



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Automatización de un sistema
fotovoltaico que permita orientarse
según la posición del sol para la
formación y aprendizaje del
estudiante de la FI UNAM**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Eléctrico Electrónico

P R E S E N T A

Pablo Vivar Colina

DIRECTOR DE TESIS

Ing. Alberto Cortez Mondragón



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2025



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado AUTOMATIZACION DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO QUE PERMITA ORIENTARSE SEGUN LA POSICION DEL SOL PARA LA FORMACION Y APRENDIZAJE DEL ESTUDIANTE DE LA FI UNAM que presenté para obtener el título de INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

Pablo Vivar Colina

PABLO VIVAR COLINA
Número de cuenta: 310738134

A mi familia, la Facultad de Ingeniería y a la Universidad, por la formación que me han dado. Es gracias a ustedes que es posible el presente trabajo.

Agradecimientos

Me gustaría expresar mi gratitud al Laboratorio de Máquinas Eléctricas por brindarme la oportunidad de participar en su mejora tanto a través del servicio social como del desarrollo del presente trabajo.

Declaración de Autenticidad

Por la presente declaro que, salvo cuando se haga referencia específica al trabajo de otras personas, el contenido de esta tesis es original y no se ha presentado total o parcialmente para su consideración para cualquier otro título o grado en esta o cualquier otra Universidad. Esta tesis es resultado de mi propio trabajo y no incluye nada que sea el resultado de algún trabajo realizado en colaboración, salvo que se indique específicamente en el texto.

Pablo Vivar Colina. Ciudad Universitaria, CDMX, 2025

Resumen

En el siguiente documento se detalla el funcionamiento de un sistema didáctico que contempla varias partes, por un lado se encuentran tres paneles fotovoltaicos que pueden mantener una posición fija o de seguimiento activo de luz. Por otro lado está el heliodón automatizado, el cual puede simular la posición del sol en diferentes momentos del día y en varias estaciones del año. Todas las partes anteriores integradas pueden manejarse mediante una interfaz web.

Esto con la finalidad de poder hacer comparaciones del aprovechamiento de la energía solar cuando los paneles se encuentran fijos y en seguimiento activo de la luz.

Dentro del contenido siguiente se proporcionan detalles sobre el diseño del sistema, los algoritmos de control utilizados y la interfaz web, así como los resultados obtenidos durante las pruebas y la optimización del sistema.

Índice general

1	Introducción	1
1.1	Objetivo	3
1.2	Motivación	4
1.3	Planteamiento del problema	4
1.3.1	Hipótesis	5
1.3.2	Reto al diseñar un seguidor solar	6
1.4	Metodología	7
1.4.1	Construcción del prototipo	8
1.4.1.1	Diseño Mecánico	8
1.4.1.2	Diseño Electrónico y programación	9
1.5	Estructura de la tesis	10
2	Marco teórico	13
2.1	Energía	13
2.2	Sistemas CA y CD	14
2.2.1	Máquina de Corriente Directa	14
2.2.2	Máquinas de Corriente Alterna	15
2.3	Información relevante sobre nuestra estrella	16
2.3.1	Radiación Solar	16
2.3.2	Movimiento del Sol	16
2.3.3	Ventajas y desventajas sobre la energía fotovoltaica	18
2.4	Energía Solar	18
2.5	Efecto Fotoeléctrico	20
2.6	Automatización	21
2.6.1	Tipos de control	23
2.6.2	Motores a pasos	23
2.6.3	Microcontroladores	24
2.6.4	Arquitectura del ESP32 (Xtensa LX6)	24
2.6.5	Arquitectura en los procesadores	25
3	Estado del Arte	27
3.1	Silicio	27
3.1.1	Silicio amorfo	28
3.1.2	Silicio policristalino	30
3.1.3	Silicio monocristalino	31
3.1.4	Aplicaciones y oportunidades en tipos de silicio	32

3.2	Tipos de seguidores solares	34
3.2.1	Instalación de Paneles Estáticos	34
3.2.2	Seguidores Solares de Un Eje Activos	35
3.2.3	Seguidores Solares de Un Eje Pasivos	36
3.2.4	Seguidores Solares de Dos Ejes Activos	37
4	Diseño del experimento	39
4.1	Introducción	39
4.2	Componentes Involucrados	40
4.2.1	Panel Fotovoltaico	40
4.2.2	ESP8266EX	41
4.2.3	ESP32	42
4.3	Control	44
4.3.1	Algoritmo base para el seguimiento del sol	45
4.4	Diseño del sistema	47
4.5	Comunicación y Protocolos	50
4.6	Mecánica del sistema	52
4.6.1	Análisis estático del módulo del sol	53
4.6.2	Análisis dinámico del módulo del sol	54
4.6.3	Análisis de elemento finito	55
4.6.4	Análisis estático de módulos seguidores	55
4.7	Diseño Mecánico	56
4.8	Diseño Electrónico	57
4.9	Implementación Heliódón automatizado	59
4.10	Acción de Control	60
4.11	Programación	61
4.11.1	Estructura de los cuatro códigos.	63
4.11.2	Función para moteres a pasos	66
5	Análisis de Resultados	67
5.1	Introducción	67
5.2	Mediciones Paneles Fijos	67
5.3	Mediciones Paneles con Seguimiento Activo	70
5.4	Energía obtenida	74
6	Conclusiones	77
7	Documentación	79
7.1	Códigos	79
7.1.1	Microcontroladores	80
7.1.2	Cálculos código m	85
	Bibliografía	88

Índice de figuras

2.2	Ángulos y alturas del sol en el año <i>Energía solar fotovoltaica, 2007</i> . . .	17
2.3	Puntos cartográficos relevantes sobre la trayectoria solar	17
2.4	Silicio juntura de materiales N y P	20
2.5	Módulo conformado por celdas FV	21
2.7	Diagrama de bloques de un control proporcional genérico	23
4.1	Planos en isométrico y frontal del Sistema	49
4.2	Plano del Módulo Panel seguidor solar	49
4.3	Módulo Panel seguidor solar Físico	49
4.4	Electrónica para los paneles	50
4.5	Dispositivos involucrados en el sistema	50
4.7	Motores a pasos con amplificación de torque mediante reducción pla- netaria	56
4.8	Diagrama conexiones ESP-32	57
4.9	Diagrama controladores motores a pasos (A4988)	58
4.10	PCB Tarjeta Panel 1	58
4.11	Diagrama Esquemático Sensores	59
4.13	Diagrama de bloques de control proporcional para el ajuste del panel	60
4.14	Diagrama código «ESP8266 interfaz web»	62
4.15	Interfaz del sistema en HTML	65
4.16	«mueve1»	66
5.8	Energía Elevación 0	74
5.9	Energía Elevación 40	75
5.10	Energía Elevación 90	75
7.1	código m para gráficas	85
7.2	código m para conclusiones	86

Índice de cuadros

2.1	Etapas y tipos de radiación solar	16
2.2	Evaluación de Energía solar	19
4.1	Especificaciones del panel solar	41
4.3	Tareas de microcontroladores del sistema	63
5.1	Mediciones Paneles Fijo	76
5.2	Mediciones Paneles Automático	76
5.3	Resultados suma del sistema	76

Capítulo 1

Introducción

El sol produce una cantidad enorme de energía, alrededor de $1.1 \times 10^{20} [\frac{KW}{s}]$. Para tener una idea, con solo $1 [KWh]$ se puede encender un foco de $100 [W]$ durante 10 horas. La Tierra intercepta una cantidad pequeñísima de la energía solar, la atmósfera exterior absorbe la mitad de una billonésima parte, lo que equivale a unos 1.5 trillones de $[kWh]$ al año. No obstante, debido a la reflexión, la dispersión y la absorción de los gases atmosféricos, solo un 47% de esta energía, aproximadamente 0.7 trillones de $[kWh]$, llega a la superficie terrestre.

México está experimentando un crecimiento significativo en la adopción de paneles solares debido a su abundante recurso solar y a los incentivos gubernamentales para la energía renovable. Cuenta con una de las mejores ubicaciones para la energía solar en el mundo. La mayor parte del país recibe una gran cantidad de luz solar durante todo el año, que lo convierte en un lugar ideal para la generación de energía solar.

El gobierno mexicano ha implementado varios programas e incentivos para fomentar la adopción de energía solar. Uno de ellos es la implementación de contratos en dos vías¹ los cuales consisten en un conjunto de dispositivos cuya función es transformar la energía solar directamente en corriente eléctrica y el excedente es canalizada a la red eléctrica por medio de un medidor bidireccional, acondicionando esta última a los requerimientos de una aplicación determinada.

Existen regulaciones específicas que rigen la instalación y conexión de sistemas solares en México. Aunque los costos de los paneles solares han disminuido en los últimos

¹En generación y consumo de energía

años, la instalación inicial sigue siendo una inversión significativa para muchos hogares y empresas.

La situación actual en generación de energía fotovoltaica en nuestro país puede resumirse a continuación:

- **Norte de México:** Esta región, que incluye estados como Baja California, Sonora, Chihuahua, Nuevo León, y Coahuila, cuenta con altos niveles de radiación solar y grandes extensiones de terreno adecuado para la instalación de paneles solares.
- **Centro de México:** Estados como Zacatecas, Aguascalientes, San Luis Potosí, Querétaro y Guanajuato también son áreas donde la generación con celdas fotovoltaicas está en crecimiento, gracias a su clima soleado y a las políticas de apoyo a la energía solar.
- **Sureste de México:** Aunque la radiación solar en el sureste puede ser ligeramente menor que en el norte, estados como Yucatán, Quintana Roo y Campeche están adoptando cada vez más la energía solar, especialmente para aplicaciones comerciales y residenciales.
- **Zonas metropolitanas:** Las grandes ciudades de México, como Ciudad de México, Monterrey y Guadalajara, también están experimentando un aumento en la adopción de sistemas fotovoltaicos, tanto en edificios comerciales como residenciales. Anónimo, [2023](#)

El tema que se le dará más importancia en este trabajo es la implementación técnica de un sistema didáctico de seguidores solares con paneles solares. La importancia de este desarrollo radica en aumentar la eficiencia energética de una foto celda. Un sistema de seguimiento solar puede aumentar significativamente la cantidad de energía eléctrica generada por un panel solar.

Esto cobra relevancia en un momento en que la transición a fuentes de energía renovable y sostenible es cada vez más urgente. La energía solar es una fuente de energía limpia y renovable que puede ayudar a reducir la dependencia de combustibles fósiles y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. El siguiente proyecto puede ayudar a mejorar la eficiencia en el manejo de los paneles solares y hacer que

la energía solar sea más accesible y asequible para su uso en hogares, empresas y otras aplicaciones de energía eléctrica.

La energía fotovoltaica es cada vez de más fácil acceso. Sin embargo, la eficiencia de los paneles solares depende en gran medida de la cantidad de radiación solar que reciben durante el día, lo que a su vez está determinado por la posición del sol en el cielo. Por esta razón, se han desarrollado sistemas de seguimiento solar que permiten que los paneles solares se orienten hacia el sol de manera óptima en todo momento.

El tipo de corriente que se genera a través de un panel solar es del tipo continuo (CD)², para poder utilizar la energía eléctrica como se está normalmente habituado en una casa habitación, es necesario convertirla en tipo alterno (CA)³ mediante un circuito inversor. El presente trabajo de tesis tiene como objetivos diseñar y construir un sistema de seguimiento solar para paneles fotovoltaicos. Para ello, se partirá del estudio teórico de los fundamentos de la energía solar fotovoltaica y la electrónica de potencia, así como de la revisión de las distintas técnicas de seguimiento solar existentes.

Establecidas las bases teóricas, se procederá a la selección de los componentes necesarios y al diseño del sistema de seguimiento solar. A continuación, se realizará la implementación práctica del sistema y se llevarán a cabo distintas pruebas y análisis de desempeño para evaluar su funcionamiento. Finalmente, se presentarán las conclusiones y recomendaciones resultantes del proyecto. El sistema de seguimiento solar y el circuito inversor desarrollados en esta tesis pueden servir como herramientas pedagógicas sobre la energía solar fotovoltaica y la electrónica de potencia en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas.

1.1 Objetivo

Integrar de forma teórica práctica un sistema de seguimiento solar en conjunto con un heliodón para uso demostrativo y didáctico en Laboratorio de Máquinas Eléctricas dentro de Facultad de Ingeniería (UNAM).

²Corriente directa también puede verse como DC Direct Current en inglés

³Corriente alterna también puede verse como AC Alternating Current en inglés

La implementación tiene como fin involucrar a los alumnos en el desarrollo de proyectos de investigación, construcción y modernización de equipo utilizado dentro de la Facultad.

1.2 Motivación

En la situación de crisis climática que se presenta en el mundo actualmente, se cobra relevancia realizar investigación e implementación sobre sistemas de generación alternativos, como se presentan los generadores de energía eólica, las plantas hidroeléctricas, maremotriz y los sistemas de generación fotovoltaicos. Por lo que en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas están surgiendo en complemento con el material actualmente impartido la introducción de éste tipo de sistemas que se les denomina de generación renovable.

Dentro de las motivaciones principales se tienen como objetivo incrementar la eficiencia de los paneles solares, un seguidor solar permite aumentar la cantidad de radiación solar que recibida impactando directamente en su eficiencia. Incluir paneles fotovoltaicos en el suministro de energía permite reducir el costo de la misma ya que es una alternativa sostenible para la generación de electricidad sin utilizar un costo asociado por combustible. Además el interactuar con un sistema de esta clase puede incentivar el entusiasmo de los alumnos para proponer mejoras al sistema o la creación de nuevos y esto contribuye directamente a la investigación de conocimientos teóricos y prácticos en campos como la energía solar fotovoltaica y electrónica de potencia. La realización de este proyecto puede contribuir a la formación de profesionales capacitados en estas áreas, preparados para enfrentar los desafíos actuales y futuros en el campo de la energía eléctrica.

1.3 Planteamiento del problema

A diferencia de los métodos convencionales de generación de energía, como la producción a través de termoeléctricas, ciclos combinados o turbinas de gas, las alternativas de generación renovable, como la energía solar y eólica, presentan desafíos significativos. Uno de los principales problemas asociados con estas fuentes de energía renovable es su naturaleza intermitente y no siempre coincidente con la oferta y la demanda energética.

La intermitencia de las fuentes renovables se refiere a la variabilidad inherente en la cantidad de energía que pueden producir en un momento dado. Por ejemplo, la energía solar depende de la disponibilidad de luz solar, que varía a lo largo del día y está sujeta a condiciones climáticas como nubes o lluvia. De manera similar, la energía eólica depende de la velocidad y la consistencia del viento, que pueden fluctuar considerablemente.

1.3.1 Hipótesis

El realizar un sistema con paneles solares y heliodón automatizado puede generar nuevos intereses entre el alumnado de ingeniería, resultando en una experiencia práctica valiosa ya que conlleva un reto interdisciplinario, que junta el análisis de mecanismos, materiales, geometría, programación, control, electrónica de potencia, etc. Añadiendo que resulta un tema vigente en la generación de energía renovable, el sistema también es una plataforma flexible en la cual se pueden modificar varios aspectos como la elevación y ángulo de incidencia de la luz, en la que se pueden realizar mediciones y pruebas controladas para futuros experimentos.

La introducción de un sistema automatizado permitiría a los estudiantes interactuar directamente con el panel fotovoltaico, observar sus respuestas en tiempo real y favorecer en su comprensión factores como la intensidad de la luz solar y la orientación afectan la generación de energía. Podrían realizar experimentos y ajustes en el sistema para ver cómo afectan al rendimiento del panel, lo que refuerza los conceptos teóricos con la aplicación práctica.

La diferencia entre tener un sistema de paneles solares fijo a uno de seguimiento activo del sol debería radicar en la eficiencia del mismo, entre más luz solar se logre capturar más eficiente será el sistema. La automatización agrega un elemento de sofisticación al estudio de los paneles solares, lo que podría aumentar el interés y la motivación de los estudiantes. La capacidad de interactuar con un sistema dinámico y ver los resultados tangibles de sus acciones podría hacer que el aprendizaje sea más atractivo y memorable.

1.3.2 Reto al diseñar un seguidor solar

Diseñar e implementar un sistema mecatrónico conlleva una serie de desafíos que van más allá de la simple combinación de componentes mecánicos y electrónicos. La integración de estas dos disciplinas implica abordar decisiones de diseño que van desde la selección de materiales, componentes, sensores, técnicas de fabricación hasta la implementación de algoritmos que permitan el funcionamiento deseado del mecanismo.

Se deben seleccionar los materiales sólidos y mecánicos adecuados para soportar el peso de los paneles solares y los componentes del sistema de seguimiento, así como para resistir las condiciones climáticas y las vibraciones.

En este apartado se han seleccionado variedad de materiales y técnicas de fabricación, para la estructura en general se ha utilizado perfil estructural de aluminio, del tipo cuadrado, en 2 medidas: 3030 (cuadrado de $30 \times 30[mm]$) en mayor cantidad, para el arco, las mesas, estructura y demás y 2020 (cuadrado de $20 \times 20[mm]$) para soporte de los paneles solares en menor cantidad.

Se han utilizado técnicas de impresión 3D y corte láser para elementos y accesorios en particular como son, apoyos fijos de las mesas, límites de finales de carrera, monturas especiales, carcasas, engranajes finos, de gran tamaño y moldes especiales para sensores.

Se han utilizado tarjetas de circuito impreso que llamaremos en el documento PCB⁴ a la medida para implementación de sensores y microcontroladores con tareas específicas. Se debe tener la precisión adecuada y confiable para asegurar que los paneles solares estén siempre orientados hacia el sol de manera óptima. Esto implica la utilización de sensores y controladores adecuados para detectar la posición del sol y ajustar la orientación de los paneles solares.

El sistema de seguimiento solar consume energía para su funcionamiento, lo que puede reducir la eficiencia global del sistema fotovoltaico. Por lo tanto, se deben seleccionar componentes y técnicas de diseño que minimicen el consumo de energía. En este rubro se debe seleccionar un mecanismo de control, en específico se usarán microcontroladores. Las tarjetas ESP32 son conocidas por su versatilidad

⁴Printed Board Circuit en inglés

y eficiencia energética. Ofrecen un procesamiento potente y múltiples opciones de conectividad, incluyendo Wi-Fi y Bluetooth de bajo consumo. Esto las hace ideales para aplicaciones mecatrónicas que requieren comunicación inalámbrica con otros dispositivos o redes, mientras se mantiene un consumo de energía mínimo. Además, su capacidad para entrar en modos de bajo consumo energético cuando no están activamente transmitiendo datos ayuda a prolongar la vida útil de la batería en sistemas alimentados por energía limitada.

El prototipo consiste en un heliodón con un metro de radio, el cual alberga tres módulos seguidores solares equipados con paneles fotovoltaicos. Esto para de simular con precisión la posición relativa del sol en distintos momentos del día y estaciones del año. En el manejo y operación de los módulos se presentan funcionalidades, ya que ofrece la posibilidad de operar en diferentes modos. En primer lugar, el modo manual permite maniobrar los ejes de los paneles, brindando al usuario un control directo sobre la orientación de los mismos. Por otro lado, el modo automático se centra en el seguimiento solar, ajustando dinámicamente la orientación de los paneles de acuerdo con la posición actual del sol.

1.4 Metodología

Para la elaboración del sistema propuesto se tienen que revisar varios aspectos como los materiales y técnicas a utilizar y en esta sección se revisarán a detalle.

El sistema se compone de varios microcontroladores encargados de coordinar los movimientos de los tres paneles de la base y el carro del heliodón. El manejo del sistema se lleva a cabo mediante una interfaz web, lo que permite una gestión remota y accesible desde cualquier dispositivo con capacidades Wi-Fi. Esta funcionalidad Wi-Fi⁵. Por otro lado se busca implementar un sistema de control en lazo cerrado para el modo de seguimiento activo del sol, esto con el fin de monitorear y ajustar continuamente el rendimiento del sistema fotovoltaico.

Cada módulo seguidor solar se compone de un panel fotovoltaico montado sobre una estructura a medida, la cual será confeccionada mediante perfiles de aluminio

⁵Wi-Fi (Wireless Fidelity) tecnología relacionada a comunicación inalámbrica hacia internet o por punto de acceso local (LAN Local Access Network)

estructural y accesorios fabricados mediante manufactura aditiva (impresión 3D) en (PLA)⁶ además de (MDF)⁷ con corte láser, seleccionado por su versatilidad y bajo peso. Además cada uno estará equipado con sensores que detectan la ubicación del sol en total siendo cuatro fotosensibles que transmitirán la información a un microcontrolador encargado con la electrónica correspondiente de manejar los motores a pasos.

1.4.1 Construcción del prototipo

Con los componentes seleccionados, se inicia la construcción del prototipo, Implicando la conexión de los componentes eléctricos y electrónicos, la creación del diseño detallado en CAD⁸ para elementos como los perfiles de aluminio, los cuales se verificará su integridad estructural respecto a las fuerzas y pesos aplicados. La fabricación precisa de la estructura del seguidor solar. Además, se realiza la integración de los microcontroladores para garantizar su funcionalidad dentro del sistema.

1.4.1.1 Diseño Mecánico

Para el ensamblaje mecánico se ha decidido utilizar perfil estructural de aluminio por sus sistema de interconexión basado en sus anclajes laterales y núcleos con tornillería (M8)⁹, piezas a la medida por manufactura aditiva (impresión 3D) por su versatilidad en la capacidad de generar accesorios útiles en el anclaje de componentes específicos y por último piezas en corte Láser en MDF¹⁰ que permiten hacer componentes necesarios simples más rápido y a mejor costo.

En el proceso de integración primero se diseñó el prototipo utilizando un software de modelado 3D, para ello se utilizaran varias la plataformas, entre ellas Fusion 360, de Autodesk, la cual la UNAM otorga acceso gratuito y OnShape una plataforma en línea que simplifica la elaboración de ensambles. El diseño incluye todas las piezas necesarias para montar el panel solar y el sistema de seguimiento en el perfil estructural de aluminio, así como, cualquier soporte o refuerzo adicional que se requiera.

⁶Polímero de Ácido Láctico

⁷Medium Density Fiber en inglés es un compuesto con base de residuos de madera

⁸Computer Aided Design en inglés(Diseño Asistido por computadora)

⁹milimétrico 8

¹⁰Medium Density Fiber (madera)

Posteriormente se fabricaron las piezas impresas en 3D y corte láser.

Después se cortarán los perfiles de aluminio a la longitud adecuada utilizando una sierra de corte. Luego, se pueden ensamblarlos. Una vez que se tiene la estructura principal lista, se pueden ensamblar las piezas impresas en 3D. Los armados deben ser colocados en los lugares adecuados, asegurando que se ajusten correctamente y que el panel fotovoltaico quede sujeto. Todos estos procesos acompañados con conectores de aluminio o tornillos.

1.4.1.2 Diseño Electrónico y programación

En el sistema se utilizaron tarjetas ESP32 de 38 pines, a excepción que en el panel central además de usar esta tarjeta se utilizó una adicional ESP-8266 la cual es responsable de alojar el servicio web de la interfaz del sistema. La selección de estas tarjetas se hizo con la finalidad de poder implementar el protocolo de comunicación inalámbrica ESP-NOW, el cual resulta estable en la implementación de varios dispositivos en conjunto. Cada componente necesitaba utilizar uno o más motores a pasos además de sensores o botones, por lo cual se realizó una tarjeta impresa personalizada en circuit maker. Se diseñó con la intención de que un único diseño pudiera implementarse tanto en los mecanismos de los paneles como en el sistema del carro del heliodón.

Con el diseño del circuito listo, se procede a su fabricación. Esto se puede hacer utilizando un software especializado para generar los archivos de fabricación, y luego enviándolos a una empresa que tenga las capacidades para la fabricación de circuitos impresos, o se puede hacer manualmente utilizando materiales y herramientas de fabricación disponibles.

Implementar el sistema usando hardware que se propuesto presenta varios puntos. Uno de los principales desafíos es la gestión de comunicación y sincronización entre las tarjetas, dado que cada una debe trabajar en conjunto para simular el movimiento solar y optimizar la captación de energía en los paneles solares. Además, la programación de sensores y actuadores precisos para replicar el movimiento del sol requiere un conocimiento en los protocolos de comunicación y la gestión de interrupciones.

Las tarjetas seleccionadas ofrecen ventajas significativas, tanto en precio como en capacidades de conexión inalámbrica entre ellas y dispositivos móviles. Las ESP32, en particular, ofrecen un alto rendimiento con capacidad de procesamiento dual-core y una amplia variedad de interfaces, lo que las hace ideales para tareas concurrentes y complejas. Utilizar Visual Studio Code como IDE¹¹ proporciona una experiencia de desarrollo robusta y flexible, con soporte para depuración en tiempo real. En conjunto, las herramientas y componentes seleccionados brindan un soporte adecuado para su implementación exitosa.

