);
  pinMode(DIR_Z, OUTPUT); pinMode(STEP_Z, OUTPUT);
  pinMode(DIR_A, OUTPUT); pinMode(STEP_A, OUTPUT);
  pinMode(ENABLE, OUTPUT); digitalWrite(ENABLE, HIGH);

  pinMode(LDR_IZQ, INPUT); pinMode(LDR_DER, INPUT);
  pinMode(LDR_ARRIBA, INPUT); pinMode(LDR_ABAJO, INPUT);
  pinMode(LDR_SOLAR, INPUT);

  pinMode(X_MIN_ENDSTOP, INPUT_PULLUP);
  pinMode(Y_MAX_ENDSTOP, INPUT_PULLUP);
  pinMode(Z_MAX_ENDSTOP, INPUT_PULLUP);

```

```

pinMode(Z_MIN_ENDSTOP, INPUT_PULLUP);

Serial.println("● Iniciando sistema con HOMING");
homingInicial();
}

void loop() {
  bool luzIzq = digitalRead(LDR_IZQ) == LOW;
  bool luzDer = digitalRead(LDR_DER) == LOW;
  bool luzArr = digitalRead(LDR_ARRIBA) == LOW;
  bool luzAba = digitalRead(LDR_ABAJO) == LOW;
  bool luzSolar = digitalRead(LDR_SOLAR) == LOW;

  // Eje A: control exclusivo del sensor solar (acimut)
  seguirSolConActuador(luzSolar);

  int sensoresConLuz = luzIzq + luzDer + luzArr + luzAba;

  if (sensoresConLuz == 4) {
    motoresActivos = false;
    digitalWrite(ENABLE, HIGH);
    tiempoSinLuz = 0;
    tiempoSombra = 0;
    Serial.println("✓ Todos los sensores detectan LUZ → Motores apagados");
  } else {
    if (!motoresActivos) {
      if (tiempoSombra == 0) tiempoSombra = millis();
      if (millis() - tiempoSombra >= TIEMPO_CONFIRMACION_SOMBRA) {
        motoresActivos = true;
        digitalWrite(ENABLE, LOW);
        Serial.println("⚠ Sombra confirmada → Activando motores");
      }
    }
  }
}

```

```

    } else {
        Serial.println("🕒 Esperando confirmación de sombra...");
    }
} else {
    moverInteligente(luzIzq, luzDer, luzArr, luzAba);
}

if (sensoresConLuz == 0 && !luzSolar) {
    if (tiempoSinLuz == 0) tiempoSinLuz = millis();
    else if (millis() - tiempoSinLuz >= TIEMPO_ANOCHECER_MS) {
        Serial.println("🌙 ANOCHECER DETECTADO → Volviendo a posición
inicial...");
        homingNocturno();
        tiempoSinLuz = 0;
    }
} else {
    tiempoSinLuz = 0;
}
}

delay(500);
}

// --- HOMING ---
void homingInicial() {
    Serial.println("🏠 Iniciando HOMING automático...");
    digitalWrite(ENABLE, LOW);

    digitalWrite(DIR_X, LOW); digitalWrite(DIR_Y, LOW);
    unsigned long inicio = millis();

```

```

while (digitalRead(X_MIN_ENDSTOP) == LOW && millis() - inicio <
TIMEOUT_HOMING_MS) {
    digitalWrite(STEP_X, HIGH); digitalWrite(STEP_Y, HIGH);
    delayMicroseconds(delay_microsegundos);
    digitalWrite(STEP_X, LOW); digitalWrite(STEP_Y, LOW);
    delayMicroseconds(delay_microsegundos);
}

digitalWrite(DIR_Z, LOW);
inicio = millis();
while (digitalRead(Z_MIN_ENDSTOP) == LOW && millis() - inicio <
TIMEOUT_HOMING_MS) {
    digitalWrite(STEP_Z, HIGH);
    delayMicroseconds(delay_microsegundos);
    digitalWrite(STEP_Z, LOW);
    delayMicroseconds(delay_microsegundos);
}

// Actuador A a posición inicial (simulada sin endstop)
digitalWrite(DIR_A, LOW);
for (int i = 0; i < PASOS_ACTUADOR; i++) {
    digitalWrite(STEP_A, HIGH);
    delayMicroseconds(delay_microsegundos);
    digitalWrite(STEP_A, LOW);
    delayMicroseconds(delay_microsegundos);
}

digitalWrite(ENABLE, HIGH);
Serial.println("✓ HOMING completado");
delay(1000);
}

```