1.5 Estructura de la tesis

El presente trabajo está dividido en siete capítulos, en el primer capítulo se desarrollará el marco teórico sustentante, en el segundo se dará un breve repaso sobre las tecnologías que se aplican actualmente en sistemas similares, en el tercero se darán detalles técnicos, en el quinto se revisarán los resultados obtenidos de las pruebas experimentales y finalmente en el sexto se darán las conclusiones.

1. **Introducción:** Se presenta el tema de la tesis y se justifica la importancia de la investigación para la Facultad de Ingeniería y como avance tecnológico, se da una breve descripción de los puntos a desarrollar en el trabajo y los objetivos del mismo
2. **Marco teórico:** Se presentan los conceptos teóricos relevantes para comprender el diseño implementación, integración y funcionamiento del sistema, servirán como base para que el interesado pueda recurrir en caso de tener una inquietud en el momento de revisar el capítulo del diseño del experimento
3. **Estado del arte:** Se da un breve repaso acerca de las tecnologías sobre seguimiento solar activo y pasivo, analizarán ventajas y desventajas, para que puedan ser contrastadas con el desarrollo del sistema propuesta
4. **Diseño del experimento:** Se presentan los detalles técnicos y físicos de la propuesta de sistema, incluyendo su descripción, los materiales utilizados
5. **Análisis de resultados:** Se presentan los resultados de hacer las pruebas de medición del sistema y su análisis detallado, se incluyen la eficiencia energética,

¹¹del inglés Entorno de Desarrollo Integrado

potencia de salida entre otros aspectos de relevancia del sistema

6. **Conclusiones:** Se deben presentar las conclusiones de la investigación y responder las preguntas planteadas en la introducción. También se deben destacar las limitaciones del estudio y las recomendaciones para futuras investigaciones
7. **Apéndice:** En esta parte de la tesis se incluirán diagramas, planos y material adicional que podrían resultar al lector demasiado extensos y que sirven sólo a aquellos interesados en profundizar más sobre el sistema

Capítulo 2

Marco teórico

La producción de electricidad es un tema muy importante porque la necesidad de energía está aumentando y los costos de los combustibles como el petróleo y el carbón también suben. Para satisfacer esta necesidad, se han creado varios tipos de sistemas que generan electricidad, tanto en corriente alterna (CA)¹ como en corriente directa (CD)². Además, el uso de la energía solar ha convertido en una opción viable y sostenible para producir electricidad. La automatización en los sistemas de generación es algo que está creciendo, ya que permite vigilar y controlar el funcionamiento en tiempo real, lo que mejora la eficiencia y la confiabilidad del sistema. En este contexto teórico, se hablará brevemente sobre la generación de energía, enfocándose en las características y usos de cada sistema. También se describirán las tecnologías principales utilizadas en la generación solar y cómo se conectan a la red eléctrica. Por otro lado, se analizará el rol de la automatización en la producción de electricidad y cómo se aplica en la industria.

2.1 Energía

«La energía puede utilizarse, pero no consumirse. Es una ley de la naturaleza que la energía se conserva. En lugar de consumirla, degradamos o aleatorizamos la energía, al igual que degradamos los recursos minerales cuando los transformamos en metal y luego desechamos el producto final como hacemos, por ejemplo, con las latas de

¹Corriente Alterna: Tipo de corriente eléctrica en la que la dirección del flujo de electrones varía periódicamente. Es la forma de electricidad predominante en las redes de distribución de energía eléctrica, caracterizada por su capacidad para transmitir energía eficientemente a largas distancias.

²Corriente Directa: Flujo constante de corriente eléctrica en una sola dirección. Aunque menos común en aplicaciones de red eléctrica, la corriente directa es esencial en dispositivos electrónicos y baterías, donde proporciona una fuente estable y continua de energía

aluminio usadas. Toda la energía que utilizamos se degrada en calor y finalmente se irradia al espacio.»da Rosa Aldo V., 2005

2.2 Sistemas CA y CD

En todo el mundo, las industrias de energía están cambiando su estructura con el objetivo de ofrecer mejores servicios a un costo menor. Esto se logra mediante la introducción de la competencia en el sector eléctrico.«La reestructuración ha iniciado tareas adicionales de optimización y control en los sistemas eléctricos desagregados. que requieren un procesamiento paralelo y distribuido para analizar el funcionamiento económico y mejorar la fiabilidad del sistema económico y mejorar la fiabilidad del sistema.»Shahidehpour y Wang, 2003.

Según el Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional³ tenemos una capacidad instalada de 6515[MW] representando el 23% de la generación con energías limpias y tan sólo el 7.4% de la generación total del país total sugiere un gran potencial de crecimiento y oportunidades para expandir aún más la adopción de energía solar.Secretaría de Energía (México), 2023

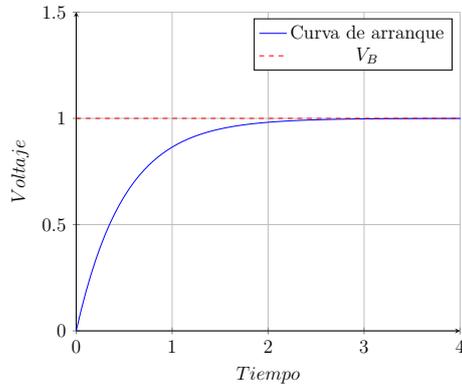
2.2.1 Máquina de Corriente Directa

Desde la importancia fundamental de la energía eléctrica en nuestra sociedad, se abordará a continuación el funcionamiento en los sistemas de corrientes eléctrica. Las máquinas de corriente directa, también conocidas como motores lineales, son una manifestación directa de cómo la electricidad puede ser transformada en movimiento lineal de manera eficiente y precisa. Su funcionamiento se basa en los principios electromagnéticos, donde la interacción entre campos magnéticos y corrientes eléctricas genera fuerzas que impulsan el movimiento lineal del dispositivo.

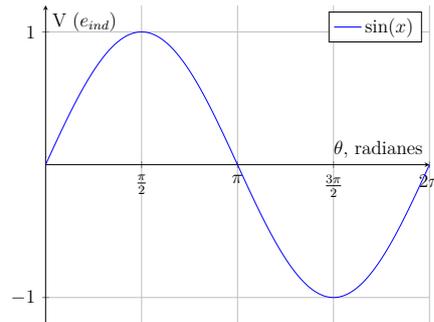
«La máquina lineal de corriente directa es la versión más sencilla y fácil de entender de una máquina de CD, ya que opera con los mismos principios y presenta la misma conducta que los generadores y los motores reales. Por ello sirve como un buen punto de partida en el estudio de las máquinas.»Chapman, 2012

³PRODESEN

Se puede apreciar en 2.1a el voltaje que se le debe aplicar a una máquina en CD para que arranque y mantenga una velocidad de giro estable.



(a) Curva encendido de máquina CD

(b) Gráfica de e_{ind} y θ .

Un generador real se comporta de esta forma: al aplicar un par al eje en la dirección del movimiento, la velocidad del eje se incrementa, el voltaje interno aumenta y fluye corriente desde el generador hacia la carga. La cantidad de potencia mecánica convertida en potencia eléctrica en el generador rotatorio real está dada por la ecuación:2.1

$$P_{conv} = \tau_{ind}\omega \quad (2.1)$$

Donde P_{conv} es la potencia mecánica convertida, el par inducido τ_{ind} es el análogo rotacional de la fuerza inducida, y la velocidad angular ω es el análogo rotacional de la velocidad lineal.

2.2.2 Máquinas de Corriente Alterna

Existen dos categorías principales de máquinas de corriente alterna: las síncronas y de inducción, también conocidas como asíncronas. Las máquinas síncronas, tanto motores como generadores, obtienen su corriente de campo magnético de una fuente de potencia en corriente alterna externa. Por otro lado, las máquinas de inducción, también motores y generadores, reciben su corriente de campo magnético a través de la inducción magnética, es decir, mediante la acción transformadora en sus devanados de campo. El tipo de voltaje aplicado a las terminales de este tipo de máquinas

está representado en [2.1b](#).

2.3 Información relevante sobre nuestra estrella

El sistema propuesto aunque puede ser implementado para la captación de la energía solar, su propósito principal es la de establecer una plataforma de estudio y pruebas. Por lo que su principal objetivo es la de hacer un seguimiento activo del heliodón. Para poder comprender el aprovechamiento de la energía solar, es relevante conocer ciertos aspectos que influyen en éste tipo de conversión de energía, en ésta sección del documento se profundizarán los más relevantes.

2.3.1 Radiación Solar

«El sol es una estrella que se encuentra a una temperatura media de $5500[^\circ C]$, en cuyo interior tienen lugar una serie de reacciones que producen una pérdida de masa que se transforma en energía, proceso que también llamamos como radiación solar.» [Jutglar Banyeras, 2013](#) Estas reacciones consisten principalmente en la conversión de hidrógeno en helio, durante las cuales se produce una pérdida de masa que se transforma en energía según la famosa ecuación de Einstein, $E = mc^2$. Este proceso libera una enorme cantidad de energía en forma de radiación solar.

Cuadro 2.1: Etapas y tipos de radiación solar

Directa	Es la recibida desde el sol sin que desvíe su paso por la atmósfera
Difusa	Experimenta cambios en dirección por reflexión y difusión atmosférica.
Albedo	Es la radiación que se recibe por reflexión en el suelo u otras superficies.

2.3.2 Movimiento del Sol

El sol dibuja trayectorias diferentes según la estación del año, en invierno sube un poco y en verano mucho, lo que hace que las sombras sean diferentes en unas estaciones y en otras. Para conocer el movimiento del sol se utilizará un sistema de coordenadas con dos ángulos, que permite saber en cada momento donde se encuen-

tra.

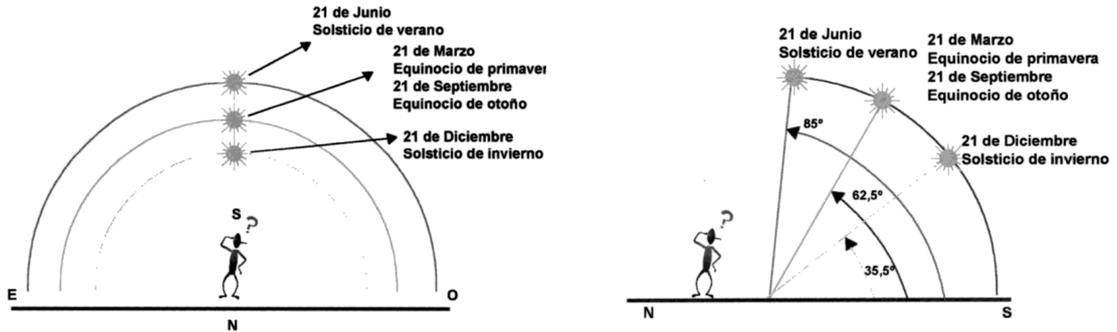
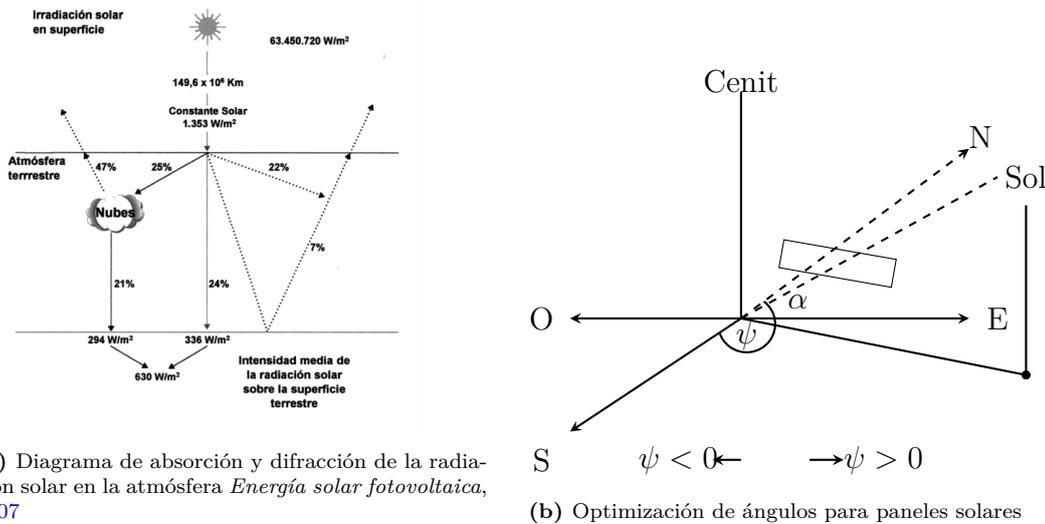


Figura 2.2 Ángulos y alturas del sol en el año *Energía solar fotovoltaica, 2007*



(a) Diagrama de absorción y difracción de la radiación solar en la atmósfera *Energía solar fotovoltaica, 2007*

(b) Optimización de ángulos para paneles solares

Figura 2.3 Puntos cartográficos relevantes sobre la trayectoria solar

La figura 2.3b presenta una representación geométrica para la optimización de ángulos en paneles solares. Aquí se muestra un sistema de coordenadas que incluye los puntos cardinales Este, Oeste, Norte y Sur.

El Sol está representado en el ángulo superior derecho de la figura. Dos ángulos importantes están marcados: Ψ y α . El ángulo Ψ indica la desviación del panel solar respecto a una línea horizontal, y puede ser positivo o negativo, dependiendo de su orientación respecto al Sol. Los valores $\Psi < 0$ y $\Psi > 0$ están señalados en diferentes regiones para mostrar esta variación.

Un rectángulo rotado representando un panel solar muestra su orientación y la necesidad de ajustar su ángulo para optimizar la captación de la luz solar. Las flechas adicionales que salen del rectángulo y del punto en el origen indican los ajustes en las posiciones que los paneles solares deben hacer para seguir la trayectoria del Sol.

En el centro de la figura 2.3b, también se dibuja un arco que visualiza el movimiento del ángulo α , que es crucial para mantener el panel perpendicular a los rayos solares. La flecha que apunta al «Cenit» en la parte superior de la figura muestra la orientación vertical máxima posible.

Para referencia del sistema a desarrollar es importante tomar en cuenta puntos de la trayectoria del sol y se darán algunas definiciones, en la figura 2.3b, aparece la Palabra Cenit, esta hace referencia a la posición vertical del sol en su punto más alto en el día, esta variará dependiendo de la zona geográfica y la estación del año, trayectoria solar, es aquel eje dirigido que sigue el sol desde el amanecer hasta el anochecer, y para efectos de este documento definiremos como ángulo cenital con la letra Ψ y es aquella desviación de la trayectoria solar respecto a una referencia, por último α está relacionada con la elevación del sol, tomando en cuenta un sistema de coordenadas polares. El concepto de elevación en otros documentos puede referirse a simplemente la posición del sol que tiene el sol en el firmamento respecto al horizonte, para este documento, se refiere a la elevación a un ángulo, que toma el heliodón respecto a la vertical para modificar su trayectoria.

2.3.3 Ventajas y desventajas sobre la energía fotovoltaica

Como toda fuente de energía tienen que considerarse diversos factores que pueden verse involucrados en el momento de seleccionarse, como disponibilidad, capacidad, entre otros.

2.4 Energía Solar

La energía solar es una fuente energética abundante y ampliamente disponible en todo el mundo, permitiendo que las granjas solares sean implementadas en una variedad de entornos geográficos y climáticos. En los últimos años, el costo de los paneles

Cuadro 2.2: Evaluación de Energía solar

Ventajas	<p>Escaso impacto ambiental.</p> <p>No produce residuos perjudiciales para el medio ambiente.</p> <p>Distribuida por todo el mundo.</p> <p>No tiene más costos tras instalación, solo mantenimiento sencillo.</p> <p>No hay dependencia de las compañías suministradoras.</p>
Desventajas	<p>Se precisan baterías con agentes químicos peligrosos.</p> <p>Puede afectar a los ecosistemas por la extensión ocupada por los paneles en caso de grandes instalaciones.</p> <p>Impacto visual negativo sin cuidar integración de módulos solares.</p>

solares ha disminuido significativamente, lo que ha facilitado su implementación en términos de costo frente a otras fuentes de energía convencionales. «La fuente de energía renovable más abundante en nuestro planeta es, con diferencia, la radiación solar. 170.000[TW] caen sobre la Tierra. Aprovechar esta energía es difícil debido a su naturaleza diluida y errática.»da Rosa Aldo V., 2005

«Hasta el siglo XVIII, el uso de la energía solar se centraba principalmente en la calefacción e iluminación. En el siglo XIX, se marcó un hito cuando europeos empezaron a construir invernaderos con sistemas de calefacción solar. A finales de ese siglo, científicos franceses lograron un avance significativo al hacer funcionar una máquina de vapor mediante un colector solar, la cual fue implementada en una imprenta parisina en 1882.»Khaligh y Onar, 2010.

«John Ericsson, un inventivo sueco-estadounidense, desarrolló un motor de aire caliente altamente eficiente que operaba con energía solar. Estos motores revolucionarios encontraron aplicación en barcos. El Dr. Charles Greely, reconocido como el padre de la energía solar moderna, inventó la primera caldera solar. Posteriormente, en 1883, Charles Fritts ideó las primeras células solares, utilizando selenio y alcanzando eficiencias aproximadamente de 1%. El verdadero avance llegó en 1954 con las células solares de silicio, desarrolladas por los investigadores Calvin Fuller, Daryl Chapin y Gerald Pearson, construyendo sobre el trabajo pionero de Russel Ohl en la década de 1940.»Khaligh y Onar, 2010.

Las granjas solares fotovoltaicas juegan un papel fundamental en la generación de energía en la actualidad debido a su capacidad para aprovechar una fuente de energía limpia, abundante y renovable: la luz solar. Estas instalaciones consisten en grandes

áreas cubiertas por paneles solares fotovoltaicos, que convierten la luz solar directamente en electricidad mediante el efecto fotoeléctrico. «La energía solar fotovoltaica (FV) es una tecnología muy modular que puede fabricarse en grandes plantas, lo que genera economías de escala, pero también puede desplegarse en cantidades muy pequeñas cada vez. Esto permite una amplia gama de aplicaciones, desde pequeños sistemas residenciales en tejados hasta instalaciones de generación de energía a gran escala.»IEA, 2023

2.5 Efecto Fotoeléctrico

Una celda fotovoltaica (FV)⁴ convierte la luz solar en electricidad, lo que es conocido como el proceso físico del **efecto fotoeléctrico**. La luz que incide sobre una celda FV puede ser reflejada, absorbida o atravesada; sin embargo, solo la luz que es absorbida genera electricidad. Ésta se transfiere a electrones en los átomos de la celda FV. Con su nueva energía, estos electrones escapan de sus posiciones normales en los átomos del material semiconductor de la celda FV y se convierten en corriente dentro de un circuito eléctrico. Una propiedad eléctrica especial de la celda FV, llamada campo eléctrico incorporado, proporciona la fuerza o voltaje necesario para impulsar la corriente a través de una carga externa, como una bombilla.

Para inducir el campo eléctrico incorporado dentro de una celda FV, se colocan dos capas de diferentes materiales semiconductores en contacto entre sí. Una capa es un semiconductor tipo **n** con una abundancia de electrones, que tienen una carga eléctrica negativa. La otra capa es un semiconductor tipo **p** con una abundancia de huecos, que tienen una carga eléctrica positiva.

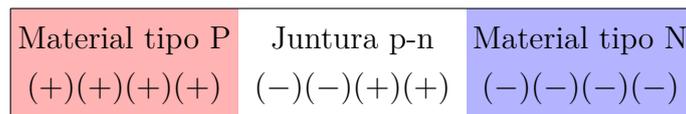


Figura 2.4 Silicio juntura de materiales N y P

Aunque ambos materiales son eléctricamente neutros, el silicio de tipo **n** tiene electrones en exceso y el de tipo **p** tiene huecos en exceso. Al unirlos se crea una unión p/n en su interfaz, generando así un campo eléctrico. La Figura 2.4 muestra una

⁴(PV) Photo Voltaic en inglés

unión p-n de una celda FV. Cuando el silicio de tipo **n** y el de tipo **p** entran en contacto, los electrones en exceso se mueven del lado de tipo **n** al lado de tipo **p**. El resultado es la acumulación de carga positiva a lo largo del lado de tipo **n** en la interfaz y carga negativa a lo largo del lado de tipo **p**.

Una celda PV o célula solar es el componente básico de un sistema PV (o solar eléctrico). Una celda PV individual suele ser bastante pequeña, produciendo típicamente alrededor de 1 o 2 [W] de potencia .

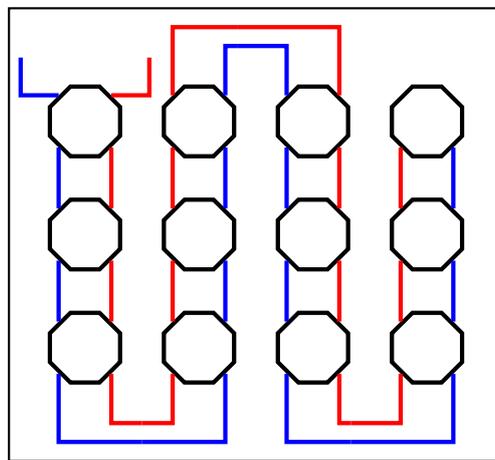
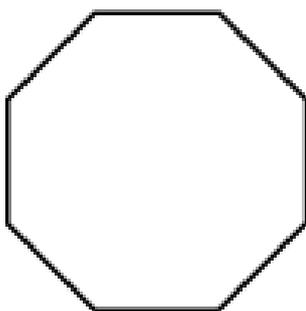
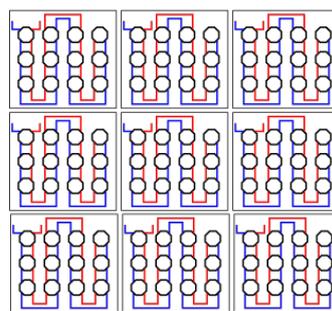


Figura 2.5 Módulo conformado por celdas FV



(a) Componente de reflexión ambiental.



(b) Componente de reflexión especular.

2.6 Automatización

Se le llama automatización a la implementación sistemática de cualquier proceso, esto puede darse en varios ámbitos, dentro de un hogar, en un entorno agrícola o en una fábrica.

La automatización ha permitido realizar tareas complejas, elaboradas y repetitivas con relativa facilidad a que si se realizaran manualmente, los primeros ejemplos de esto son los telares, cuales permitieron el proceso en la elaboración textiles dentro de una fracción del tiempo a que si se realizaran manualmente, lo que permitió obtener productos terminados de igual o mejor calidad, lo que pudo reflejar un crecimiento económico para toda la cadena de producción, desde el fabricante que logró aumentar su producto, el comerciante que se beneficia en este aumento de la producción y el usuario final que obtiene el mismo producto por un costo menor.

Como este caso existen en la historia humana muchos ejemplos más donde se puede analizar las partes de un proceso que primero surgió de manera artesanal y se facilitó gracias al uso de herramientas o mecanismos que simplificaron las tareas. Esto provoca beneficios para casi todas las partes así que es de interés en la actualidad el implementar sistemas que automaticen procesos mejorando la eficiencia de los mismos.

Un controlador tiene como tarea la de mantener la variable controlada en correspondencia muy próxima con la señal de referencia, eliminando la influencia de las perturbaciones que tienden a cambiar el valor de la variable controlada, la acción de control de un controlador se define como la relación entre el error en la señal de salida ($e(t)$) y la señal actualmente ($m(t)$).

$$F(s) = \frac{M(s)}{E(s)} \quad \text{o en dominio del tiempo } f(t) = \frac{m(t)}{e(t)} \quad (2.2)$$

El concepto expresado por 2.2 representa la función de transferencia para un sistema dinámico. Ésta describe la relación entre la salida y entrada del sistema en cuestión. Ésta función de transferencia es fundamental para modelar y entender cómo un sistema responde a las variaciones en su entrada a lo largo del tiempo o en el dominio de Laplace. Proporciona una herramienta poderosa para el análisis y diseño de sistemas de control, permitiendo predecir y ajustar el comportamiento del sistema en función de sus parámetros característicos como ganancia, tiempo de respuesta y estabilidad.