```
// --- LÓGICA INTELIGENTE ---
```

```
void moverInteligente(bool izq, bool der, bool arr, bool aba) {  
  if (der && !izq && digitalRead(Z_MAX_ENDSTOP) == LOW) {  
    moverMotor(DIR_Z, STEP_Z, HIGH, PASOS_VISIBLES);  
    Serial.println("↻ Movimiento Z derecha hacia la luz");  
  } else if (izq && !der && digitalRead(Z_MIN_ENDSTOP) == LOW) {  
    moverMotor(DIR_Z, STEP_Z, LOW, PASOS_VISIBLES);  
    Serial.println("↻ Movimiento Z izquierda hacia la luz");  
  }
```

```
  if (arr && !aba && digitalRead(Y_MAX_ENDSTOP) == LOW) {  
    moverMotorXY(true, PASOS_VISIBLES);  
    Serial.println("↻ Movimiento XY arriba hacia la luz");  
  } else if (aba && !arr && digitalRead(X_MIN_ENDSTOP) == LOW) {  
    moverMotorXY(false, PASOS_VISIBLES);  
    Serial.println("↻ Movimiento XY abajo hacia la luz");  
  }  
}
```

```
// --- MOTORES ---
```

```
void moverMotor(int pinDir, int pinStep, bool direccion, int pasos) {  
  digitalWrite(pinDir, direccion);  
  for (int i = 0; i < pasos; i++) {  
    digitalWrite(pinStep, HIGH);  
    delayMicroseconds(delay_microsegundos);  
    digitalWrite(pinStep, LOW);  
    delayMicroseconds(delay_microsegundos);  
  }  
}
```

```

void moverMotorXY(bool arriba, int pasos) {
  digitalWrite(DIR_X, arriba);
  digitalWrite(DIR_Y, arriba);
  for (int i = 0; i < pasos; i++) {
    digitalWrite(STEP_X, HIGH); digitalWrite(STEP_Y, HIGH);
    delayMicroseconds(delay_microsegundos);
    digitalWrite(STEP_X, LOW); digitalWrite(STEP_Y, LOW);
    delayMicroseconds(delay_microsegundos);
  }
}

```

```

// --- LÓGICA SENSOR SOLAR ---
void seguirSolConActuador(bool luzDetectada) {
  if (!luzDetectada && ultimaLecturaLuzSolar) {
    digitalWrite(ENABLE, LOW);
    digitalWrite(DIR_A, HIGH); // Inclinarse hacia el oeste (subir tabla)
    for (int i = 0; i < PASOS_ACTUADOR; i++) {
      digitalWrite(STEP_A, HIGH);
      delayMicroseconds(delay_microsegundos);
      digitalWrite(STEP_A, LOW);
      delayMicroseconds(delay_microsegundos);
    }
    digitalWrite(ENABLE, HIGH);
    Serial.println("☀ Seguimiento solar con actuador A hacia el sol");
  }
  ultimaLecturaLuzSolar = luzDetectada;
}

```

```

// --- HOMING NOCTURNO ---
void homingNocturno() {
  digitalWrite(ENABLE, LOW);
}

```

```

digitalWrite(DIR_X, LOW); digitalWrite(DIR_Y, LOW);
unsigned long inicio = millis();
while (digitalRead(X_MIN_ENDSTOP) == LOW && millis() - inicio <
TIMEOUT_HOMING_MS) {
    digitalWrite(STEP_X, HIGH); digitalWrite(STEP_Y, HIGH);
    delayMicroseconds(delay_microsegundos);
    digitalWrite(STEP_X, LOW); digitalWrite(STEP_Y, LOW);
    delayMicroseconds(delay_microsegundos);
}

digitalWrite(DIR_Z, LOW);
inicio = millis();
while (digitalRead(Z_MIN_ENDSTOP) == LOW && millis() - inicio <
TIMEOUT_HOMING_MS) {
    digitalWrite(STEP_Z, HIGH);
    delayMicroseconds(delay_microsegundos);
    digitalWrite(STEP_Z, LOW);
    delayMicroseconds(delay_microsegundos);
}