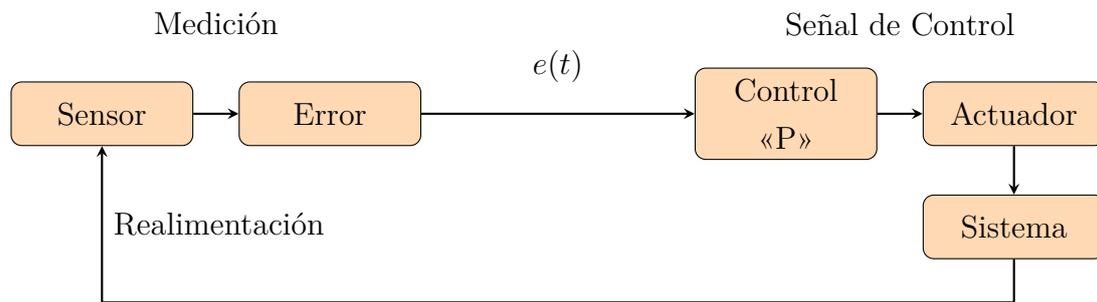


Figura 2.7 Diagrama de bloques de un control proporcional genérico

2.6.1 Tipos de control

Existen múltiples formas de acción de control, cuyo tipo depende de la forma de obtención de la ley de control. Sin embargo, existen unos tipos básicos de acción de control que se usan comúnmente en procesos industriales y que son: por acción discontinua (ON-OFF) o de dos posiciones, la proporcional **P**, derivativa **D** e integral **I**. En la práctica los controles integral y derivativo no se pueden usar solos, por lo tanto, estos se suelen usar en combinación con otras, y se obtienen las siguientes acciones de control posibles: **PI**, **PD** o **PID**. Dulhoste, 2013

2.6.2 Motores a pasos

Los motores a pasos aunque no se revisaron en las secciones de energía tienen un mejor lugar en la sección de automatización ya que pueden ser controlados con gran precisión a través de un microcontrolador.

Los motores a pasos son motores de corriente directa que pueden moverse en pasos cuantizados (discretos). Tienen múltiples embobinados organizados en grupos o fases, polarizando cada una de ellas en una secuencia, el motor podrá girar un paso a la vez.

Se puede inyectar en sus fases una secuencia controlada de impulsos para lograr un posicionamiento preciso y/o un control de velocidad. Es por eso que son ampliamente utilizados para aplicaciones de control. Para los motores NEMA 17 que fueron empleados se tiene una precisión de 1.8° de rotación por paso, se necesitan un total de 200 pasos o impulsos para que el motor logre una rotación completa.

Estos motores no tienen retroalimentación, por lo que para lograr un lazo cerrado de control es necesario tener algún tipo de variable para lograr una acción de control, es importante mencionar que su principal fortaleza son los movimientos a baja velocidad ya que tienen su mayor valor de torque en las mismas a diferencia de los motores DC convencionales. Existen varios arreglos en el emboninado de un motor a pasos, en particular se distinguen 2 tipos: los unipolares y bipolares, la principal diferencia entre ellos es que el unipolar mantiene una sola polaridad en sus fases lo que limita la diferencia de potencial aplicada en el mismo y lo hace menos eficiente, mientras que el bipolar como pueden sus bobinas alojar corriente en ambas direcciones puede tener tensiones mayores es por eso que se puede obtener más torque del rotor, los motores seleccionados son bipolares.

2.6.3 Microcontroladores

Un microcontrolador es un circuito integrado que contiene todos los componentes de una computadora. Se emplea para controlar el funcionamiento de una tarea determinada y, debido a su reducido tamaño, suele ir incorporado en el propio dispositivo al que gobierna. Esta última característica es la que le confiere la denominación de «controlador incrustado» (embedded controller). Se dice que es *la solución en un chip* porque su reducido tamaño minimiza el número de componentes y el costo.

El microcontrolador es una computadora de propósito específico. En su memoria sólo reside un programa destinado a gobernar una aplicación determinada; sus vías de entrada/salida soportan la conexión de sensores y actuadores del dispositivo a controlar. Una vez programado y configurado el microcontrolador solamente sirve para gobernar la tarea asignada.

2.6.4 Arquitectura del ESP32 (Xtensa LX6)

El ESP32 está basado en el procesador Xtensa LX6, el cual es una arquitectura RISC de 32 bits con diseño Harvard, lo que permite un alto rendimiento en aplicaciones embebidas. La separación de memoria de instrucciones y datos facilita el procesamiento paralelo, mientras que su conjunto reducido de instrucciones optimiza la ejecución.

Por este motivo es de utilidad repasar los aspectos básicos de la arquitectura Harvard ya que es la arquitectura dominante en el mundo de la computación actualmente, las arquitecturas de sistemas incrustados, computadores de escritorio o servidores comparten los mismos elementos básicos, los diferentes nombres de arquitecturas que existen sirven a los fabricantes diferenciarse de la competencia destacando los aspectos que ellos consideran más relevantes para vender su producto, en particular de los microcontroladores, puede ser su capacidad de palabra en los ADC o DAC⁵, capacidades de memoria, bajo consumo de energía, conectividad inalámbrica entre otros.

2.6.5 Arquitectura en los procesadores

Aunque inicialmente todos los microcontroladores adoptaron la arquitectura clásica de Von Neumann, en el momento presente se impone la arquitectura Harvard. La arquitectura de Von Neumann se caracteriza por disponer de una sola memoria principal donde se almacenan datos e instrucciones de forma indistinta. A dicha memoria se accede a través de un sistema de buses único (direcciones, datos y control).

La arquitectura Harvard dispone de dos memorias independientes una, que contiene sólo instrucciones y otra, sólo datos. Ambas disponen de sus respectivos sistemas de buses de acceso y es posible realizar operaciones de acceso (lectura o escritura) simultáneamente en ambas memorias.

La arquitectura de los dispositivos de Espressif es la Tensilica Xtensa LX de Cadence, cuya plataforma ofrece la mayor versatilidad activando la configuración de elementos predefinidos en un procesador y extendiéndose creando unidades de ejecución instrucciones y hardware completamente nuevo, así como registros de memoria a la medida con rutas de entrada y de salida, la empresa asegura un rendimiento del 50% respecto a sus procesadores anteriores.

⁵Convertidores analógico digitales o viceversa

Capítulo 3

Estado del Arte

En los últimos años, la energía solar ha surgido como una de las fuentes renovables más prometedoras, impulsada por los avances tecnológicos en el diseño y la eficiencia de los paneles solares. Este estado del arte se centra en los desarrollos recientes en tecnología fotovoltaica, destacando los principales tipos de paneles solares, así como las innovaciones en materiales y técnicas de fabricación. A través de una revisión sobre la literatura, este apartado busca proporcionar un panorama de las tendencias emergentes y los desafíos persistentes en el campo de la energía solar, estableciendo así una base sólida para el desarrollo de investigaciones futuras y aplicaciones prácticas.

3.1 Silicio

El uso del silicio se ha extendido ampliamente desde la aparición de los materiales semiconductores, desde que William Shockley logró materializar el transistor con unión bipolar de juntura ha sentado las bases de una gran revolución tecnológica haciendo que este dispositivo haya sido la más grande invención del siglo XX, en el marco teórico se ha abordado sobre los aspectos técnicos de la unión bipolar de juntura que es fundamental para comprender su funcionamiento, otro de los grandes avances teóricos y tecnológicos fue el descubrimiento del efecto fotoeléctrico, descubierto por Albert Einstein. Estos dos grandes aportaciones a la tecnología humana han dado lugar a la aparición de los paneles fotovoltaicos.

En el recorrido de la sección se profundizará sobre los tipos de silicios que existen

en la industria respecto a la producción de celdas fotovoltaicas, también se darán unas breves recomendaciones en cuanto su uso y aplicaciones para que el lector (si está interesado en alguna instalación o aplicación relacionada) pueda elegir el tipo de tecnología que mejor se ajuste a sus necesidades.

Se ha comprendido que la aplicación de tecnologías en forma de películas delgadas para cultivar células solares y módulos basados en otros materiales puede resolver algunos de los problemas en las tecnologías sobre obleas de silicio. La deposición de películas delgadas con materiales de la calidad necesaria y propiedades adecuadas depende de los procesos utilizados y del control de varios parámetros. Una vez que estos métodos están optimizados, se vuelven mucho más económicos en sobre el costo de procesamiento en comparación con las tecnologías convencionales. También ofrecen tiempos para recuperación de energía más cortos, lo que significa en un tiempo requerido para generar suficiente energía para compensar la misma que se ha invertido.

3.1.1 Silicio amorfo

Este tipo de material no tiene una estructura cristalina ordenada, sino que sus átomos están dispuestos de manera más desordenada. Esto hace que el silicio amorfo sea más flexible y fácil de producir en grandes cantidades. Aunque los paneles solares de silicio amorfo pueden tener una eficiencia ligeramente menor que los de otros tipos de silicio, son más económicos de fabricar y pueden adaptarse a una variedad de aplicaciones, como paneles solares integrados en edificios y dispositivos portátiles. Son una opción versátil y rentable para aprovechar la energía solar y reducir nuestra dependencia de los combustibles fósiles.

El término amorfo hace referencia a la ausencia de estructura celular geométrica. Los módulos amorfos no tienen el patrón ordenado característico de los cristales, como en el caso del silicio cristalino. Los módulos comerciales suelen tener eficiencias de conversión del 5 al 10%. La mayoría de los productos tienen una garantía de 10 años, según el fabricante.

«Esta tecnología aún no ha logrado una aceptación generalizada para aplicaciones de mayor potencia, debido en gran parte a su menor vida útil por la acelerada degradación de las células a la luz del sol. Sin embargo, la fotovoltaica amorfa ha encontrado

un amplio atractivo para su uso en dispositivos de consumo. Para algunos sistemas conectados a la red o de bombeo de agua, tiene la ventaja de que los módulos de mayor voltaje pueden fabricarse más baratos que sus homólogos cristalinos. Otro factor que limita la eficiencia es la presencia de trampas en el material. Las trampas son impurezas del material semiconductor en la región de agotamiento y pueden aumentar en gran medida la recombinación de electrones y huecos. La recombinación reduce la V_{OC} reduciendo a su vez el factor de llenado y la eficiencia.» Foster et al., 2010.

«En las Células Solares Híbridas, se han combinado células de silicio amorfo con uniones de silicio nanocristalino y células de otros materiales, por ejemplo, uniones con CIGS. Otro desarrollo significativo en el diseño es la formación de una estructura de interfaz gruesa/fina (heteroestructura) entre una capa de a-Si:H y una oblea de silicio cristalino amorfo, conocida como células HIT (heterounión con capa intrínseca delgada) desarrollada recientemente por Sanyo, Japón. Se ha informado de una eficiencia cercana al 21% sobre un área de celda de $101[cm^2]$. Esta tecnología utiliza una oblea de silicio Cz de tipo n como base (absorbedor de luz) y procesos a baja temperatura, con la estructura del dispositivo siendo: a-Si(pC)/a-Si(i)/c-Si(n)/a-Si(i)/ a-Si(nC). La capa intrínseca de a-Si es importante porque contacta con c-Si en ambos extremos y proporciona pasivación y estabilidad adicional al sistema. Según informes de Sanyo, las celdas han mostrado una excelente estabilidad. La producción en una planta piloto de Sanyo ya está en marcha. » Kreith y Goswami, 2007

«El costo de las plantas de producción puede ser un elemento crítico en qué tan rápidamente una tecnología puede expandirse para satisfacer las demandas del mercado. Para la fabricación de módulos de placa plana de silicio cristalino, silicio amorfo o películas delgadas de policristalino, los costos publicados oscilan entre 150 y 300 millones para una capacidad de producción de $100[MW]$ por año. Una instalación de producción de $100 MW/año$ para sistemas eólicos puede costar entre 10 y 15 millones. La fabricación de turbinas eólicas o sistemas CPV se asemeja a la producción en cadena de automóviles, incluida la dependencia de proveedores y la sensibilidad a los precios del acero (McConnell 2002). » Kreith y Goswami, 2007

3.1.2 Silicio policristalino

El silicio policristalino es otro tipo de material que se utiliza en la fabricación de paneles solares. A diferencia del silicio monocristalino, el silicio policristalino está hecho de muchos pequeños cristales de silicio en lugar de un solo cristal grande. Esto hace que el proceso de fabricación sea más rápido y económico, lo que a su vez reduce el costo de los paneles solares. Aunque los paneles solares de silicio policristalino pueden ser ligeramente menos eficientes que los de silicio monocristalino, siguen siendo una opción popular debido a su buen rendimiento y menor precio. Son una forma rentable de aprovechar la energía solar para generar electricidad limpia y renovable.

Estas células se componen de varios cristales de silicio formados a partir de un lingote. También se cortan en rodajas y luego se dopan y graban. Presentan eficiencias de conversión ligeramente inferiores a las de las células monocristalinas, generalmente del 13% al 15%. Los fabricantes fiables suelen garantizar los módulos fotovoltaicos policristalinos durante 20 años.

«Las tecnologías fotovoltaicas comerciales actuales se basan en silicio cristalino con obleas (c-Si) y películas delgadas. Las tecnologías de silicio cristalino, ya sea monocristalino (sc-Si) o policristalino (mc-Si), dominan actualmente el mercado con un 85% de participación. Las células se cortan de lingotes o coladas, o se fabrican a partir de cintas crecidas de silicio altamente purificado. Se crea una posible unión, se deposita un revestimiento antirreflectante y se añaden contactos metálicos. Luego, las células se agrupan en módulos con un vidrio transparente en la parte frontal, un material resistente a la intemperie (generalmente un polímero delgado) en la parte posterior y, a menudo, un marco alrededor. La parte posterior también puede ser de vidrio para permitir el paso de la luz.

»Normalmente, se garantiza que los módulos tengan una vida útil de 25 a 30 años con al menos el 80% de la potencia nominal. Las células sc-Si muestran eficiencias, la relación de la salida eléctrica sobre la energía solar entrante, del 14% al 22%, mc-Si del 12% al 19%. Estos niveles de eficiencia suelen darse en condiciones estándar, que incluyen una masa de aire de 1.5 (distancia recorrida a través de la atmósfera un 50% mayor que cuando el sol está justo en el cenit) y una temperatura externa de 25[°C]. Sin embargo, la eficiencia de las células de silicio cristalino disminuye con el aumento de las temperaturas. Las eficiencias de los módulos cristalinos son ligeramen-

mente inferiores a las eficiencias de las células. Tecnologías de fabricación avanzadas, como contactos enterrados, células con contactos en la parte posterior, procesos de texturización y combinaciones de cristalino y películas delgadas, prometen aumentos en la eficiencia.

»Aunque las células c-Si representan la tecnología fotovoltaica más madura, aún hay margen para mejoras. Los objetivos importantes son reducir el grosor de las células para usar el costoso silicio altamente purificado por debajo de $5[\frac{g}{W}]$; reducir los costos energéticos y laborales de los procesos de fabricación; aumentar la eficiencia y vida útil de las células y reducir otros costos del sistema. Es muy preocupante el uso de plata, cuyo precio se duplicó en el último año y ahora representa aproximadamente el 5% de los precios de los módulos. La energía fotovoltaica ya representa aproximadamente el 10% de la demanda mundial de este metal precioso.» Philibert et al., 2011

3.1.3 Silicio monocristalino

El silicio monocristalino es un tipo de material utilizado en la fabricación de células solares, que son paneles que convierten la luz solar en electricidad. Este material se llama "monocristalino" porque está hecho de un solo cristal grande de silicio, en lugar de muchos pequeños cristales como en otros tipos de silicio. Esto lo hace muy eficiente para convertir la luz solar en electricidad.

Las células se fabrican a partir de un lingote de un solo cristal de silicio, cultivado en laboratorios de alta tecnología, se cortan, se dopan y se graban. La eficiencia de los módulos terrestres comerciales suele oscilar entre el 15% y el 20. Los módulos de este tipo de célula son los más maduros del mercado. Los fabricantes fiables de este tipo de módulos fotovoltaicos ofrecen garantías de hasta 20-25 años al 80% de la potencia nominal.

Se caracteriza por tener una estructura de cristal única y ordenada, lo que le otorga una alta eficiencia en la conversión de la luz solar en electricidad. Esto significa que los paneles solares de silicio monocristalino pueden producir más electricidad en menos espacio, lo que los hace ideales para aplicaciones donde el espacio es limitado. Sin embargo, la fabricación de silicio monocristalino es un proceso costoso y requiere una alta pureza del material, lo que puede tener un mayor costo. Su aplicación puede

resultar ideal para instalación en techos de edificios residenciales y comerciales, así como en aplicaciones de energía solar en zonas remotas donde se necesita generar electricidad de manera eficiente.

Los paneles solares de silicio amorfo son flexibles y pueden adaptarse a diversas superficies curvas o irregulares, lo que los hace ideales para aplicaciones como integración arquitectónica, donde se instalan en edificios como lo pueden ser las ventanas. Con el silicio policristalino las células son más económicas de producir que los monocristalinos y ofrecen una eficiencia razonable. Son una excelente opción para instalaciones a gran escala donde el costo es un factor importante y el espacio no es una limitación, como en plantas solares a gran escala en terrenos planos. Finalmente Los paneles de silicio monocristalino tienen una mayor eficiencia de conversión energética y una vida útil más larga en comparación con los otros paneles. Son ideales para aplicaciones donde se necesita maximizar la producción de energía en un espacio limitado, como en sistemas residenciales o comerciales en techos.

En la elección de qué tecnología e generación fotovoltaica se puede recomendar calcular la cantidad de energía necesaria, revisar el espacio disponible para instalación del equipo y presupuesto. Se revisan los paneles fotovoltaicos que se pueden adquirir teniendo en cuenta la eficiencia de conversión energética y el costo por $[W]$. y correspondiente con ello se puede hacer una elección. Sugiriendo casos de aplicación, si el requerimiento energético es bajo, se tiene una gran área y poco presupuesto, se puede seleccionar un panel amorfo o monocristalino si el presupuesto lo permite, ya que el espacio no es una dificultad. En cambio si el área es limitada y se tiene un mayor presupuesto, se podría optar por un panel monocristalino.

3.1.4 Aplicaciones y oportunidades en tipos de silicio

El silicio policristalino está compuesto por muchos pequeños cristales de silicio, lo que lo hace más fácil y económico de producir en comparación con el silicio monocristalino. Aunque los paneles solares de silicio policristalino pueden ser ligeramente menos eficientes que los de silicio monocristalino, su costo más bajo los hace más accesibles para un público más amplio. Además, el silicio policristalino es más resistente a las altas temperaturas, lo que puede aumentar su durabilidad y rendimiento en condiciones climáticas extremas. Un ejemplo de aplicación es en parques solares y plantas de energía solar a gran escala, donde la producción en masa y el costo son

factores clave.

El silicio amorfo es un material más flexible y versátil en comparación con el silicio cristalino. Su estructura amorfa permite una fabricación más rápida y económica, lo que reduce los costos de producción. Sin embargo, los paneles solares de silicio amorfo tienden a ser menos eficientes en la conversión de luz solar en electricidad y tienen una vida útil más corta en comparación con los de silicio cristalino. Además, el rendimiento de los paneles solares de silicio amorfo puede degradarse más rápidamente con el tiempo debido a factores como la exposición a luz ultravioleta y la humedad. En cuestión de su uso actual puede apreciarse en cargadores para teléfonos móviles y mochilas solares. También se utilizan en aplicaciones de energía solar en edificios, como ventanas y revestimientos solares, que aprovechan la luz solar para generar electricidad mientras proporcionan aislamiento térmico y protección contra los elementos.

El silicio monocristalino tiene ventajas en la manufactura de celdas fotovoltaicas. Su estructura cristalina uniforme permite una mayor eficiencia en la conversión de luz solar en electricidad, lo que se traduce en una mayor producción de energía en comparación con otros tipos de silicio. Los paneles de éste tipo suelen tener una vida útil más larga, manteniendo su rendimiento a lo largo del tiempo y proporcionando un mejor retorno de inversión. También resiste mejor a la degradación causada por factores ambientales como exposición a la luz ultravioleta y la humedad. Es más adecuado para aplicaciones donde el espacio es limitado y se requiere una máxima eficiencia energética, como en instalaciones residenciales y comerciales.

Los paneles de silicio tipo **n** suelen ser más eficientes y estables, con menor tendencia a la degradación inducida por la luz y mayor tolerancia a impurezas metálicas. Aunque históricamente el silicio tipo **p** ha sido más económico de producir, las mejoras tecnológicas han reducido la diferencia de costos entre ambos tipos.

El mercado actual de energía fotovoltaica está mayormente dominado por productos de «primera generación» basados en obleas de silicio, ya sea monocristalino o policristalino de menor calidad. Se espera que esta relevancia continúe al menos durante la próxima década. Sin embargo, el interés creciente en la investigación de células solares de «tercera generación», como las células solares tándem de todo silicio y las células solares de múltiples uniones, busca mejorar significativamente la eficiencia

de conversión energética y reducir los costos generales de energía.

«El crecimiento de la energía fotovoltaica en Japón también ha fomentado industrias periféricas, como la producción de materias primas de silicio, lingotes y obleas, inversores y marcos de aluminio reforzado. Sharp es el fabricante número uno de PV, seguido por Kyocera y Sanyo. Japón superó a los Estados Unidos en términos de fabricación en 1999 y su participación actual en la producción mundial total de PV es aproximadamente del 15%.» Foster et al., 2010

3.2 Tipos de seguidores solares

En la práctica es sabido que las celdas fotovoltaicas obtienen una mayor cantidad de energía mientras tengan una mayor exposición al sol y no solamente eso, sino que se encuentren a una posición normal respecto a él, por lo que en el momento de realizar una instalación resulta de interés seleccionar los tipos de tecnologías adecuadas respecto a los requerimientos, teniendo también en cuenta factores como la ubicación geográfica, disposición del terreno, demanda a abastecer entre otros factores.

El desarrollo de sistemas de seguimiento solar ha sido objeto de investigación y aplicación en el campo de las energías renovables. A continuación, se presentan algunos tipos y los aspectos más relevantes.

3.2.1 Instalación de Paneles Estáticos

Aunque no está dentro de los sistemas de seguimiento, vale la pena describir los pasos que llevan a la toma (o no) de decisión de incorporar uno. La decisión de integrar un sistema de seguimiento en una instalación solar implica una evaluación cuidadosa de varios factores. En primer lugar, se considera la ubicación geográfica de la instalación, ya que los sistemas de seguimiento son más beneficiosos en áreas con alta irradiación solar directa. Además, se analiza la disponibilidad de espacio, puesto que los sistemas de seguimiento requieren más espacio que los paneles estáticos debido a su movimiento. El análisis económico debe considerarse porque se deben comparar los costos iniciales y de mantenimiento de los sistemas de seguimiento con los beneficios adicionales de generación de energía. La durabilidad y la vida útil del equipo de seguimiento también influyen en la decisión, así como la disponibilidad de

personal capacitado para su instalación y mantenimiento. Finalmente, las políticas y subsidios locales pueden inclinar la balanza a favor de una u otra opción.

Los paneles solares estáticos son comunes en instalaciones residenciales y comerciales. Estos sistemas, que no siguen al Sol, se destacan por su simplicidad y menor costo, lo que los hace atractivos para muchas aplicaciones. En lugares donde la eficiencia máxima no es crítica o donde el presupuesto es una limitación, los paneles estáticos representan una solución efectiva. Su instalación es menos compleja y requiere menos espacio comparado con los sistemas de seguimiento. Además, presentan menores costos de mantenimiento, ya que tienen menos partes móviles susceptibles de desgaste. La estabilidad y fiabilidad de los paneles estáticos también los hacen ideales para entornos donde se busca una solución solar de bajo riesgo y fácil gestión, siendo particularmente populares en techos residenciales y pequeñas empresas donde la simplicidad y el bajo costo inicial son prioridades.

3.2.2 Seguidores Solares de Un Eje Activos

Estos sistemas siguen el movimiento aparente del Sol en un solo eje (generalmente el eje este-oeste). Utilizan sensores y motores para ajustar la orientación del panel a lo largo del día. A medida que el Sol se desplaza desde el horizonte este al oeste, el sistema de seguimiento reorienta continuamente los paneles para mantener un ángulo óptimo de incidencia de la luz solar. Esta capacidad de ajuste incrementa significativamente la eficiencia de generación en comparación con los sistemas estáticos, que están limitados a la orientación fija y dependen del ángulo de instalación inicial para optimizar la captación solar.

Su utilización en granjas de energía solar es amplia, ya que con un solo arreglo se puede mover una gran cantidad de paneles utilizando un único motor y un solo conjunto de sensores. Esto no solo mejora la eficiencia energética sino que también optimiza los costos operativos. En una granja solar, donde la superficie cubierta por los paneles es extensa, la implementación de sistemas de seguimiento en un solo eje puede resultar en una considerable mejora en la producción de energía sin necesidad de duplicar los sistemas de control para cada panel individual. La capacidad de mover grandes filas de paneles al unísono reduce la complejidad y el costo de instalación y mantenimiento, haciendo que estos sistemas sean una opción atractiva para proyectos a gran escala.

Además, la integración de estos sistemas en granjas solares se ve favorecida por la posibilidad de mantener y monitorear los sistemas de manera centralizada. Los avances en la tecnología de sensores y control han permitido que los sistemas de seguimiento sean cada vez más precisos y confiables, disminuyendo los tiempos de inactividad y los costos de reparación. La sinergia entre la optimización del ángulo de los paneles y el uso eficiente de motores y sensores compartidos maximiza el retorno de inversión y hace que los sistemas de seguimiento sean una opción viable y rentable para incrementar la producción energética en proyectos solares de gran tamaño.

3.2.3 Seguidores Solares de Un Eje Pasivos

Este tipo de seguidores, no son tan comúnmente conocidos como los activos, pero vale la pena mencionarlos. Utilizan las propiedades físicas de los gases, que se expanden o contraen según la temperatura a lo largo del día. Este cambio de volumen puede ser aprovechado para mover un pistón, que se puede colocar en un eje móvil de un panel y en la misma orientación que los seguidores de un eje activo (este-oeste). Una clara ventaja de este sistema es que no requiere energía adicional para desplazarse, ya que se basa en cambios térmicos naturales.

Sin embargo, presenta algunas desventajas. Los seguidores pasivos pueden necesitar ajustes constantes, ya que su «viaje»¹ varía con las diferentes temperaturas a lo largo del año. Además, según la teoría de control, se trata de un sistema abierto, significando que no hay realimentación y, por lo tanto, el sistema no puede corregir automáticamente los errores para ajustarse de manera óptima a la radiación solar. Esta falta de corrección automática puede llevar a una menor precisión en el seguimiento del Sol y, en consecuencia, a una eficiencia energética inferior en comparación con los sistemas activos.

¹Se le llama a la distancia que recorre un mecanismo lineal como un pistón, amortiguador o engranaje con cremallera

3.2.4 Seguidores Solares de Dos Ejes Activos

Éste tipo de sistemas son capaces de seguir tanto el movimiento horizontal como vertical del Sol. Estos sistemas son más complejos que los de un solo eje debido a la necesidad de mecanismos adicionales que permitan el movimiento en dos dimensiones. La mayor complejidad implica el uso de sensores avanzados y motores adicionales para ajustar continuamente la posición del panel solar a lo largo del día y durante todo el año. Este seguimiento bidimensional asegura que los paneles mantengan una orientación óptima perpendicular a los rayos solares en todo momento, maximizando así la captación de energía solar.

La principal ventaja es su capacidad para optimizar la eficiencia de conversión. Al mantener los paneles perpendiculares a los rayos solares, estos sistemas pueden captar más luz solar directa, lo que resulta en una mayor producción de energía en comparación con los sistemas estáticos o de un solo eje. Esta mayor eficiencia es particularmente beneficiosa en aplicaciones donde el espacio es limitado y se busca maximizar la producción energética por unidad de área. En instalaciones donde el costo de la tierra es elevado o donde hay restricciones espaciales, la inversión adicional en sistemas de dos ejes puede ser justificada por el aumento significativo en la producción de energía.

Sin embargo, la mayor eficiencia de éstos sistemas viene acompañada de desafíos adicionales. La complejidad mecánica y electrónica de estos sistemas implica costos iniciales más altos y mayores requerimientos de mantenimiento. Los motores y sensores adicionales deben ser monitoreados y mantenidos regularmente para asegurar un funcionamiento óptimo y evitar fallos. Además, los sistemas de dos ejes son más susceptibles a problemas mecánicos debido a la mayor cantidad de piezas móviles y a la necesidad de precisión en los ajustes. Esto puede resultar en costos operativos más altos a lo largo de la vida útil del sistema.

A pesar de estos desafíos, se utilizan ampliamente en aplicaciones donde la eficiencia energética es crítica. En grandes plantas de energía solar, donde se busca la maximización de la producción para la viabilidad económica del proyecto, los beneficios pueden superar los costos adicionales. También son utilizados en proyectos de investigación y desarrollo donde se busca explorar y maximizar el potencial de la tecnología solar. En estos contextos, la inversión en sistemas de alta eficiencia puede ser justificada por el retorno en términos de energía generada y conocimientos

adquiridos, como en la elaboración del presente trabajo.

Capítulo 4

Diseño del experimento

content

4.1 Introducción

En la siguiente sección se detallará los pasos que se siguieron desde la concepción retos técnicos, materiales y tecnologías para la integración del sistema. Se describirán también ventajas y desventajas sobre los componentes seleccionados y se abordarán aspectos del diseño desde el punto de vista mecánico electrónico y de control.

El aluminio es un buen material para la elaboración de estructuras como un heliodón y sistemas de seguimiento solar debido a varias razones. Su ligereza facilita el manejo y la instalación, reduciendo la carga sobre los motores y mejorando la eficiencia del sistema. Con una alta relación resistencia-peso, el aluminio proporciona robustez sin añadir peso excesivo. La facilidad de fabricación y ensamblaje del aluminio permite diseños precisos y personalizados. Estas propiedades combinadas hacen del aluminio un material adecuado para ésta selección.

Para los accesorios, reducciones de los motores, se ha utilizado filamento PLA¹ en impresión 3D porque es un material ligero y resistente que puede adaptarse fácilmente a una amplia variedad de diseños, lo que permite una mayor libertad creativa en el diseño de componentes mecánicos complejos. Además, la impresión 3D con PLA es un proceso rápido y económico, lo que facilita la fabricación de prototipos y la iteración rápida de diseños sin incurrir en costos excesivos. Otra ventaja es la

¹Polímero de ácido láctico

capacidad de personalización que ofrece la impresión 3D con PLA, permitiendo la creación de piezas a medida para adaptarse perfectamente a las necesidades específicas del sistema mecatrónico.

Entre otros materiales utilizados está la madera MDF² de 6[mm] en la elaboración de engranajes para el sistema vertical del panel, que de manera similar que al PLA facilita la elaboración de prototipos de una manera rápida y económica.

Se darán informaciones técnicas sobre los elementos que integran el sistema.

4.2 Componentes Involucrados

Para desarrollar este prototipo, es esencial considerar tres partes principales: los componentes programables y los componentes electrónicos, además de la mecánica del sistema.

4.2.1 Panel Fotovoltáico

Como se menciona en el marco teórico el panel fotovoltaico necesita tener ciertas condiciones para su funcionamiento óptimo, entre ellas que se encuentre lo más limpio posible para evitar que alguna partícula obstaculice la entrada de irradiación³.

Se ha utilizado el panel solar monocristalino Newpowa de 160[W] 12[V]. Sus características son: Alta eficiencia de $\frac{160[W]}{12[V]}$ con células de 9 BusBar⁴, que superan a las de 5 y 6 barras en eficiencia. Células encapsuladas en etilvinilacetato (EVA) para alto rendimiento. Marco anodizado resistente con orificios pretaladrados. Soporta vientos fuertes (2400[Pa]), granizo y nieve (5400[Pa]). Cristal templado de alta transparencia. Lámina posterior de TPT⁵ para mejor disipación de calor. Diodos de derivación preinstalados para minimizar caídas de potencia por sombreado. Dimensiones: 1170

²Medium Density fiber o fibra de densidad media

³La irradiación es una medida de la potencia radiante incidente por unidad de área, y se utiliza comúnmente en el contexto de la radiación solar. En otras palabras, la irradiación representa la cantidad de energía radiante que llega a una superficie en un área específica durante un período de tiempo determinado. $\frac{W}{m^2}$

⁴Componente eléctrico utilizado para la distribución eficiente de energía eléctrica en sistemas industriales, comerciales y residenciales

⁵Tedlar-PET-Tedlar

Cuadro 4.1: Especificaciones del panel solar

Descripción	Valor
Potencia máxima (Pmax)	160 [W]
Voltaje a Pmax (Vmp)	18.53 [V]
Corriente a Pmax (Imp)	8.66 [A]
Voltaje circuito abierto (Voc)	21.37 [V]
Corriente corto circuito (Isc)	9.14 [A]
Coefficiente temperatura (Voc)	$-(80 \pm 10) \left[\frac{mV}{^{\circ}C} \right]$

x 705 x 35 mm.

4.2.2 ESP8266EX

El ESP8266EX de Espressif ofrece una solución SoC⁶ Wi-Fi altamente integrada para satisfacer las continuas demandas de los usuarios de un uso eficiente de la energía, un diseño compacto y un rendimiento en la industria del Internet de las Cosas.

Con las capacidades de red Wi-Fi completas y autónomas, ESP8266EX puede funcionar como aplicación independiente o como esclavo de una MCU⁷ host. Cuando ESP8266EX aloja la aplicación, se inicia rápidamente desde la memoria flash.

Además, ESP8266EX se puede aplicar a cualquier diseño de microcontrolador como un adaptador Wi-Fi a través de interfaces SPI/SDIO o UART.

ESP8266EX integra conmutadores de antena, balun de RF, amplificador de potencia, amplificador de recepción de bajo ruido, filtros y módulos de gestión de potencia. de bajo ruido, filtros y módulos de gestión de energía. Su diseño compacto minimiza el tamaño y requiere un mínimo de circuitos externos. Además de las funcionalidades Wi-Fi, ESP8266EX también integra una versión mejorada de procesador de 32 bits de la serie L106 Diamond de Tensilica y SRAM en chip.

Puede interconectarse con sensores externos y otros dispositivos a través de los GPIO. Kit de desarrollo de software (SDK) proporciona códigos de muestra para

⁶System on Chip (Sistema en un chip)

⁷Unidad de microcontrolador

diversas aplicaciones.

4.2.3 ESP32

ESP32 es un único chip combinado Wi-Fi y Bluetooth de 2.4[GHz] diseñado con la tecnología TSMC de bajo consumo de 40[nm] de TSMC. Está diseñado para lograr el mejor rendimiento de potencia y RF, mostrando robustez, versatilidad y fiabilidad en una amplia variedad de aplicaciones y escenarios energéticos.

El ESP32 es un microcontrolador altamente versátil y potente, ampliamente utilizado en aplicaciones de (IoT)⁸ debido a su capacidad de comunicación inalámbrica integrada y su alto rendimiento. Equipado con un procesador dual-core y una amplia gama de interfaces de entrada/salida, el ESP32 es ideal para proyectos que requieren conectividad robusta y control preciso.

Una de las características más destacadas del ESP32 es su soporte para el protocolo de comunicación inalámbrica ESP-NOW, el cual está patentado por Espressif. ESP-NOW permite la comunicación directa entre dispositivos ESP32 sin necesidad de usar un punto de acceso Wi-Fi, lo que reduce la latencia y el consumo de energía. Este protocolo es particularmente útil en aplicaciones donde la velocidad de respuesta y la eficiencia energética son críticas, como en los seguidores solares.

En la implementación de un seguidor solar que utiliza motores a pasos, el ESP32 puede desempeñar un papel crucial en la gestión y control del sistema. Los motores a pasos requieren señales precisas para posicionarse correctamente, y el ESP32, con su capacidad de generación de PWM, puede controlar estos motores de manera eficiente. Además, mediante el uso de ESP-NOW, múltiples unidades ESP32 pueden comunicarse entre sí para coordinar el seguimiento del sol y optimizar el rendimiento del sistema fotovoltaico.

Característica	ESP32 (38 pines)	Tiva TM4C123G (Texas Instruments)
Velocidad del CPU	Hasta 240 MHz (dual core)	80 MHz

⁸Internet de las Cosas o Internet de las cosas en inglés

Característica	ESP32 (38 pines)	Tiva TM4C123G (Texas Instruments)
Memoria Flash	4 MB (varía según módulo)	256 KB
RAM	520 KB SRAM	32 KB
WiFi	Sí, integrado (802.11 b/g/n)	No
Bluetooth	Sí, Bluetooth 4.2 BLE y clásico	No
Número de pines GPIO	Hasta 34 (depende de uso de funciones internas)	43
Voltaje de operación	3.3V	3.3V
Facilidad de uso	Alta, compatible con Arduino IDE, PlatformIO, ESP-IDF	Moderada, requiere Code Composer Studio
Comunidad y soporte	Muy amplia, excelente documentación y ejemplos	Moderada, buen soporte técnico
Precio	Bajo (aprox. \$5-8 USD)	Moderado (aprox. \$13-15 USD)
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Doble núcleo y alta velocidad • Conectividad WiFi y Bluetooth integrada • Bajo costo • Compatible con muchos entornos de desarrollo 	<ul style="list-style-type: none"> • Alta velocidad del CPU • Buen soporte técnico • Amplias capacidades de E/S

Característica	ESP32 (38 pines)	Tiva TM4C123G (Texas Instruments)
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Complejidad al configurar funciones múltiples en un mismo pin • Voltaje de 3.3V puede requerir adaptación para módulos de 5V 	<ul style="list-style-type: none"> • Sin WiFi integrado • Requiere software especializado para programación

De acuerdo con el cuadro anterior se ha escogido el microcontrolador ESP32 de 38 pines porque presenta ventajas clave para la implementación del proyecto presente y las desventajas señaladas no constituyen mayor dificultad para los retos técnicos del mismo.

4.3 Control

Para Poder hacer el seguimiento activo de una fuente de luz intensa, como el sol o en este caso el foco montado en el carro del heliodón se necesita usar sensores y actuadores para dicha tarea.

Como se ha revisado en el marco teórico y con los componentes descritos en éste capítulo se integró en el sistema dos lazos de control, para cada eje del panel (horizontal y vertical) con un algoritmo para el seguidor activo. Todo el sistema está integrado con una interfaz y tareas específicas, la tarea de seguimiento activo es una que se necesita repetir, dependiendo si la fuente de luz se ha movido, es por eso que se necesita diseñar una función que sea utilizada cada que sea requerido, cuando el usuario del sistema la ejecute o en una prueba del sistema.

4.3.1 Algoritmo base para el seguimiento del sol

Para poder implementar el algoritmo descrito se necesitará que el panel solar cuente con capacidad de movimiento en dos ejes (azimut y elevación). Cuatro sensores de luz (fotoresistores). Dos actuadores para controlar los ejes de movimiento. Un sistema de control programable y codificación (programación) del mismo para ejecutar el algoritmo de control. Es necesario colocar los sensores de forma tal que pueda implementarse el algoritmo de manera correcta. porque estos sensores detectarán la intensidad de la luz solar y ayudarán a orientar el panel hacia la dirección con mayor luminosidad. El control de movimiento en dos ejes para un sistema de seguimiento se basa en el eje de azimut (horizontal) y el eje de elevación (vertical). El eje de azimut permite el movimiento del panel solar de izquierda a derecha, mientras que el eje de elevación facilita el movimiento de arriba a abajo. Estos movimientos combinados aseguran que el panel pueda orientarse de manera óptima hacia el Sol en cualquier momento del día.

Algoritmo 1 Rutina Auto Panel

```

1: procedure AUTOP(tolHOR,tolVER)
2:   Inicializar paso  $\leftarrow$  0
3:   Inicializar limAzi  $\leftarrow$  0
4:   Inicializar limEle  $\leftarrow$  0
5:   Declarar edoSA, edoSB, edoSC, edoSD
6:   while Repetir g desde 0 hasta 159999: do
7:     SA  $\leftarrow$  leerSensor(36) ▷ Sensor arriba
8:     SB  $\leftarrow$  leerSensor(33) ▷ Sensor derecha
9:     SC  $\leftarrow$  leerSensor(32) ▷ Sensor abajo
10:    SD  $\leftarrow$  leerSensor(39) ▷ Sensor izquierda
11:    difAzi  $\leftarrow$  SB - SD ▷ Diferencia horizontal (derecha - izquierda)
12:    difElev  $\leftarrow$  SA - SC ▷ Diferencia vertical (arriba - abajo)
13:    Segun (paso): ▷ Control por pasos
14:    Caso 0: ▷ Ajuste Horizontal
15:    Si abs(difAzi) > tolHOR entonces
16:    Si difAzi > 0 entonces
17:    girarMotorHorizontal(derecha) ▷ giro1 con ciertos parámetros
18:    Esperar 2 ms ▷ Sino
19:    girarMotorHorizontal(izquierda)
20:    Esperar 2 ms ▷ Sino
21:    paso  $\leftarrow$  1 ▷ Ir al ajuste vertical
22:    Caso 1: ▷ Ajuste Vertical
23:    Si abs(difElev) > tolVER entonces
24:    Si difElev < 0 entonces
25:    girarMotorVertical(abajo)
26:    Esperar 2 ms ▷ Sino
27:    girarMotorVertical(arriba)
28:    Esperar 2 ms ▷ Sino
29:    paso  $\leftarrow$  2 ▷ Ya está alineado, salir del bucle
30:    Caso 2:
31:    g  $\leftarrow$  160000 ▷ Forzar salida del bucle
32:    FinSegun
33:  end while
34: end procedure

```

El algoritmo descrito en 1 está implementado para cada panel del sistema con ligeros ajustes en los valores para procurar un mejor funcionamiento del seguidor, la

implementación del mismo se puede encontrar en el último capítulo del documento, el algoritmo en cuestión está diseñado para alinear automáticamente un panel solar utilizando cuatro fotoresistores. El mismo trabaja comparando las lecturas de estos sensores para detectar diferencias en la intensidad de la luz incidente y, con base en esas diferencias, ajustar la orientación del panel en dos ejes: horizontal y vertical.

La lógica está organizada en una estructura por pasos (con un control mediante la variable paso) que garantiza primero el ajuste horizontal y luego el vertical, terminando el ciclo una vez alcanzada la posición óptima. Primero, se calcula la diferencia horizontal «difAzi» entre los sensores derecho e izquierdo, y si esta diferencia supera un umbral «tolHOR», se activa el motor horizontal en la dirección correspondiente hasta que el panel esté alineado, esto se ejecuta en el paso 0. Luego se continúa con el paso 2, donde se evalúa la diferencia vertical «difElev» entre los sensores superior e inferior, y si supera su umbral «tolVER», se ajusta la orientación vertical mediante otro motor finalizando el paso 1 y siguiendo con el paso 2. Este proceso se realiza dentro de un ciclo que se interrumpe tan pronto como ambas orientaciones están correctamente alineadas dentro del paso 2, que es donde finaliza el algoritmo.

4.4 Diseño del sistema

Dentro de las partes mecánicas, electrónicas y programables del prototipo, el sistema desarrollado incluye tres paneles seguidores, todos ellos con configuraciones mecánicas idénticas. De estos paneles, mecánicamente y en la electrónica para mover los motores son idénticos a excepción del panel Central que incluye un microcontrolador extra (ESP8266) que es el responsable de la interfaz web, mientras que el tercero se diferencia por su disposición de sensores. Además, se integra un módulo que simula el comportamiento del sol, completando así la funcionalidad del sistema.

Se repasarán brevemente los componentes utilizados para las partes programables del sistema. Para todas las partes del sistema se usó una misma placa que es capaz de mover un total de 3 motores a pasos y varios periféricos adicionales como sensores, resultó ser bastante versátil ya que puede utilizarse tanto en los paneles como en el módulo del heliodón.

Tiene la placa desarrollada para este sistema teniendo la capacidad de mover 3 motores a pasos, de los cuales se utilizan dos para el movimiento horizontal y vertical del panel además de que usa 4 lecturas analógicas para poder hacer la rutina de

seguimiento activo del sol. Tiene conectado mediante comunicación sErie un segundo microcontrolador ESP82-66 quién es el responsable de alojar un servicio web con la interfaz el sistema.

Tienen los mismos componentes que el panel central a diferencia de que como se comunican con el panel central mediante el protocolo ESP-NOW y tienen un solo microcontrolador.

En el Módulo de sol, comparte los mismo componentes que los paneles Derecha e Izquierda además de incluir un relevador de estado sólido quién hace posible encender y apagar las luces del heliodón mediante la interfaz. Una diferencia notable es que se han implementado finales de carrera, con el propósito de poder tener casos de seguridad del sistema cuando el módulo del sol se encuentra en los extremos del riel.

Se utilizaron fotoresistencias para poder medir la irradiancia recibida en las orillas del panel. Éstos varían su resistencia en función de la intensidad luminosa recibida, permiten al sistema detectar la posición del sol en el cielo.

Para la elaboración del sistema se dispusieron 4 sensores para cada panel, cada panel comparte la misma configuración de la posición de los sensores, se colocaron 2 para el seguimiento del eje vertical, y otros 2 para el seguimiento horizontal.

En la figura [4.1a](#) se puede apreciar los componentes principales del sistema, el cual consiste en un heliodón móvil por el centro del sistema el cual contiene un carro que se desplaza a través de él. y por dentro del heliodón se encuentran tres módulos de paneles solares con seguimiento.

Se puede apreciar en [4.1b](#) los componentes que involucran el sistema desde una perspectiva lateral, a lo largo del documento, código y tablas, se referirá a los módulos de los paneles solares por su ubicación, como son 3, se referirá a uno «central», «derecha» e «izquierda», el módulo carro del sol, se encuentra confinado en el riel del heliodón.

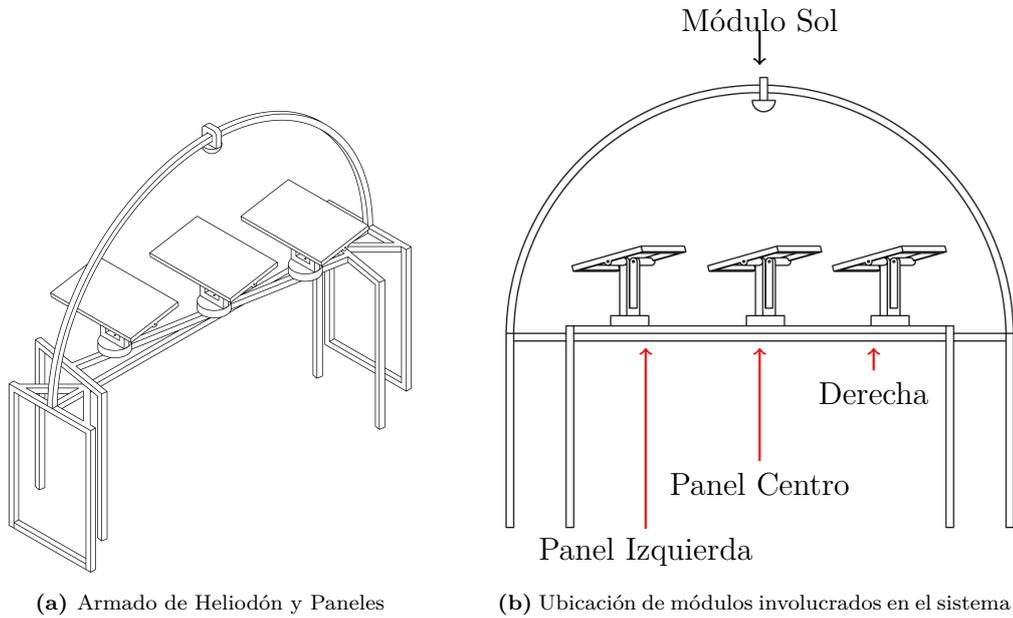


Figura 4.1 Planos en isométrico y frontal del Sistema

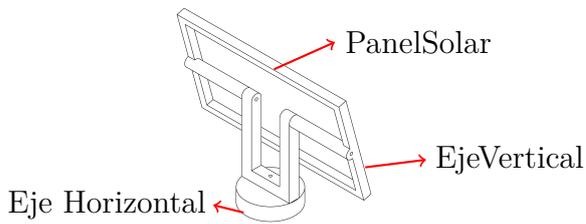


Figura 4.2 Plano del Módulo Panel seguidor solar

En la figura 4.2 muestra la geometría básica de los módulos del panel, tienen una base cilíndrica, dos postes que sujetan al panel solar en 2 ejes con movimiento, uno para el eje vertical (norte-sur) y otro para el horizontal (este-oeste).