// Eje A vuelve a posición inicial simulada
digitalWrite(DIR_A, LOW);
for (int i = 0; i < PASOS_ACTUADOR; i++) {
    digitalWrite(STEP_A, HIGH);
    delayMicroseconds(delay_microsegundos);
    digitalWrite(STEP_A, LOW);
    delayMicroseconds(delay_microsegundos);
}

digitalWrite(ENABLE, HIGH);

```

```
Serial.println("✓ Retorno por anochecer completado.");
```

```
}
```

Anexo 3: Modelo 3D CAD del Prototipo Completo

Para complementar la información técnica de este informe, se pone a disposición el modelo tridimensional (3D CAD) del prototipo completamente ensamblado. El archivo puede ser descargado en el siguiente enlace:

[Modelo 3D Prototipo, códigos de prueba y final del Prototipo Publico](#)

El modelo incluye:

- Ensamblaje completo del prototipo.
- Detalle de la ubicación de cada componente (panel, motores, sensores, estructura, etc.).
- Permite visualizar el sistema desde distintas perspectivas, facilitando la comprensión de su funcionamiento y montaje.

Anexo 4: Listado de Materiales y Componentes

Componentes Electrónicos

- **Panel Solar Policristalino 20 W, 12 V**
Función: Captación de energía solar.
- **Arduino Uno R4 WiFi**
Función: Microcontrolador principal para procesamiento y control del sistema.
- **Shield CNC V3 para Arduino**
Función: Placa de expansión para controlar motores paso a paso.
- **Motores Paso a Paso NEMA 17 con husillo (x3)**
Función: Proveen movimiento lineal a los ejes X, Y y Z del sistema
- **Controladores de Motor DRV8825 (x3)**
Función: Drivers para motores paso a paso, permiten microstepping y protección.

- **Sensores de luz LDR (Light Dependent Resistor) (x4)**
Función: Detección de la intensidad luminosa para orientar el panel.
- **Sensores de fin de carrera (Endstop) (x4)**
Función: Determinan los límites de movimiento en cada eje.
- **Protoboard**
Función: Montaje provisional de circuitos electrónicos.
- **Cable 4 pines para motor (1 m) (x3)**
Función: Conexión de motores a controladores.
- **Fuente de alimentación: Batería de plomo-ácido sellada (VRLA) 12 V, 12 Ah**
Función: Suministro eléctrico autónomo para todo el sistema.
- **Controlador solar PWM 10 A**
Función: Regulación de carga entre el panel solar y la batería.

Componentes Mecánicos y Estructurales

- **Eje/Varilla lisa 8 mm × 500 mm (x6)**
Función: Soporte y guía de los movimientos lineales.
- **Soporte de guía eje lineal SK8 (x3)**
Función: Fijación de varillas a la base.
- **Rodamientos LM8UU 8 mm (x4)**
Función: Permiten el deslizamiento suave de las plataformas sobre las varillas.
- **Rodamiento 608zz (Pack de 4 unidades) (x1)**
Función: Permite giro libre y reduce fricción en partes móviles.
- **Base para tuerca trapezoidal T8 (x1)**
Función: Acoplamiento del husillo al sistema móvil.
- **Guías lineales SC8UU**
Función: Permiten el movimiento recto y estable del sistema (mencionadas en el texto).
- **Rodamiento KP08 8 mm**
Función: Mantiene alineación y permite rotación de husillos (mencionado en la construcción).

- **Husillos trapezoidales T8**

Función: Convierten el movimiento rotacional en desplazamiento lineal (integrados en motores).

- **Soportes metálicos en “L”**

Función: Fijación de motores a la base de madera.

- **Plataformas impresas en 3D (PLA)**

Función: Soporte para motores y varillas, diseño personalizado.

- **Plataformas de acrílico (x2)**

Función: Estructura y montaje del eje Z y soporte de panel solar.

- **Plancha de madera prensada 70 cm × 70 cm × 2 cm**

Función: Base estructural del prototipo.

- **Tornillos y fijaciones**

Función: Ensamblaje de todos los elementos mecánicos y electrónicos.

- **Capa de corcho**

Función: Amortiguación de vibraciones entre motores y estructura.

Materiales y Herramientas Adicionales

- **Placas de acrílico para soporte**

Función: Soporte adicional y rigidez en el montaje de componentes.

- **Cinta aislante**

Función: Aislamiento y protección de conexiones eléctricas.

- **Cables diversos**

Función: Conexión entre sensores, microcontrolador, motores y fuente de poder.

- **Herramientas manuales**

Cinta métrica, lápiz de carpintero, destornilladores, cortadores, etc.

Notas y Consideraciones

- Las plataformas impresas en 3D fueron diseñadas en Shapr3D y fabricadas en PLA.
- Se utilizaron piezas impresas para elevar y nivelar varillas y husillos.

- Las varillas de aluminio y perfiles también forman parte del sistema de soporte.
- Algunos componentes como guías lineales SC8UU, rodamiento KP08 y capa de corcho se mencionan en el texto aunque no figuren explícitamente en la tabla de costos, pero fueron parte integral del ensamblaje.