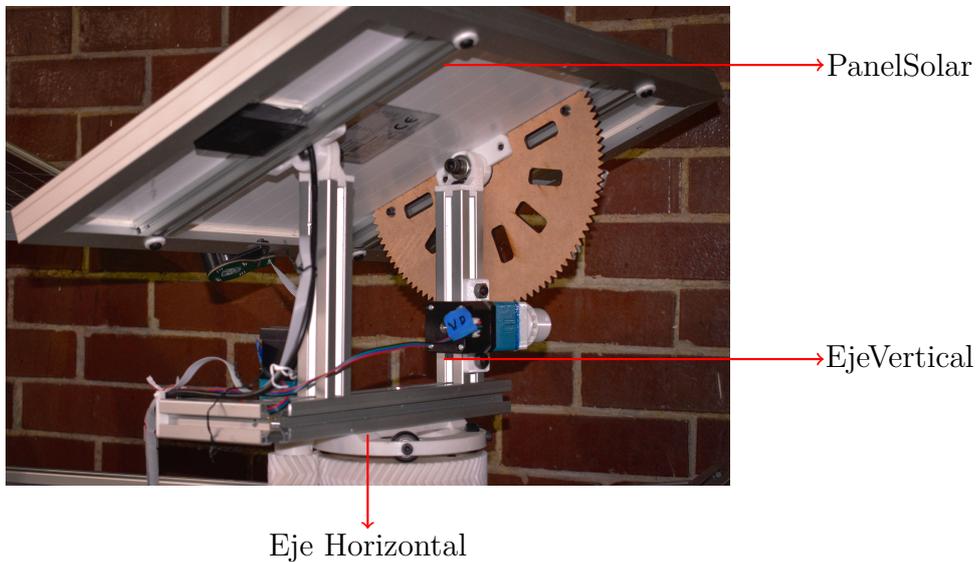


Figura 4.3 Módulo Panel seguidor solar Físico

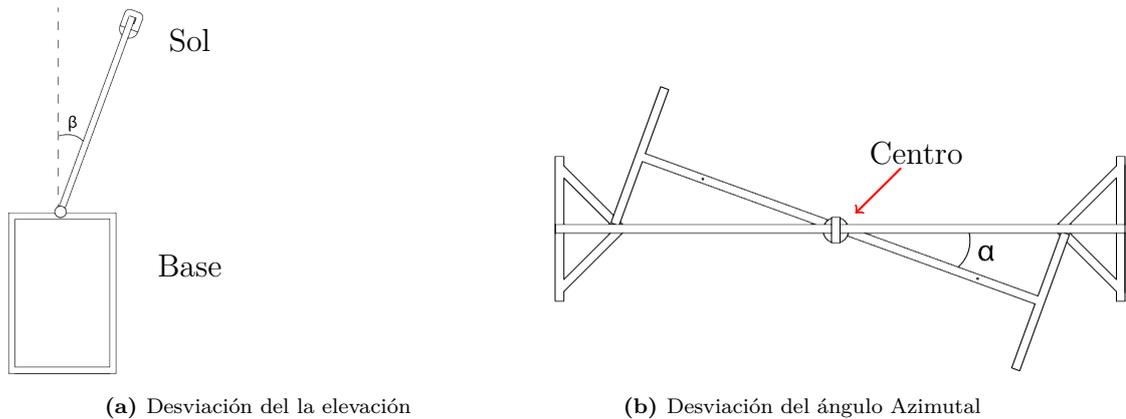


Figura 4.4 Electrónica para los paneles

4.5 Comunicación y Protocolos

En la elección para comunicar elementos programables de vía cable o aérea toma importancia asegurar una integración eficiente y confiable. Al escoger se tomarán en cuenta factores como la distancia de transmisión, el entorno de operación, la velocidad de datos requerida y la facilidad de implementación. Usar métodos inalámbricos se puede contar con flexibilidad y movilidad, eliminando la necesidad de cables y facilitando la comunicación en aplicaciones remotas o móviles.

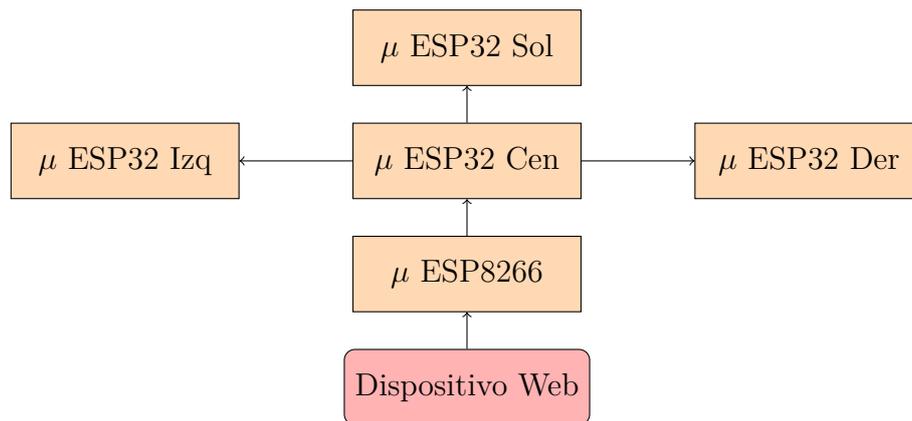


Figura 4.5 Dispositivos involucrados en el sistema

Se puede apreciar en la Figura 4.5 los microcontroladores y dispositivos utilizados. El sistema comienza con un dispositivo web, que puede ser cualquier aparato con capacidades WiFi (tableta, celular, PC, entre otros), el cual se conecta al microcontrolador ESP8266 el cual aloja un servicio web que es la interfaz del sistema, el nombre del dispositivo es «*Helio_Panel*» y su contraseña: **12helio34**. Este dispo-

sitivo tiene una dirección IP⁹ estática 192.168.1.4 a la cual el usuario debe acceder para poder ver la interfaz del sistema. En la codificación del ESP8266 se encuentra toda la interfaz programada en HTML, que incluye los botones de configuración del modo del sistema.

En primer lugar el dispositivo móvil en el cual se ha desplegado la interfaz del microcontrolador ESP8266, envía los datos que son enviados via comunicación UART el microcontrolador ESP32 Cen y éste transmite hacia todos los demás microcontroladores: ESP32 Der, ESP32Izq, ESP32 Sol mediante el protocolo de comunicación inalámbrica ESP-NOW.

ESP-NOW es un tipo de protocolo de comunicación Wi-Fi sin conexión definido por Espressif. En este protocolo, los datos de la aplicación se encapsulan en un marco de acción específico del proveedor y, a continuación, se transmiten de un dispositivo Wi-Fi a otro sin conexión. La velocidad de bits predeterminada es de 1[*Mbps*].

El formato del marco de acción es el siguiente:

MAC Header	Category Code	Organization Identifier
24 bytes	1 byte	3 bytes

- Código de categoría: El campo Código de categoría se establece en el valor (127) que indica la categoría específica del proveedor.
- Identificador de la organización: El identificador de la organización contiene un identificador único (0x18fe34), que son los primeros tres bytes de la dirección MAC¹⁰ aplicada por Espressif.
- Valor aleatorio: El valor aleatorio archivado se utiliza para evitar ataques de retransmisión.
- Contenido específico del proveedor: El contenido específico del proveedor contiene campos específicos del proveedor de la siguiente manera:

⁹«La dirección IP Por sus siglas en inglés protocolo de Internet es un número asignado a un dispositivo en una red»Sánchez, 2023

¹⁰«Una dirección MAC es el identificador único asignado por el fabricante a una pieza de hardware de red (como una tarjeta inalámbrica o una tarjeta Ethernet). el acrónimo MAC significa Media Access Control, y cada código tiene la intención de ser único para un dispositivo en particular»«¿Que es una direccion MAC?», s.f.

Element ID	Length	Organization Identifier	Type	Version	Body
1 byte	1 byte	3 bytes	1 byte	1 byte	0-250 bytes

«Como ESP-NOW no tiene conexión, el encabezado MAC es un poco diferente al de las tramas estándar.»Systems, [s.f.](#)

El primer campo de dirección se establece en la dirección de destino. El segundo campo de dirección se establece en la dirección de origen. El tercer campo de dirección se establece en dirección de difusión.

Para utilizar el proyecto en la plataforma en cuestión, se recomienda revisar la API¹¹. Una vez instalado el ESP toolchain en nuestro sistema, bastará con incluir el archivo cabecera en nuestro proyecto. El archivo de encabezado relevante es componentes «/esp_wifi/incluir/esp_now.h.» Este archivo se puede incluir en el código con la línea «`#include <esp_now.h>`».

4.6 Mecánica del sistema

En la siguiente sección se abordará sobre el diseño y la implementación de los componentes mecánicos esenciales para el funcionamiento del sistema. Esta parte del proyecto se centra en la estructura y los mecanismos involucrados. El análisis incluye la selección de materiales, el diseño de soportes y articulaciones, así como la integración de los componentes electrónicos que proporcionan el movimiento necesario.

Como se ha mencionado en la introducción el sistema contendrá un heliodón automatizado, por ello es necesario hacer los cálculos correspondientes al análisis estático y dinámico del carro que correrá en el riel del prototipo.

Para avanzar en la descripción del sistema, se abordarán las consideraciones físicas relacionadas con las cargas y fuerzas que intervienen en el movimiento del carro solar en el heliodón.

¹¹API del inglés, application programming interface, en español, interfaz de programación de aplicaciones

4.6.1 Análisis estático del módulo del sol

Se tiene un arco de aluminio que tiene una sección transversal de 3cm y tiene un radio de 1 m. Se calculará el ángulo donde un carro de aproximadamente 1[Kg] de peso que se encuentra acotado en la circunferencia del arco va a deslizar si éste se encuentra mecánicamente unido por una banda dentada y un motor NEMA17

El motor nema 17 tiene $3\frac{Kg}{cm}$ de fuerza, no se mueve, sin embargo se encuentra bloqueado por una señal, con un coeficiente de fricción estático de 0.65

Para calcular el ángulo donde el carro de 1 kg de peso comenzará a caer desde el arco de aluminio vertical, vamos a considerar las fuerzas involucradas y aplicar los principios de la estática.

Dado que el motor NEMA17 no se mueve y está bloqueado por una señal, no proporcionará ningún impulso para mantener el carro en su lugar. Por lo tanto, la fuerza que mantendrá al carro en su lugar es la fuerza de fricción estática entre el carro y el arco.

La fuerza de fricción estática (F_f) es igual al producto del coeficiente de fricción estática (μ) y la fuerza normal (F_N), que es igual al peso del carro (mg), donde m es la masa del carro y g es la aceleración debido a la gravedad.

Para que el carro comience a caer, la componente tangencial de la fuerza gravitacional hacia abajo (F_t) debe ser mayor que la fuerza de fricción estática (F_f).

Podemos calcular la componente tangencial de la fuerza gravitacional utilizando trigonometría. La componente tangencial es $F_t = mg \sin \theta$, donde θ es el ángulo con respecto a la vertical.

Entonces, el ángulo crítico donde el carro comenzará a caer se puede encontrar cuando $F_t = F_f$. Es decir:

$$mg \sin(\theta) = \mu mg \quad (4.1)$$

Cancelando mg :

$$\sin(\theta) = \mu \quad (4.2)$$

Usando $\mu = 65$, podemos calcular el ángulo crítico θ :

$$\theta = \arcsin \mu = \arcsin 0.65 \quad (4.3)$$

$$\theta = 40.8^\circ \quad (4.4)$$

Por lo tanto, el ángulo crítico donde el carro comenzará a caer desde el arco de

aluminio vertical es aproximadamente 40.8° .

4.6.2 Análisis dinámico del módulo del sol

Dadas las mismas condiciones anteriores, queremos saber ahora la misma pregunta en este caso cuando el carro se encuentre en un estado de movimiento continuado.

El motor NEMA 7 tiene $3[\frac{kg}{cm}]$ de fuerza, va a una velocidad de $10[cm]$ por segundo, con un coeficiente de fricción dinámico de 0.65

Para calcular el ángulo crítico en el que el carro de $1[kg]$ se deben considerar las fuerzas involucradas y aplicar los principios de la mecánica.

La fuerza de fricción dinámica F_f entre el carro y el arco es igual al producto del coeficiente de fricción dinámica μ y la fuerza normal F_N entre las superficies de contacto. La fuerza normal es igual al peso del carro, que es mg , donde m es la masa del carro y g es la aceleración debida a la gravedad.

La fuerza centrípeta F_C que mantiene al carro en movimiento en la dirección del arco es igual a la masa del carro multiplicada por la velocidad al cuadrado, dividida por el radio del arco.

Compararemos la fuerza de fricción dinámica con la fuerza centrípeta. Si la fuerza centrípeta es mayor que la fuerza de fricción dinámica, el carro se deslizará hacia abajo.

Primero, se calcularán las fuerzas:

- Peso del carro: $mg = 1[kg] \times 9.8[\frac{m}{s^2}] = 9.8[N]$
- Fuerza de fricción dinámica: $F_f = \mu \times F_N = 0.65 \times 9.8[N] = 6.37[N]$
- Fuerza centrípeta: $F_C = \frac{m \times v^2}{r} = \frac{1[kg] \times (0.1[\frac{m}{s}])^2}{1[m]} = 0.01[N]$

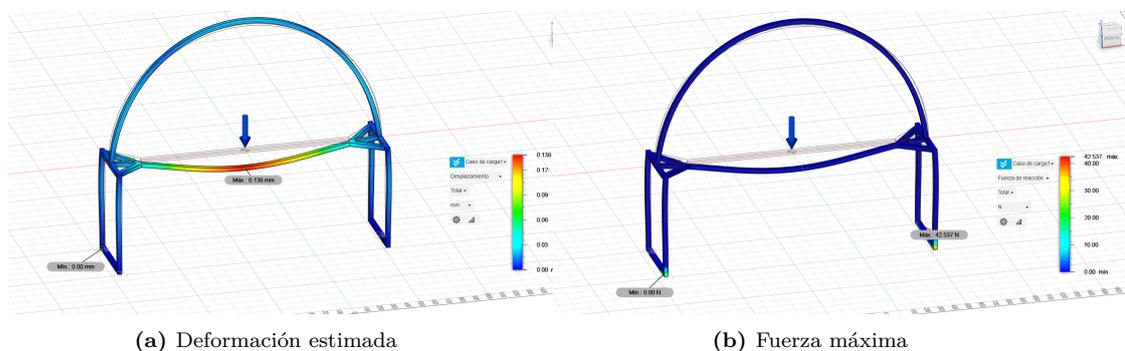
Dado que $F_f < F_c$, el carro no se deslizará y, por lo tanto, el ángulo crítico es $\theta = 0^\circ$

El carro se mantendrá en su posición sin deslizarse.

En la elaboración del Heliodón técnicamente el motor es capaz de recorrer sin deslizarse en todo el tramo si se encuentra con movimiento constante. Dado que esto no es así se colocan los finales de carrera en una posición pivotante a un ángulo de elevación cercano a los 40° de inclinación que se ha sugerido con el análisis estático, esto garantizará el correcto funcionamiento del carro.

4.6.3 Análisis de elemento finito

Para que el prototipo fuera factible, se realizaron simulaciones con la técnica análisis de elemento finito sobre la estructura de aluminio para asegurar que se resistiera el peso, cada módulo de panel tiene un peso de $2[Kg]$ lo que convertido nos da un resultado de $20[N]$, estos datos fueron ingresados al modelo 3D realizado en Fusion 360.



4.6.4 Análisis estático de módulos seguidores

Para realizar el siguiente análisis se tienen en consideración los siguientes datos:

- El peso del panel es de $2[kg]$
 - Panel son: $1170[mm] \times 705[mm] \times 35[mm]$
 - La altura del sistema de seguimiento: $30[cm]$
 - Tiene mecanismos impresos en 3D
- con una relación de reducción planetaria de $40 : 9$ y motores NEMA17
 - Mecanismos con una relación 1 a 16
 - Rodamientos que reducen la fricción (asumida como 0).

Considerar el peso es importante por el impacto en la eficiencia y durabilidad del sistema. El peso del seguidor solar, incluyendo el de los paneles solares y la estructura de soporte, influye directamente en la carga que debe manejar el mecanismo de seguimiento.

La fuerza gravitatoria que actúa hacia abajo debido al peso del panel es $F_{peso} = m \cdot g$, donde «m» es la masa del panel (2[Kg]) y «g» es la aceleración debida a la gravedad.

Los motores NEMA17 aplican fuerzas para mover el sistema. Estas fuerzas dependerán de la relación de reducción planetaria y la carga del panel.

4.7 Diseño Mecánico

Para el diseño del sistema, se emplean diferentes elementos mecánicos, como soportes móviles, mecanismos de seguimiento, y sistema de control, todos para garantizar una alineación precisa y estable del panel solar con respecto a la posición del Sol. Este diseño debe tener en cuenta diversos factores, como la resistencia estructural y la precisión en el seguimiento solar. En conjunto.

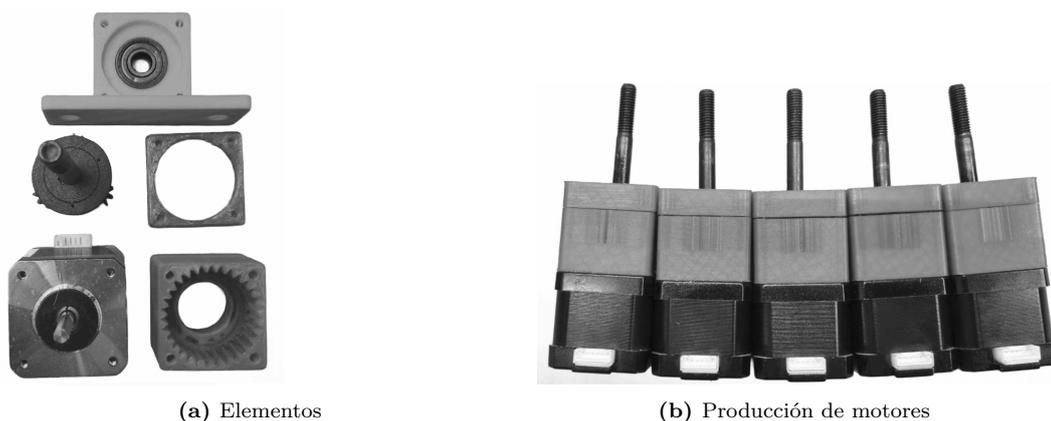


Figura 4.7 Motores a pasos con amplificación de torque mediante reducción planetaria

De la figura 4.7 en la parte (a) se pueden ver los componentes del mecanismo, en la parte superior se puede ver el rodamiento con pieza adaptable a perfiles de aluminio 3030¹², en la parte media izquierda se aprecia el eje principal que usa un tornillo con cabeza hexagonal milimétrica 8 «M8» con el portaplanetas y los engranajes de

¹²3030 quiere decir un perfil cuadrado de 30 por 30 [mm]

planetas, en la parte media a la derecha está un empaque de TPU¹³ que sirve para ajustar el mecanismo con la fricción adecuada. en la parte inferior derecha está la caja fija al motor con el engranaje anular «corona» y finalmente del lado izquierdo inferior está el motor a pasos, para sujetar las piezas de la reducción al motor se han utilizado tornillos milimétricos de 3[mm] «M3», en mecanismo tiene un radio de reducción 40 : 9

4.8 Diseño Electrónico

Se integró la placa Wemos con una tarjeta Ramps. Se diseñaron dos PCB específicos: uno para la tarjeta hija, que contiene un microcontrolador ESP32 y un driver A4988 para los motores a pasos, junto con dos entradas digitales de pull-up; y otro para compactar un arreglo de fotoresistores. Este arreglo se coloca en el panel solar para detectar posibles direcciones del sol.

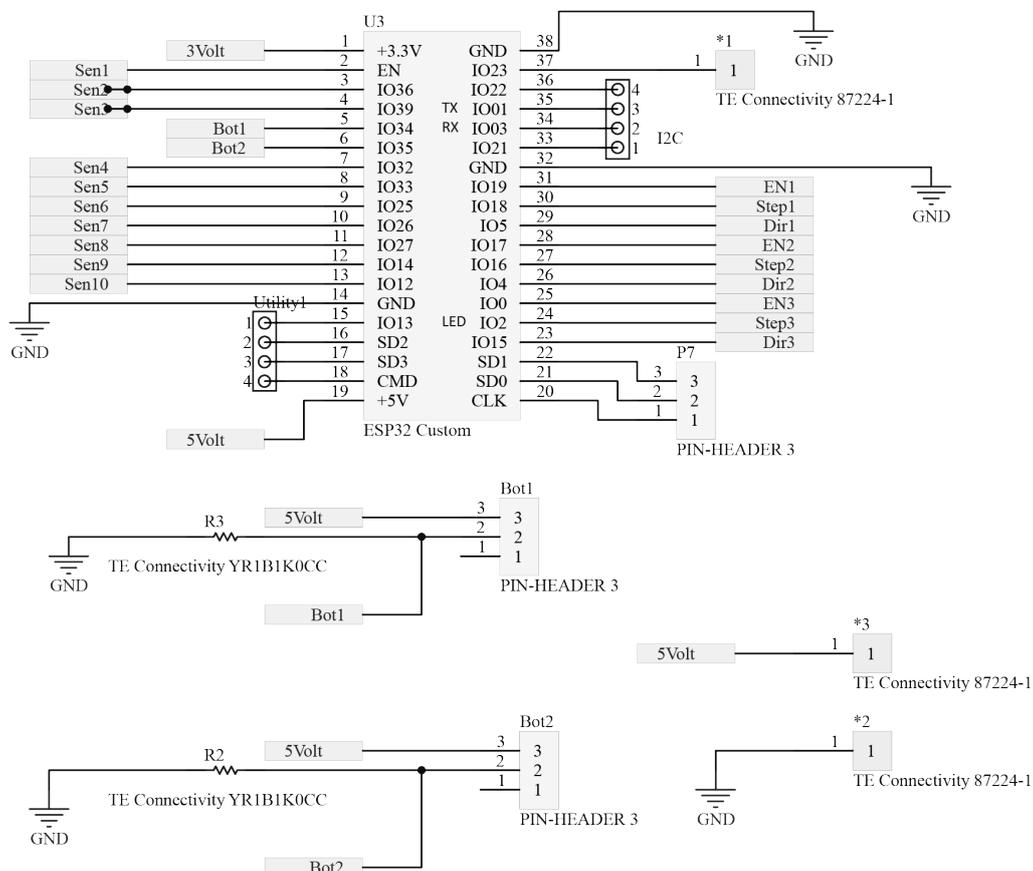


Figura 4.8 Diagrama conexiones ESP-32

¹³Poliuretano Termoplástico

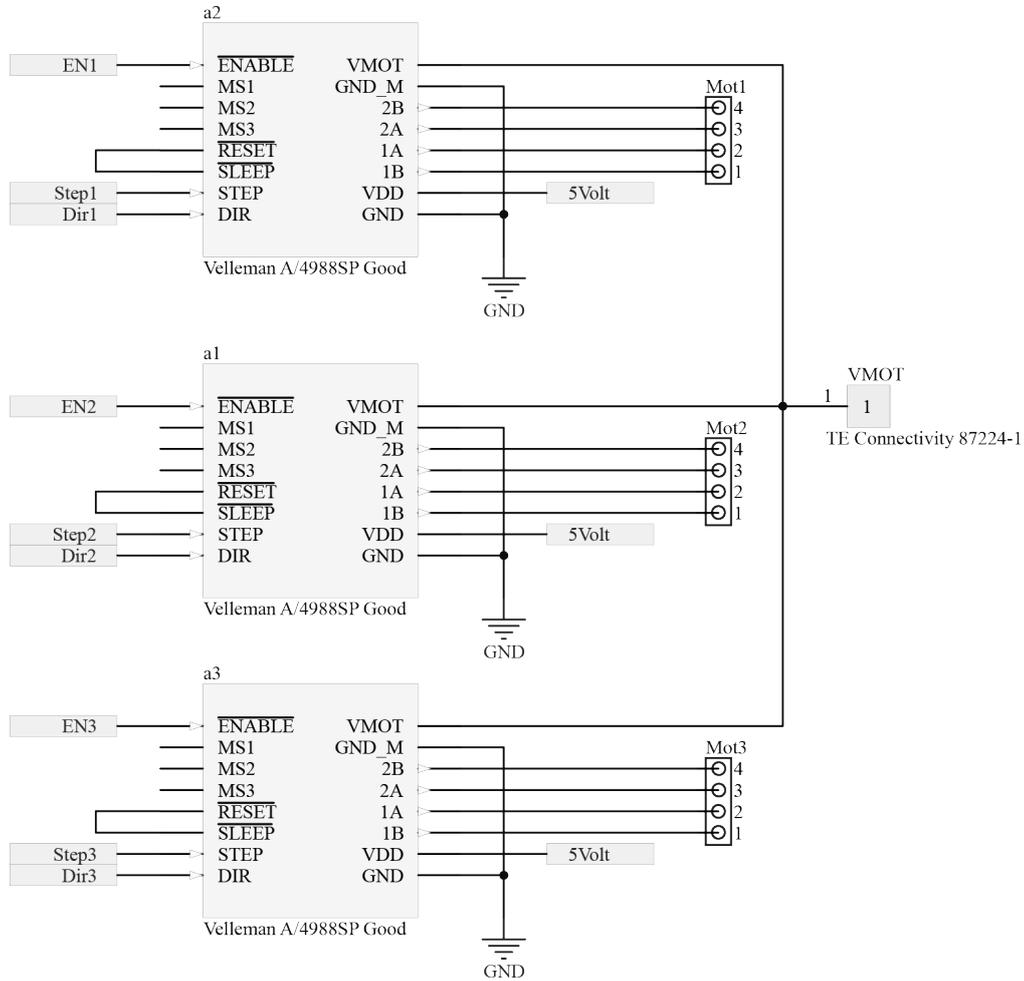


Figura 4.9 Diagrama controladores motores a pasos (A4988)

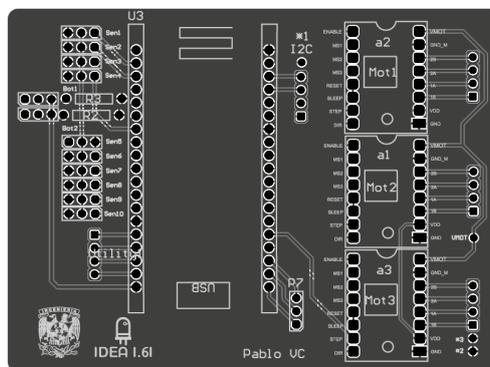


Figura 4.10 PCB Tarjeta Panel 1

En la figura 4.8 se pueden apreciar las conexiones que hace la placa ala medida, del lado izquierdo podemos ver el ESP32, en el cual podemos ver secciones relevantes, como que se agrupan 4 pines analógicos (10-13), las conexiones de tierra en 14, 38

y 32, 5[V] en 19, y unas más dedicadas al manejo de motores a pasos en 26,25 y 24, del lado derecho, sea precian las conexiones para el módulo driver para el motor a pasos A488, y finalmente del lado inferior derecho un arreglo de resistencias especial para el uso de finales de carrera en donde la señal es recibida en los pines 5 y 6.

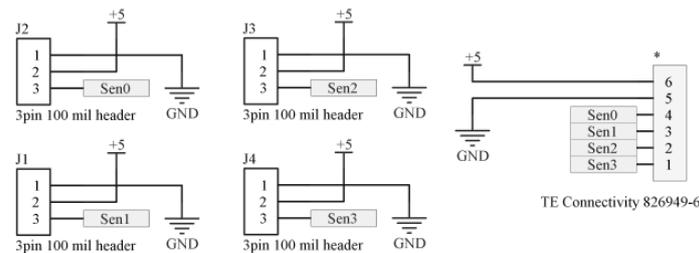


Figura 4.11 Diagrama Esquemático Sensores

En la figura 4.11 se aprecian las conexiones internas que se realizaron en la tarjeta personalizada para los arreglos de fotoresistencias.

4.9 Implementación Heliódón automatizado

Se tiene un riel semicircular donde corre un carro con un microcontrolador ESP32, 2 finales de carrera, un motor a pasos, un driver A4988, una lámpara y una batería. Se tienen 3 paneles solares con 2 motores, uno en el eje horizontal y otro en el eje vertical. Sumado a esto 4 sensores en un arreglo con el fin de poder detectar trayectorias de la posición del sol, en este caso el carro del heliodón.

Los 3 paneles van a una caja de control central, en ella hay 2 microcontroladores con electrónica que les ayuda a comunicarse con los drivers encargados de mover los motores. Un microcontrolador es la placa WeMos con una tarjeta Ramps 1.4, que contiene 5 drivers y 10 lecturas analógicas, a este conjunto se le ha nombrado tarjeta madre (MB) y el otro es un ESP32 que manipula un driver y tiene 2 lecturas analógicas, a este conjunto se denominará tarjeta hija (DB).

La interfaz del sistema, alojada en la tarjeta madre (Panel de Control), gestiona dos componentes principales del prototipo: el heliodón y los paneles solares.

El heliodón está diseñado para moverse de un extremo a otro a tres velocidades

diferentes, permitiendo ajustes precisos. Por otro lado, el sistema de paneles solares ofrece dos modos de operación: manual y automático. En el primer modo, los motores pueden ser controlados para mover los paneles con incrementos en forma bidireccional según sea necesario. En contraste, para el modo automático, los paneles están programados para seguir automáticamente la posición del sol o de una lámpara.

S_A					
S_D	S_B		PIN39	PIN3	
S_C			PIN32		
(a) Nombres Código			(b) Pines para ESP-32		

4.10 Acción de Control

Se realiza un ajuste del panel mediante un algoritmo de control. El objetivo de este es ajustar la posición del panel izquierdo para equilibrar la irradiancia recibida en diferentes partes del panel. Los sensores que interactúan con el lazo cerrado de control son los fotoresistores. En exteriores los valores obtenidos pueden tener muchas variaciones debido a muchos factores del entorno, como pueden ser, fuentes de luz cercanas, nubes que obstruyan la luz solar entre otros.

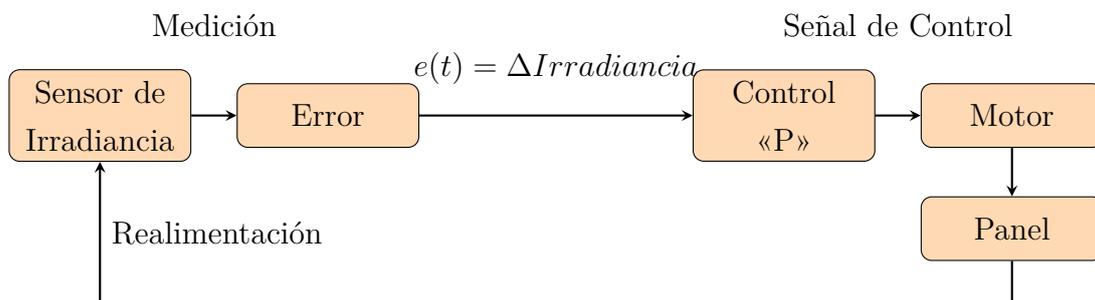


Figura 4.13 Diagrama de bloques de control proporcional para el ajuste del panel

Para el control proporcional, la función de transferencia es:

$$G(s) = K \quad (4.5)$$

Donde K es la ganancia proporcional.

4.11 Programación

Una parte que también se involucra en el diseño es la integración de los elementos que necesitan código para que puedan funcionar, en este sistema se utilizaron un total de 4 microcontroladores, y cada uno necesita de un código para funcionar, recapitulando, son 4 elementos móviles: 3 paneles en la base y el heliodón automatizado.

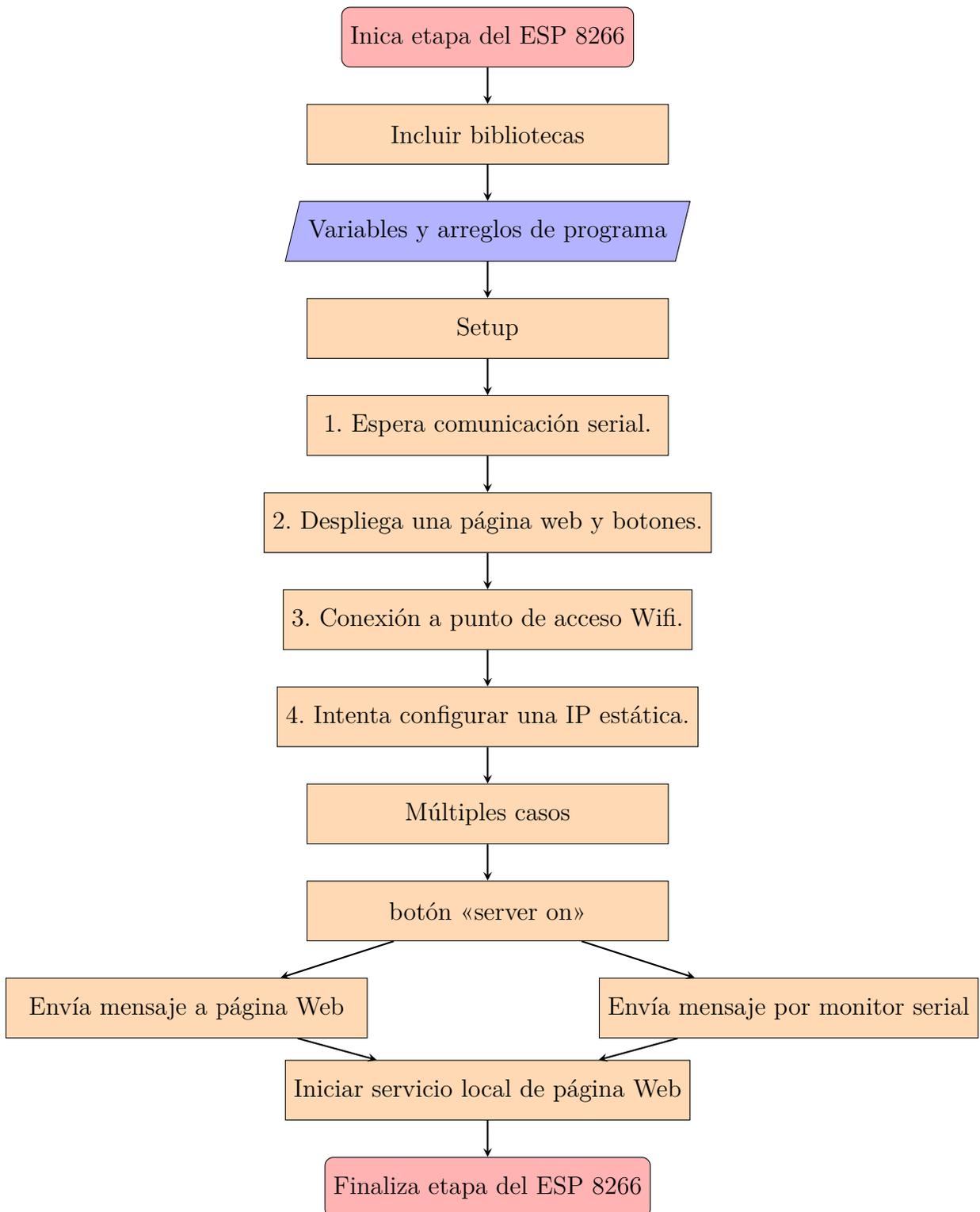


Figura 4.14 Diagrama código «ESP8266 interfaz web»

En la figura 4.14 se muestra el diagrama de flujo donde comienza con la etapa de inicio, donde se incluyen las bibliotecas necesarias para su funcionamiento. A continuación, en éste mismo diagrama se declaran las variables y arreglos que serán utilizados a lo largo del programa.

En la sección de configuración (setup), el ESP8266 primero espera establecer comunicación serial, seguido por la acción de desplegar una página web con botones interactivos. Posteriormente, el dispositivo intenta conectarse a un punto de acceso WiFi y configura una IP estática. En la fase de ejecución, se contemplan múltiples casos de uso, donde al activar el botón «server-on», se envía un mensaje a una página web y otro al monitor serial. Finalmente, se inicia el servicio local de la página web, concluyendo así la etapa de operación del ESP8266.

Se expondrá de manera detallada la codificación de los cuatro microcontroladores que conforman el núcleo del sistema desarrollado. Se explicarán las funciones principales, la gestión de entradas, salidas, y las comunicaciones entre microcontroladores. El código completo se puede encontrar en el apartado de Documentación.

Dentro del sistema existen cuatro códigos que están distribuidos en distintos tipos de microcontroladores.

Función	Código	μ	Comunicación
Interfaz web	(ESP8266 interfaz2)	ESP8266	UART
$2 \times \frac{\text{motor}}{\text{pasos}} \quad 4 \times \frac{\text{lecturas}}{\text{analógicas}}$	(ESP32 CEN)	ESP32	UART+ESP-NOW
$2 \times \frac{\text{motor}}{\text{pasos}} \quad 4 \times \frac{\text{lecturas}}{\text{analógicas}}$	(ESP32 IZQ)	ESP32	ESP-NOW
$2 \times \frac{\text{motor}}{\text{pasos}} \quad 4 \times \frac{\text{lecturas}}{\text{analógicas}}$	(ESP32 DER)	ESP32	ESP-NOW
Carro Sol de Heliódón	(ESP32 SOL 2)	ESP32	ESP-NOW

Cuadro 4.3: Tareas de microcontroladores del sistema

En 4.3 se hacen notar las partes programables del sistema y sus correspondientes códigos.

4.11.1 Estructura de los cuatro códigos.

Los cuatro códigos del proyecto se estructuran bajo las siguientes condiciones, teniendo algunas variables de microcontroladores, selección de bibliotecas y funciones. Repasando conceptos que pueden ayudar a la explicación son los siguientes

- **Biblioteca:** Es un fragmento de código elaborado por un tercero que resuelve un problema en concreto, proporcionando un conjunto de funcionalidades.
- **Variables:** Es un espacio de memoria donde se almacenan y recuperan datos utilizados en un programa, el cual es fundamental para manejar información y optimizar el proceso de programación.
- **Función:** Es un bloque de código diseñado para realizar una tarea específica y que puede ser reutilizado en diferentes partes de un programa. Se tuvieron que implementar funciones de la librería a la medida para el manejo de motores a pasos en la tarjeta ESP-32
- **Setup:** Se ejecuta solamente una vez cuando el programa se inicia, es decir, en el momento de encender el microcontrolador. Debe contener la inicialización de los elementos, la comunicación con el equipo o para inicializar los pines de nuestro componente programable.
- **Loop:** es una sección de programa que ejecuta el código continuamente hasta que la placa se apague. Es donde se lleva a cabo la función operacional del microcontrolador.

El motor NEMA 17 es uno de los motores paso a paso más comunes y versátiles utilizados en una amplia gama de aplicaciones. Aquí hay algunas características estándar de un motor NEMA 17,

El motor NEMA 17 es una elección buena para un prototipo de seguidor solar por varias razones. Su precisión en el posicionamiento asegura una orientación exacta hacia la posición óptima del sol. Además, su capacidad para controlar la velocidad y dirección del movimiento garantiza un seguimiento suave y eficiente en las simulaciones del heliodon, facilitando la reproducción precisa de la trayectoria del sol a lo largo del día y el año en el laboratorio.

ESP 8266 tiene un código en HTML el cual aloja un servicio web, la interfaz del sistema consiste en una página declarada en el código del microcontrolador se encuentran botones, los cuales pueden ser activados por cualquier dispositivo que esté conectado y acceda a su dirección IP. La interfaz tiene cuatro partes: una superior que contiene el control del heliodón y 3 inferiores que corresponden al control de los

tres paneles solares del sistema.

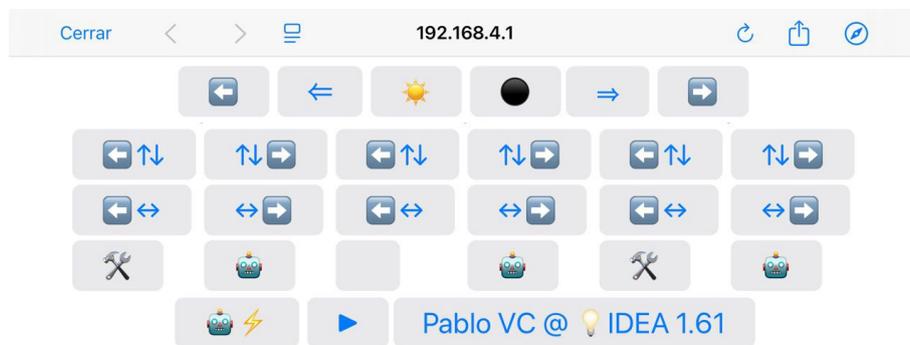


Figura 4.15 Interfaz del sistema en HTML

Se programó el microcontrolador ESP8266 para alojar un sitio web, que puede verse en la figura 4.15 con botones de acción. Es a través de ellos que se puede manipular el movimiento del carro del heliodón, la posición de los tres módulos y la acción automática de cada uno.

En la parte superior se puede apreciar la dirección IP del sistema, abajo de ella se aprecian 6 botones, los centrales representan un sol y un disco negro, sirven para apagar o encender el foco del heliodón, las flechas delgadas es para mover el carro una cantidad mínima y las más gruesas son para enviar el carro al extremo final del riel.

En las dos filas siguientes se encuentran 6 columnas, están agrupadas en pares para cada panel, en cada una se encuentran dos símbolos un par de flechas hacia arriba y hacia abajo indican que es para movimiento vertical, y un par de flechas que se oponen lateralmente indica el movimiento horizontal, la otra flecha es el sentido positivo o negativo asociado a un movimiento horizontal y vertical, estos botones sirven para que el usuario pueda posicionar manualmente todos los elementos del sistema.

En la cuarta fila hay botones con un símbolo de herramienta y un robot, el botón de herramienta es de prueba, el cual hace un recorrido para cada panel que sirve a modo de comprobación de funcionamiento del sistema y el símbolo de robot hace referencia a la secuencia de seguimiento activo del sol del panel. En la última fila hay un símbolo de un robot con un rayo, éste sirve para mandar la acción de seguimiento activo de la luz a los tres paneles, el símbolo de triángulo azul sirve para hacer una prueba del sistema en su conjunto en modo de seguimiento activo.

4.11.2 Función para moteres a pasos

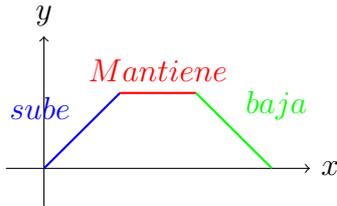


Figura 4.16
«mueve1»

La función `giro1` se utiliza para controlar un motor paso a paso con rampas de aceleración y desaceleración. El tiempo de ejecución de esta función depende de los parámetros de entrada. A continuación, se presenta la derivación de una expresión para calcular el tiempo de ejecución total.

En el código «`int ramp`» para las rampas ascendente y descendentes se aplica como un factor de escala en el tiempo, «`int limSupMot`», «`int limInfMot`» son límites superiores e inferiores en la velocidad del motor, son los intervalos en microsegundos de la onda cuadrada a ejecutar, es decir que entre más pequeño sea el límite se refiere a un valor de velocidad alta y viceversa.

El tiempo de ejecución total T se puede expresar como:

$$T = T_{\text{decreciente}} + T_{\text{intermedio}} + T_{\text{creciente}}$$

Donde:

- El tiempo decreciente es:

$$T_{\text{decreciente}} = \sum_{g=l_{\text{SUP}}}^{l_{\text{INF}}} T_{\text{giro}}(g, RAMP)$$

- El tiempo intermedio es:

$$T_{\text{intermedio}} = T_{\text{giro}}(l_{\text{INF}}, tiempo)$$

- El tiempo creciente es:

$$T_{\text{creciente}} = \sum_{g=l_{\text{INF}}}^{l_{\text{SUP}}} T_{\text{giro}}(g, RAMP)$$

La función `giro` realiza un número de pasos proporcional a sus parámetros. Su tiempo de ejecución T_{giro} se puede aproximar como:

$$T_{\text{giro}}(g, t) \approx g \times 2 \times t$$

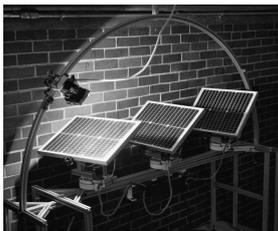
Donde g es el número de pasos y t es el retardo entre pasos.

Capítulo 5

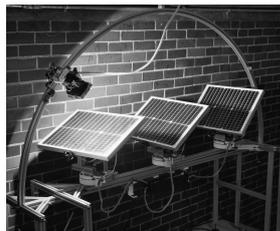
Análisis de Resultados

5.1 Introducción

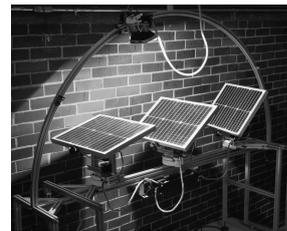
Para continuar con el documento se realizaron pruebas con el sistema midiendo varias configuraciones, hay varios tipos de ángulos realizables en el sistema, de las variaciones que puede tener este son en su ángulo cenital, su elevación en el trayecto del día y elevación en su trayectoria. Para medir estos cambios y contrastar con el sistema de seguimiento activo



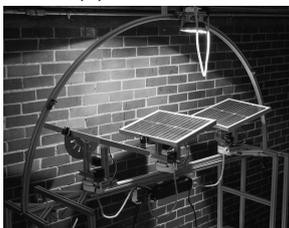
(a) Inicio Recorrido



(b) Recorrido Amanecer



(c) Recorrido Medio 1



(d) Recorrido Medio 2



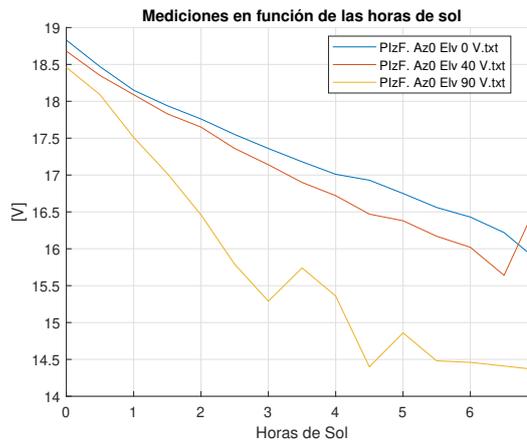
(e) Recorrido Anochecer



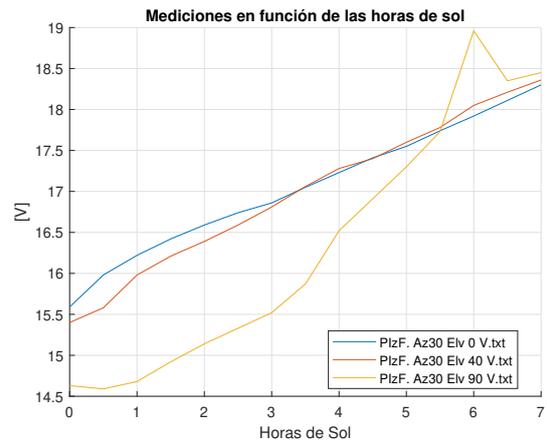
(f) Final del Recorrido

5.2 Mediciones Paneles Fijos

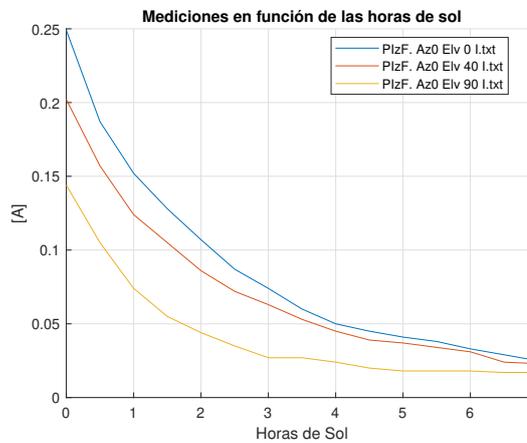
Se realizaron medidas con los paneles puestos totalmente horizontales, variando valores de Elevación y Azimut en 0, 40 y 90 grados.



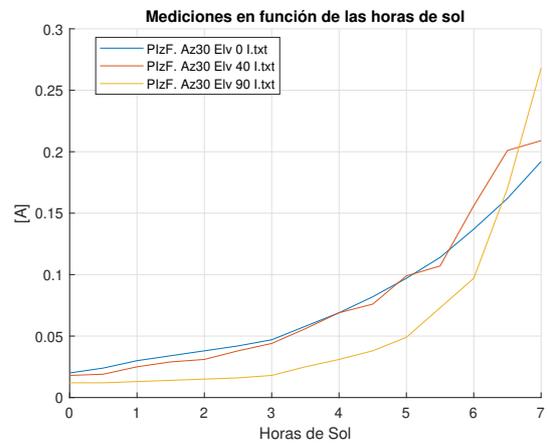
(a) VolIzFijoAz0



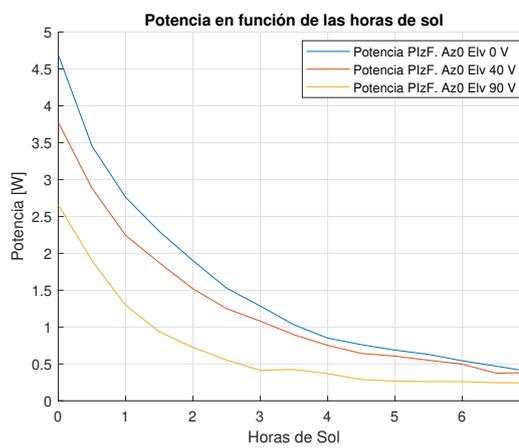
(b) VolIzFijoAz30



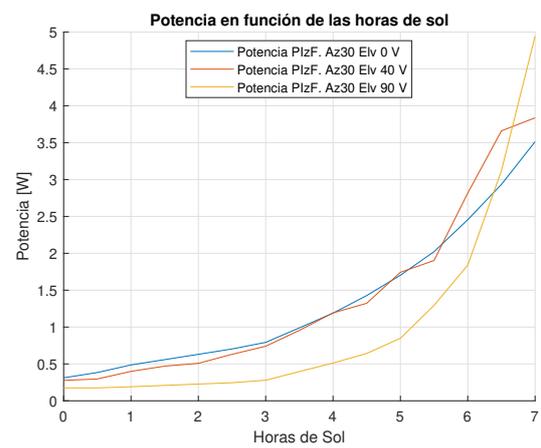
(c) CorIzFijoAz0



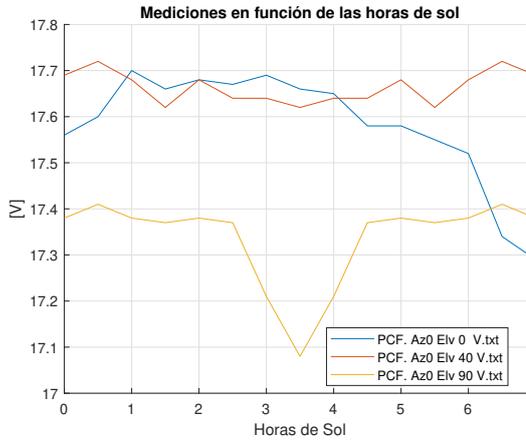
(d) CorIzFijoAz30



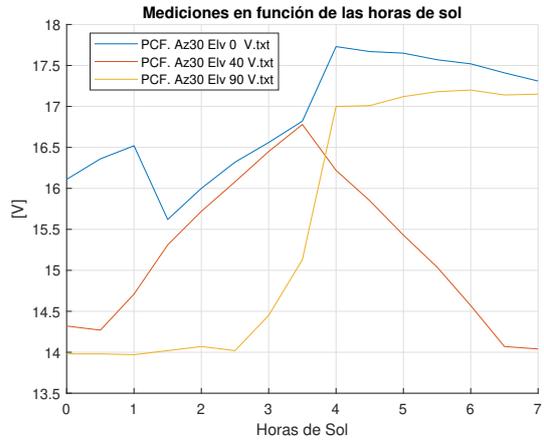
(e) PotIzFijoAz0



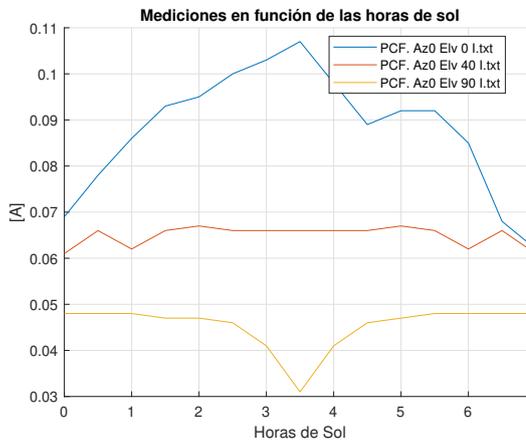
(f) PotIzFijoAz30



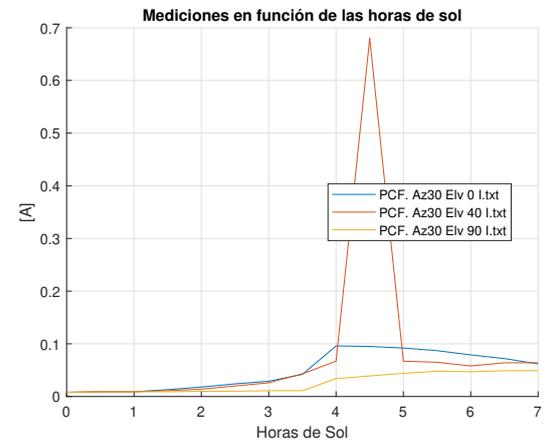
(a) VolCenFijoAz0



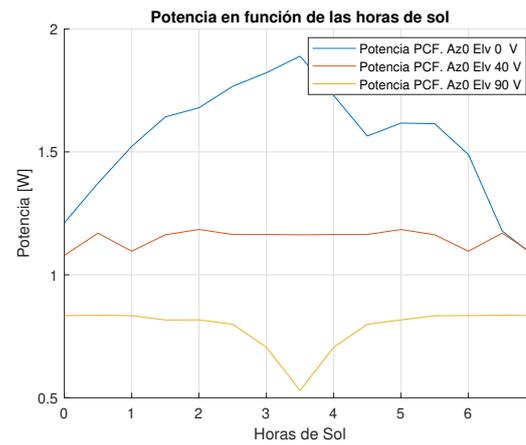
(b) VolCenFijoAz30



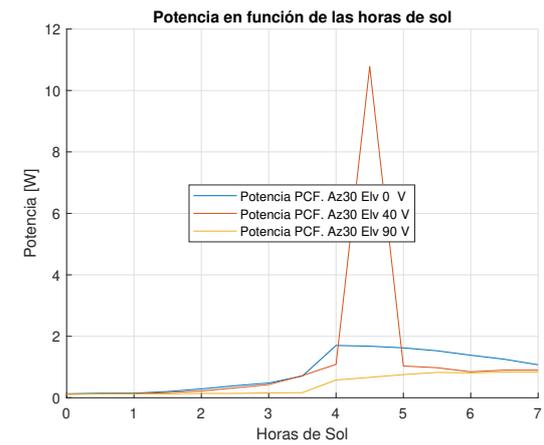
(c) CorCenFijoAz0



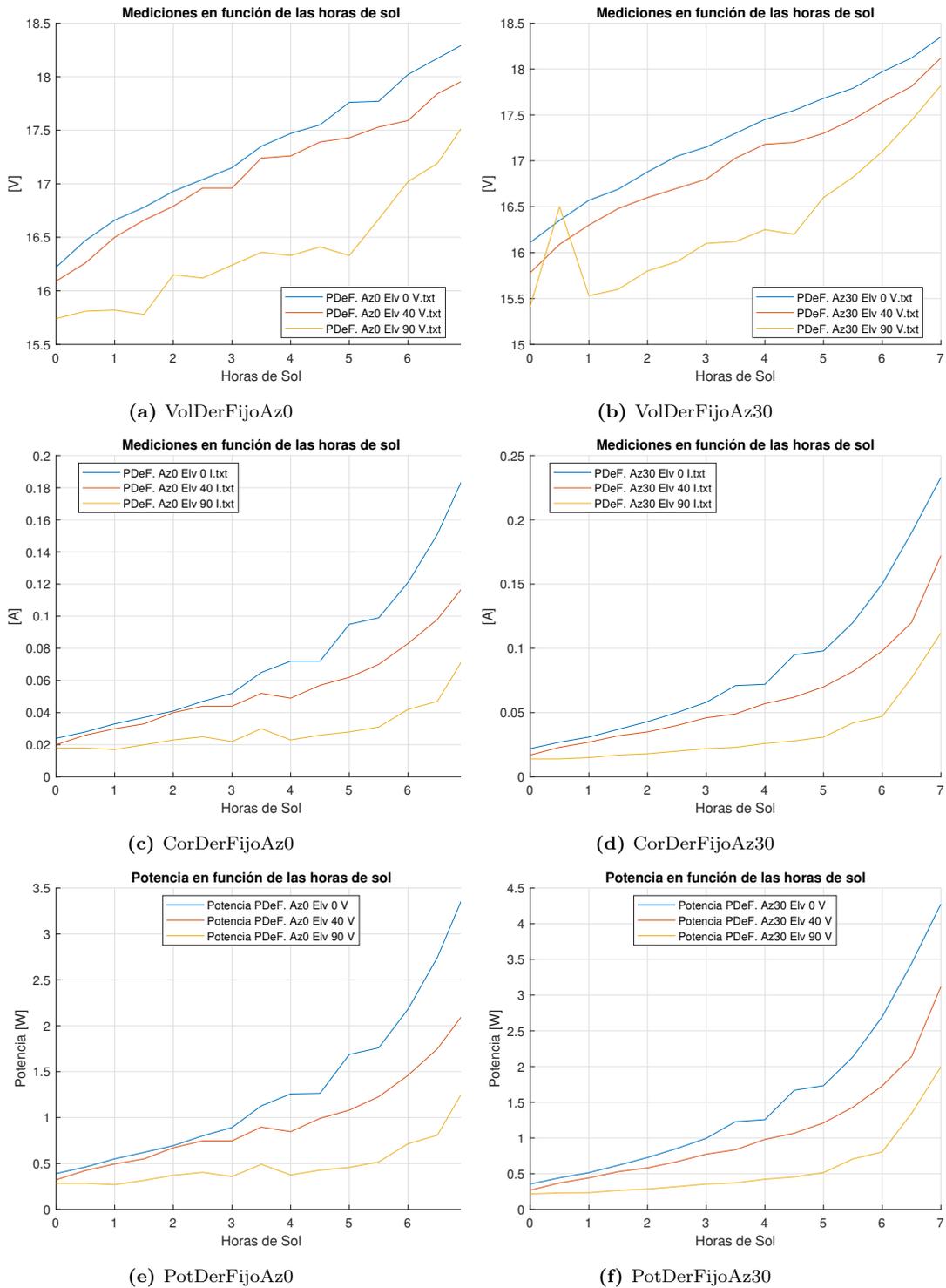
(d) CorCenFijoAz30



(e) PotCenFijoAz0

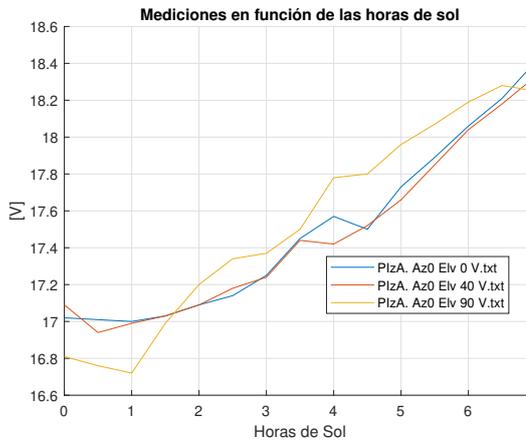


(f) PotCenFijoAz30

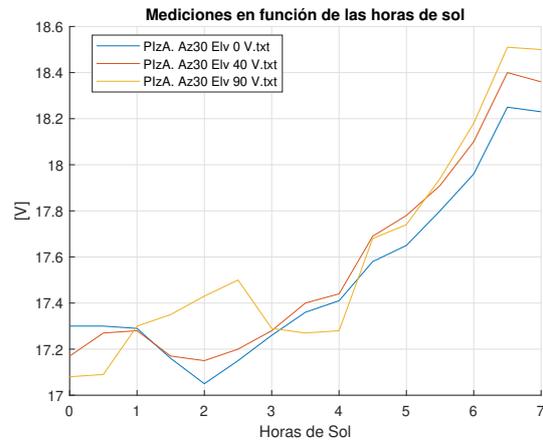


5.3 Mediciones Paneles con Seguimiento Activo

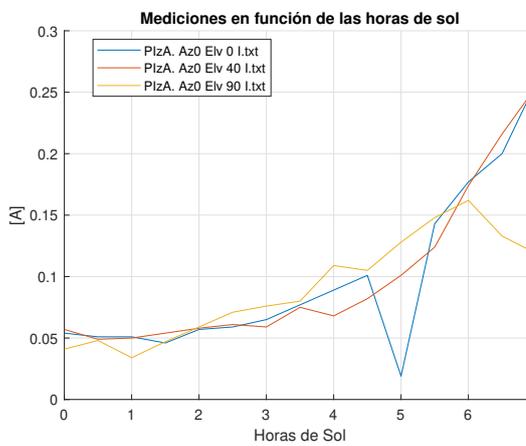
Se realizaron medidas con los paneles en configuración de seguimiento activo, variando valores de Elevación y Azimut en 0, 40 y 90 grados.



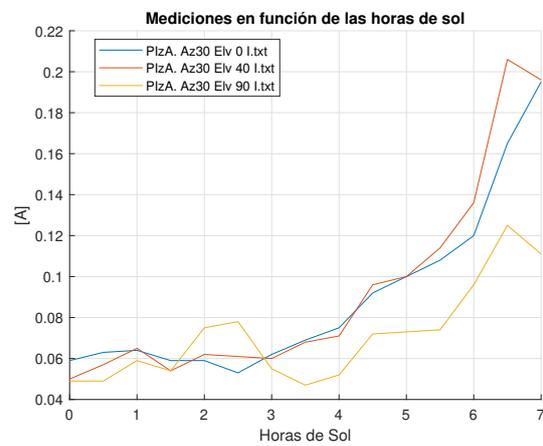
(a) VoltzAutoAz0



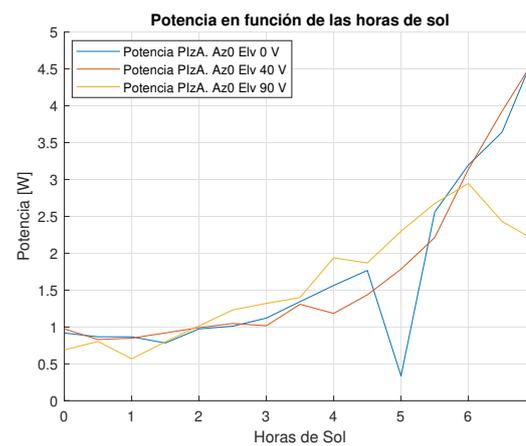
(b) VoltzAutoAz30



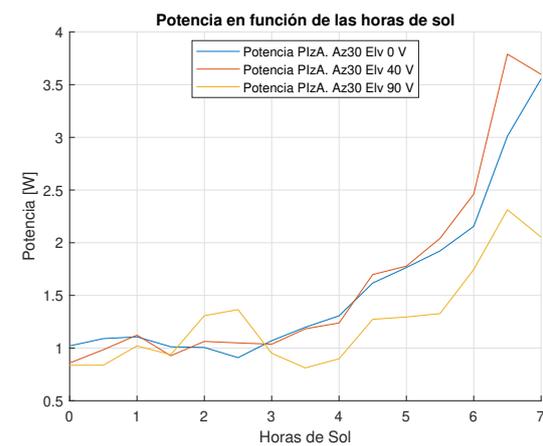
(c) CorIzAutoAz0



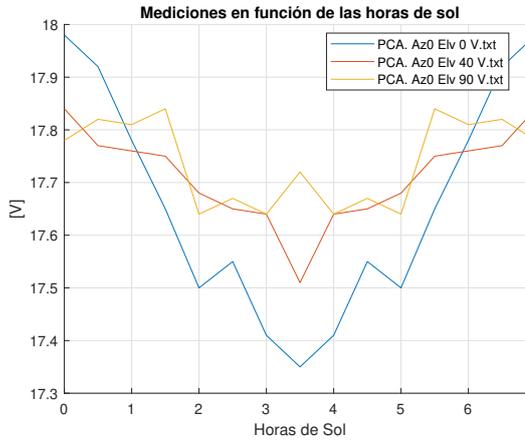
(d) CorIzAutoAz30



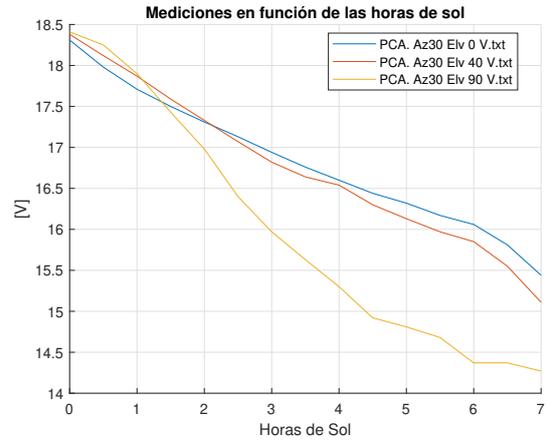
(e) PotIzAutoAz0



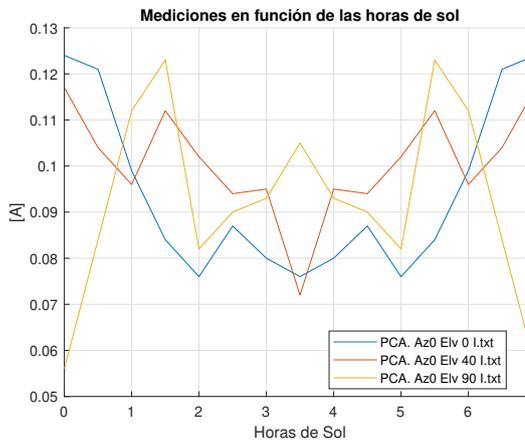
(f) PotIzAutoAz30



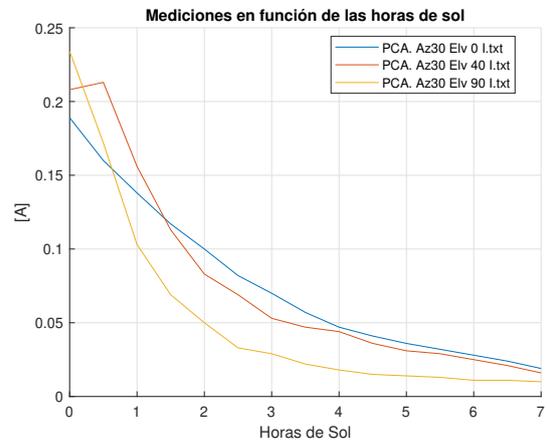
(a) VolCenAutoAz0



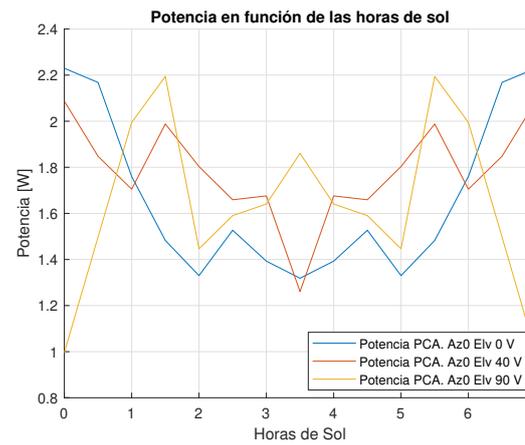
(b) VolCenAutoAz30



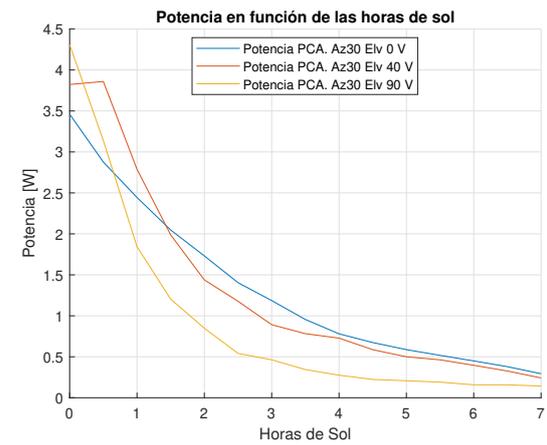
(c) CorCenAutoAz0



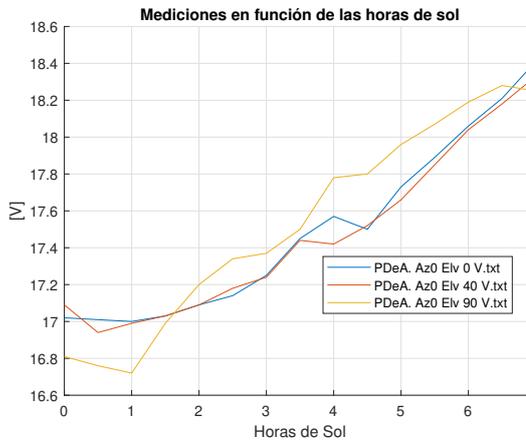
(d) CorCenAutoAz30



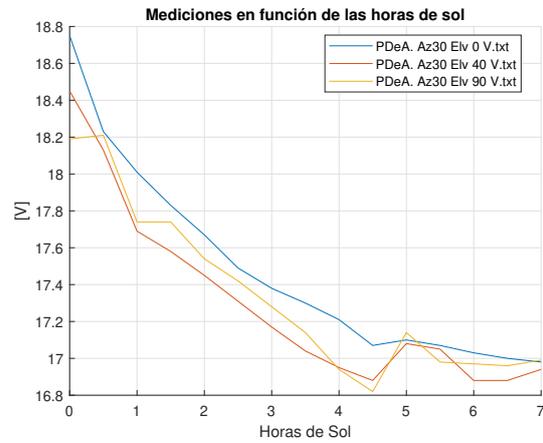
(e) PotCenAutoAz0



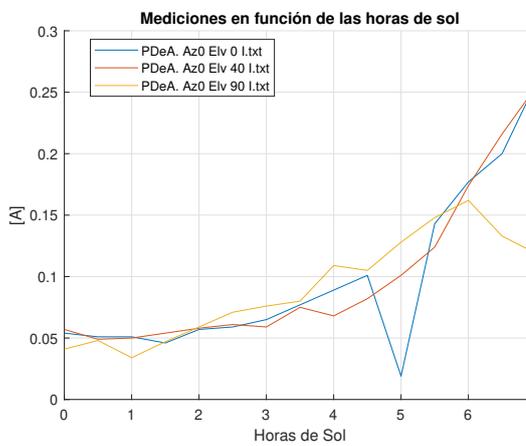
(f) PotCenAutoAz30



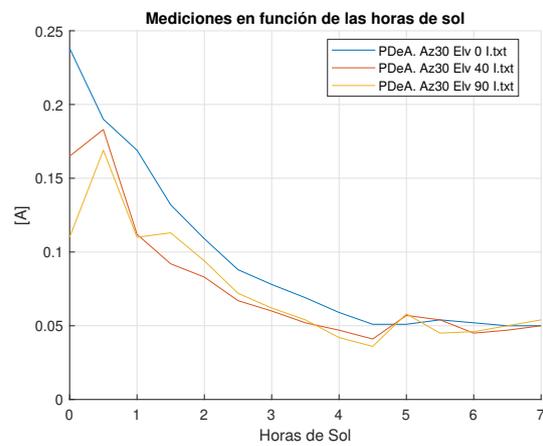
(a) VolDerAutoAz0



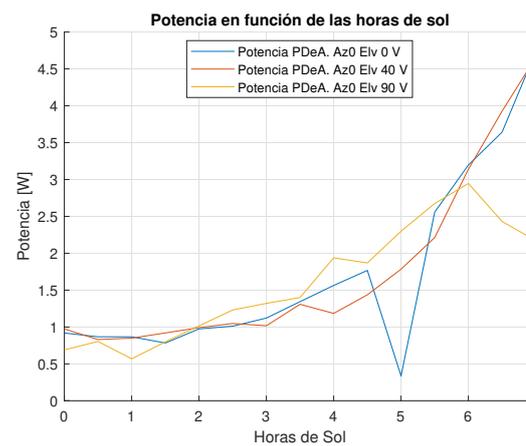
(b) VolDerAutoAz30



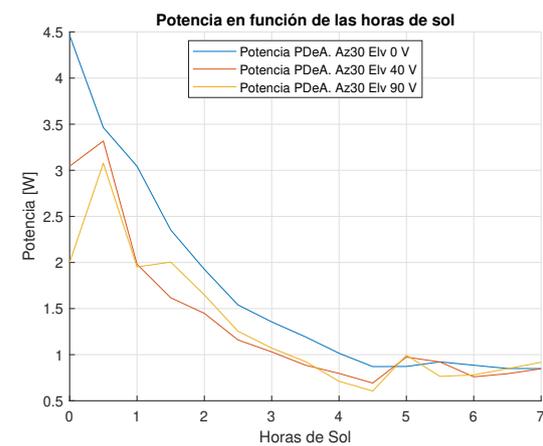
(c) CorDerAutoAz0



(d) CorDerAutoAz30



(e) PotDerAutoAz0



(f) PotDerAutoAz30

5.4 Energía obtenida

Se realizó un compendio a modo de comparación de los resultados obtenidos para paneles fijos y de seguimiento activo para cada una de las configuración y se obtuvieron sus diferencias.

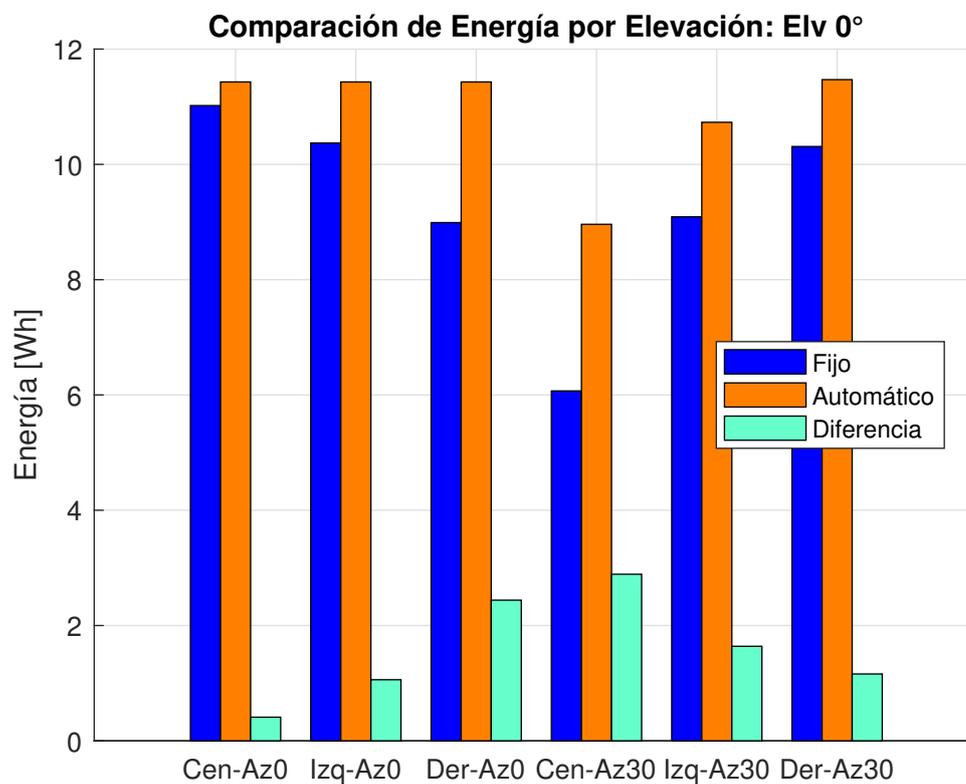


Figura 5.8 Energía Elevación 0

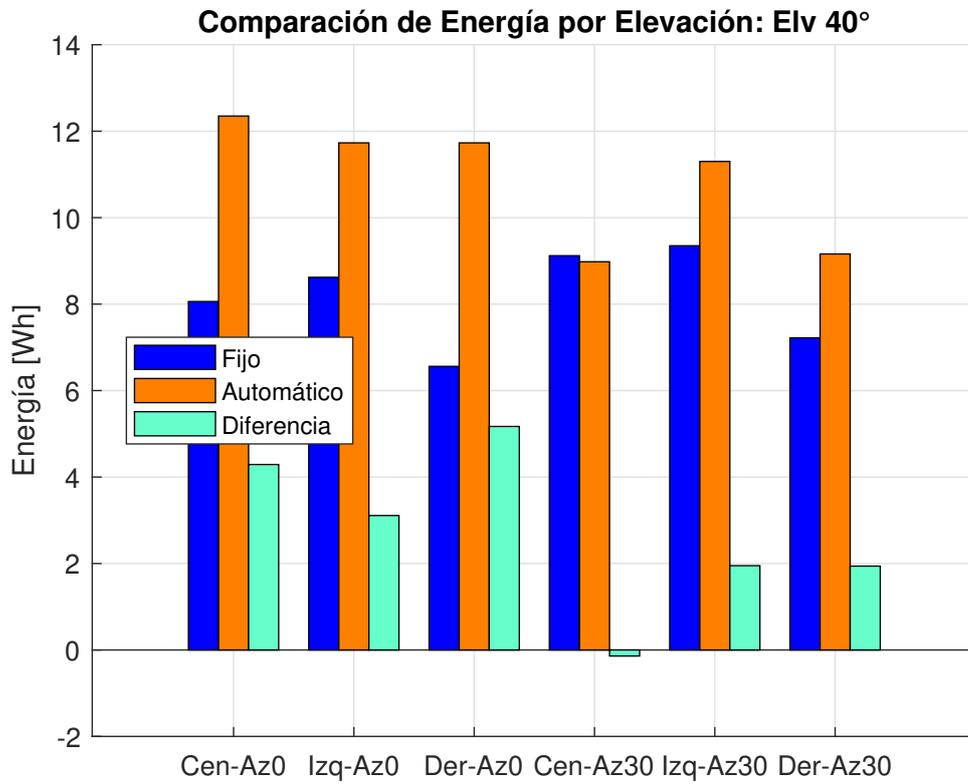


Figura 5.9 Energía Elevación 40

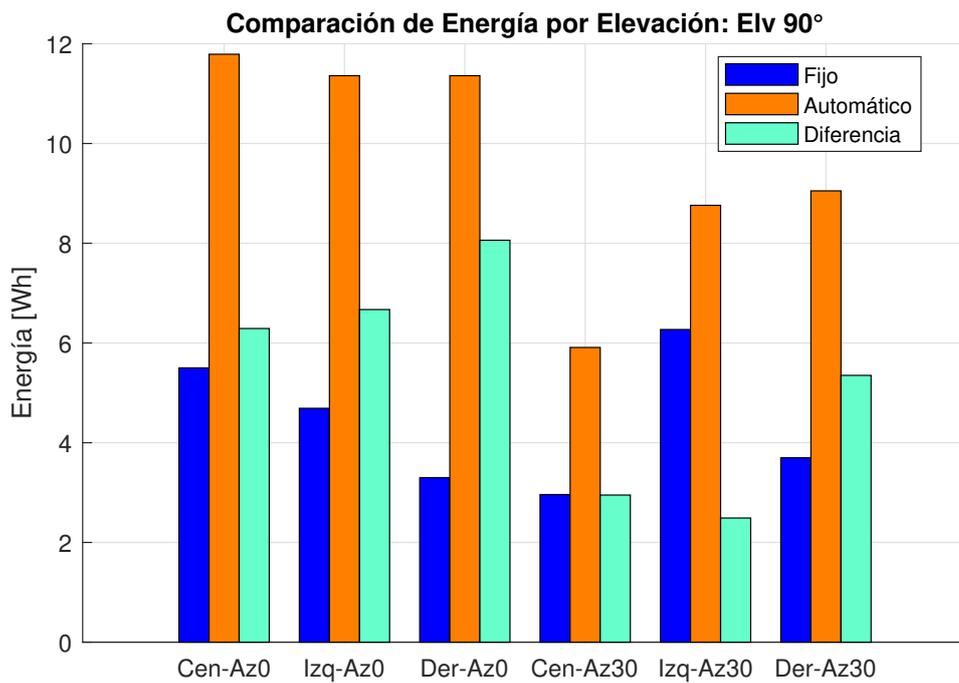


Figura 5.10 Energía Elevación 90

Tipo	Azimut	Elv 0 [Wh]	Elv 40 [Wh]	Elv 90 [Wh]
Central	0	11.02	8.06	5.5
Izquierda	0	10.37	8.62	4.69
Derecha	0	8.99	6.56	3.3
Central	30	6.07	9.12	2.96
Izquierda	30	9.09	9.35	6.27
Derecha	30	10.31	7.22	3.7

Cuadro 5.1: Mediciones Paneles Fijo

Tipo	Azimut	Elv 0 [Wh]	Elv 40 [Wh]	Elv 90 [Wh]
Central	0	11.43	12.35	11.79
Izquierda	0	11.43	11.73	11.36
Derecha	0	11.43	11.73	11.36
Central	30	8.96	8.98	5.91
Izquierda	30	10.73	11.3	8.76
Derecha	30	11.47	9.16	9.05

Cuadro 5.2: Mediciones Paneles Automático

Métrica	Fijo (Wh)	Automático (Wh)	Diferencia (Wh)
Promedio por muestra	7.29	10.5	3.21
Total acumulado	131.2	188.93	57.73

Cuadro 5.3: Resultados suma del sistema

Capítulo 6

Conclusiones

El objetivo del siguiente trabajo se ha cumplido ya que se pudo hacer un entregable físico como aparato de prácticas experimentales en el área de sistemas de generación de energía en el cuál se pueden simular diversas combinaciones de factores desde el heliodón, como son el transcurso del día, las estaciones del año. Con los módulos de paneles solares se puede comparar ejemplos como paneles fijos, y seguidores de uno o dos ejes.

El prototipo realizado sobre el sistema propuesto en esta investigación, mostró conclusiones en el área de la generación fotovoltaica, como la mejora del algoritmo de seguimiento del sol y que se puede mejorar el aprovechamiento de este tipo de energía con un seguidor eficiente, esto influye en la enseñanza dentro de la Facultad de Ingeniería, tanto como con los alumnos que puedan hacer uso del sistema desarrollado, como en el estudio del siguiente trabajo que puede influir en el diseño y la implementación en sistemas de energía renovable.

Para futuros trabajos y propuestas complementarias, se recomienda implementar un sistema de medición continua que registre la irradiancia solar y la producción de energía de cada panel solar a intervalos regulares, permitiendo comparar el rendimiento de diferentes configuraciones. Además, es esencial monitorear el ángulo de inclinación de los paneles seguidores en relación con la posición del sol para evaluar su eficiencia comparativa con los paneles fijos. Complementariamente, se deben registrar las condiciones meteorológicas, como la nubosidad y la temperatura, para correlacionar estos datos con el rendimiento de los paneles, proporcionando una visión integral y detallada de la eficiencia del sistema bajo diversas condiciones ambientales.

Con esta sistema se ofrece a los estudiantes una oportunidad para comprender en profundidad los principios de la energía solar y su aplicación en la generación de electricidad. Al interactuar con el sistema y observar cómo la orientación de los paneles afecta la cantidad de energía captada, los estudiantes adquieren conocimientos prácticos y habilidades relevantes para el diseño y la implementación en sistemas de energía renovable, que toma importancia en la situación climática actual.

Futuras investigaciones pueden abordar el tema de control usando la medición en diferencia de potencial en los paneles como parámetro de optimización para el aprovechamiento de la energía solar, puede tomarse como base las librerías y algoritmos utilizados en este documento.

Además, la posibilidad de automatizar el seguimiento de la luz solar proporciona una experiencia realista y dinámica que prepara a los futuros ingenieros para abordar los desafíos actuales. Su implementación no solo contribuirá al desarrollo de conocimientos teóricos, sino que también preparará a los estudiantes para enfrentar los desafíos actuales en el campo de la energía sostenible.

Capítulo 7

Documentación

La información de códigos y planos sobre el primer prototipo estuvo disponible desde el 15 de junio del 2024 en el repositorio de github:

<https://github.com/pablovi33/HelioPanel> en la etapa de su elaboración, para evitar confusiones y temas de copias indebidas se retiró de la visibilidad pública el día 2 de diciembre del 2024.

7.1 Códigos

Los códigos involucrados en el desarrollo del sistema fueron de dos tipos: los necesarios para poder hacer que los microcontroladores del sistema funcionen, que son 5: 3 para los paneles solares automatizados, uno más para la instancia de servidor web que hace de interfaz para los movimientos del usuario, y por último el del carro del heliodón automatizado. Para el procesamiento de datos se usaron 2 códigos m ejecutados en MATLAB, el primero procesa los datos obtenidos de corriente, voltaje y cálculo de la potencia de los paneles en varias combinaciones. En primer lugar se hacen dos grandes diferencias, en donde el panle se encuentra fijo en una posición horizontal respecto al suelo y otra con mecanismo de seguimiento activo, en estas dos configuraciones se toman en cuenta más opciones posibles como cambio de azimut, elevación y posición, estas variantes en la medición se realizaron tomando el recorrido del sol a lo largo del día midiéndolo con grados, se comienza con 20° y hasta 20° , con muestras cada 10° , dando un total de 36 gráficas, además de un segundo código que compila los resultados de energía obtenida de las mediciones y sus configuraciones.

7.1.1 Microcontroladores

Retomando la introducción se colocarán los códigos necesarios para que el sistema pueda funcionar

```

//#include <MemoryFree.h>

#include <esp_now.h> //comunicacion inalAmbrica
#include <WiFi.h> //comunicacion inalAmbrica Dependencia directa
#include <Wire.h> //comunicacion I2C Dependencia directa
#include <stdio.h>
#include <string.h>

uint8_t broadcastAddress1[] = {0x78, 0xEE, 0x4C, 0x01, 0xF4, 0x90};
uint8_t broadcastAddress2[] = {0xD4, 0x8A, 0xFC, 0xCC, 0xE6, 0x3C};
uint8_t broadcastAddress3[] = {0xEC, 0x64, 0xC9, 0x5C, 0xED, 0x6C}; //modulo del sol

```

Listado 7.1: Bibliotecas y direcciones código Paneles

```

void giro(int selMotor,int dir,int retardo,int tiempo) {

    switch(selMotor){
        case 0:
            digitalWrite(habi_1, 1); // Deshabilita el Driver
            digitalWrite(habi_2, 1); // Deshabilita el Driver
            digitalWrite(habi_3, 1); // Deshabilita el Driver
            break;

```

Listado 7.2: función giro

En el segmento 7.2 se muestra el comienzo de la función giro, se enlistan 7 casos correspondientes a las 7 posibilidades de encendido de los 3 motores, en código BCD¹ de 3 bits.

¹Binary coded decimal

```
if( dir==0){
    digitalWrite(dirPin_1, 0); // direccion de giro 0
    digitalWrite(dirPin_2, 0); // direccion de giro 0
    digitalWrite(dirPin_3, 0); // direccion de giro 0
    for(int i=0;i<tiempo;i++){ // da pasos por un tiempo
        digitalWrite(stepPin_1, 1);
        digitalWrite(stepPin_2, 1);
        digitalWrite(stepPin_3, 1);
        delayMicroseconds(retardo);
        digitalWrite(stepPin_1, 0);
        digitalWrite(stepPin_2, 0);
        digitalWrite(stepPin_3, 0);
        delayMicroseconds(retardo);
    }
}

else if(dir==1){
    digitalWrite(dirPin_1, 1); // direccion de giro 1
    digitalWrite(dirPin_2, 1); // direccion de giro 1
    digitalWrite(dirPin_3, 1); // direccion de giro 1
    for(int i=0;i<tiempo;i++){ // da pasos por un tiempo

        delayMicroseconds(retardo);
        digitalWrite(stepPin_1, 0);
        digitalWrite(stepPin_2, 0);
        digitalWrite(stepPin_3, 0);
        delayMicroseconds(retardo);
        digitalWrite(stepPin_1, 1);
        digitalWrite(stepPin_2, 1);
        digitalWrite(stepPin_3, 1);
        // el orden de la onda cuadrada no altera el giro
    }
}

selMotor=0;
}
```

Listado 7.3: función giro

Para el segmento 7.4 es una sección donde se determina el giro del motor a pasos anidado con un ciclo for que es el responsable de generar la onda cuadrada para controlar la velocidad de los motores a pasos.

```
void giro1(int selMotor,int dir,int RAMP,int l_SUP,int l_INF,int tiempo=200,int inc = 1){  
    //rampa ascendente  
    for(int g=l_SUP;g>l_INF;g=g-inc){  
        giro(selMotor,dir,g,RAMP);//vel tiempo  
    }  
  
    giro(selMotor,dir,l_INF,t tiempo);//vel tiempo  
  
    for(int g=l_INF;g<l_SUP;g=g+inc){  
        giro(selMotor,dir,g,RAMP);//vel tiempo  
    }  
}
```

Listado 7.4: función giro1

En el uso de control de velocidad de los motores a pasos se utiliza una función secundaria llamada giro1 que utiliza la función giro para poder hacer un perfil de acción donde el motor comience en una velocidad inicial, pueda aumentar la velocidad, mantenerla cierto tiempo y disminuirla.

```

void AutoP(float tolHOR =45,float tolVER =2){

    int paso=0;
    int limAzi=0;
    int limEle=0;

    int edo_S_A;
    int edo_S_B;
    int edo_S_C;
    int edo_S_D;

    for(int g=0;g<160000;g++){

        #####Panel FV#####
//
//      +-----+
//      |   S_A   |
//      |         |
// Engrane | S_D   S_B |
//      |         |
//      |   S_C   |
//      +-----+
//
        int S_A = analogRead(36); // 0,2500 pos hor: 450
        int S_B = analogRead(33); // 0,3200 pos hor: 400
        int S_C = analogRead(32); // 0,2500 pos hor: 900
        int S_D = analogRead(39); // 0,2500 pos hor: 900

        int difAzi = S_B-S_D; //Obtener el promedio distinto entre los fotoRes de derecha e
        ↪ izquierda
        int difElev = S_A-S_C; //Obtener el promedio distinto entre los fotoRes de abajo y
        ↪ arriba

        switch(paso){
            case 0:
                //movimiento Horizontal
                if(abs(difAzi)>tolHOR){
                    if(difAzi>0){

                        giro1(1,1,2,901,900,0,1); //mueve mot2
                        delay(2);
                    }else{
                        giro1(1,0,2,901,900,0,1); //mueve mot2
                        delay(2);
                    }
                }else{
                    paso=1;
                }
                break;
            case 1:
                //movimiento Vertical
                if(abs(difElev)>tolVER){
                    if(difElev<0){
                        giro1(2,1,2,901,900,0,1); //mueve mot2
                        delay(2);
                    }else{
                        giro1(2,0,2,901,900,0,1); //mueve mot2
                        delay(2);
                    }
                }else{
                    paso=2; //rompe ciclo for
                }
                break;

            case 2:
                //nada
                g=160000;
                break;
        } //fin switch
    } //fin de g
} //fin auto

```

la siguiente sección está 7.5 se muestra la serie de pasos que el microcontrolador usa con las lecturas analógicas con los fotoresistores y la disposición de los mismos. Siguiendo de eso se inicia la comunicación serial, configura pines de entrada/salida, establece el modo Wi-Fi como estación y activa ESP-NOW. Registra tres dispositivos para comunicación inalámbrica y deja listos los pines para controlar tres motores paso a paso.

En el ciclo infinito del código verifica si un valor de la comunicación establecida por el protocolo ESP-NOW se repite tres veces seguidas; si es así, lo reinicia a cero. Luego envía los datos y espera brevemente antes de repetir el ciclo.

```
void serialEvent() {

    while (Serial.available()) {
        // Lectura de datos del Serial3
        char inChar = Serial.read();
        // Salida de los datos leídos en el puerto serie
        Serial.write(inChar);
        // Buscamos si recibimos un ON o un OFF desde la Web para actuar o no el LED de la Mega(debe
        ↪ estar entre corchetes [])
        inString += inChar;
        if (inChar == ']') {
            if (inString.indexOf("[ON]")>0) {
                datos.comm0 = 44;
            }
            else if (inString.indexOf("[OFF]")>0) {
                datos.comm0 = 0;
            }
            else if (inString.indexOf("[R3IZQ]")>0) {
                datos.comm0 = 67;
            }
        }
    }
}
```

Listado 7.6: Fragmento de función Serial Event

En el fragmento 7.6 se muestra un fragmento de la función Serial Event, en la cual se puede apreciar como se reciben los datos seriales recibidos por el microcontrolador ESP8266 y se convierten para ser reenviados por comunicación inalámbrica, el microcontrolador envía los mismos datos a los 3 dispositivos periféricos, para que se puedan ejecutar instrucciones individualmente, se han utilizado identificadores diferentes para cada acción, como este código pertenece al panel central, si es necesario ejecutar un movimiento, no se usa la comunicación inalámbrica, sino que hay casos que cuando la instrucción se recibe mediante via serial se ejecuta localmente.

7.1.2 Cálculos código m

Para la obtención de las gráficas y el cálculo de la energía aproximadamente en un día del sistema, se tomó en cuenta un promedio de 7 horas con luz solar en México, y se hizo una muestra de 15 valores para cada toma de datos.

```

clc; % Limpia consola
cd('ruta\a\la\carpeta ');
base = 'ruta\a\mediciones\';

ejeX = linspace(0, 7, 15);

% Carpetas con mediciones
folders = {'FijoAz0', ...
'AutoAz0', 'AutoAz30'};

% Celdas para datos
volt = {}; corr = {}; pot = {};

% Recorrer carpetas
for i = 1:numel(folders)
    folder = fullfile(base, folders{i});
    files =
    dir(fullfile(folder, '*.txt'));

    for k = 1:numel(files)
        name = files(k).name;

        if contiene_PC(name)
            if termina_en_V(name)
                volt{end+1} = cargar_datos(name);
            elseif termina_en_I(name)
                corr{end+1} = cargar_datos(name);
            end
        end
    end
end

end

% Calcular potencia: V * I
for i = 1:numel(volt)
    pot{i} = volt{i} .* corr{i};
end

% Graficar voltaje
figure; hold on;
for i = 1:numel(volt)
    plot(ejeX, volt{i});
end

% Graficar corriente
figure; hold on;
for i = 1:numel(corr)
    plot(ejeX, corr{i});
end

% Graficar potencia
figure; hold on;
for i = 1:numel(pot)
    plot(ejeX, pot{i});
end

% Calcular energía bajo cada curva
for i = 1:numel(pot)
    energia(i) = trapz(ejeX, pot{i});
end

```

Figura 7.1 código m para gráficas

```

clc %borra prompt
% Datos por elevación
yFijo = fijo(:, i);
yAuto = auto(:, i);
yDif = diferencia(:, i);

% Posiciones para las barras
x = 1:length(etiquetas);
barWidth = 0.25;

bar(x - barWidth, yFijo, barWidth,
    'FaceColor', [0.0 0.0 1.0],
    'DisplayName', 'Fijo');% Azul
bar(x, yAuto, barWidth, 'FaceColor',
    [1.0 0.5 0.0],
    'DisplayName', 'Automático');
% Naranja
bar(x + barWidth, yDif, barWidth,
    'FaceColor', [0.4 1.0 0.8],
    'DisplayName', 'Diferencia');
% Verde aqua

fprintf('\n—— Diferencias de
Energía (Automático - Fijo) ——\n');
for i = 1:length(etiquetas)
    fprintf('%s:\n', etiquetas{i});
    for elv = 1:3
        fprintf(' %s → %.2f Wh\n',
            elevaciones{elv},
            diferencias(i, elv));
    end
end

```

Figura 7.2 código m para conclusiones

En el segmento 7.1 se muestran los ciclos que se necesitan para extraer la información, hacer los cálculos para obtener la potencia y energía en cada caso y procesarlas en gráficas. Se comienza por el panel central y posteriormente para el izquierda y derecha, para éstos dos últimos el código se ha omitido porque tiene la misma estructura.

Para el cálculo de la energía, se han elaborado arreglos de los datos obtenidos de 7.1 para hacer unas gráficas y tablas que salen de la ejecución de 7.2.

Bibliografía

- Anónimo, A. (2023). La generación con celdas fotovoltaicas en México. *Revista de Energía Solar*, 27(3), 45-52.
- Chapman, S. J. (2012). *Maquinas Electricas* (M. G. Hill, Ed.; 5th). <https://www.mheducation.com/>
- da Rosa Aldo V. (2005). *Fundamentals of Renewable Energy Processes* (1st). ELSEVIER. www.elsevier.com
- Dulhoste, J.-F. (2013). *Introducción al Control de Procesos para Ingenieros*. *Energía solar fotovoltaica*. (2007). FC Editorial.
- Foster, R., Ghassemi, M., & Cota, A. (2010). *SOLAR ENERGY Renewable Energy and the Environment*. www.crcpress.com
- IBM. (2021). *Cliente y servidor*. <https://www.ibm.com/docs/es/aix/7.1?topic=systems-client-server>
- IEA. (2023). *Solar PV* [Fecha de acceso: 21 de febrero de 2024]. <https://www.iea.org/energy-system/renewables/solar-pv>
- IP Dinámica: Seguridad y Flexibilidad en la Conexión a Internet*. (2023). <https://www.accessq.com.mx/pi-dinamica/>
- Jutglar Banyeras, L. (2013). *Generación de energía solar fotovoltaica*. Marcombo.
- Khaligh, A., & Onar, O. C. (2010). *ENERGY HMVESfMG Solar, Wind, and Ocean Energy Conversion Systems*. CRC Press. www.crcpress.com
- Kreith, F., & Goswami, Y. D. (2007). *Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy* (1ª ed.). Taylor Francis, LCC.
- López, G., Margni, S., Gonzalo, T. I., Ing, T., & Carlos, M. (2004). *Construcción de Robots a Bajo Costo Funcionamiento de microcontroladores Introducción al funcionamiento básico de microcontroladores PIC*. <http://www.fing.edu.uy/~pgconrob>
- Philibert, C., Agency., I. E., for Economic Co-operation, O., & Development. (2011). *Solar energy perspectives*. OECD/IEA.

- Secretaría de Energía (México). (2023). *Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (Prodesen) 2023, Anexo 1* (Informe Técnico). Secretaría de Energía. Ciudad de México, México.
- Shahidehpour, M., & Wang, Y. (2003). *Communication and control in electric power systems applications of parallel and distributed processing* (Wiley-Interscience, Ed.; First). IEEE press.
- Systems, E. (s.f.). *esp_now*. Consultado el 4 de abril de 2024, desde https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/stable/esp32/api-reference/network/esp_now.html#_CPPv427esp_wifi_config_espnow_rate16wifi_interface_t15wifi_phy_rate_t
- Sánchez, L. O. (2023). *¿Qué es una dirección IP estática?* <https://nordvpn.com/es/blog/que-es-una-ip-estatica/>
- ¿Que es una direccion MAC?* (s.f.). <https://help.gnome.org/users/gnome-help/stable/net-macaddress.html.es>