



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE INGENIERÍA

**“DESARROLLO DE SISTEMA DE POSICIONAMIENTO AUTOMÁTICO APLICADO A PANEL
SOLAR”**

TESIS

QUE COMO PARTE DE LOS REQUISITOS PARA OBTENER EL GRADO DE:

INGENIERO ELECTROMECAÁNICO

CON LINEA TERMINAL EN:

DISEÑO Y MANUFACTURA

PRESENTA

CITLALY SULEM CONTRERAS CHÁVEZ

DIRIGIDA POR:

DR. ARTURO YOSIMAR JAEN CUELLAR

San Juan del Río, Querétaro, enero 2021.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CAMPUS SAN JUAN DEL RÍO



PONER NOMBRE DE TESIS

TESIS

Como parte de los requisitos para obtener el título de

INGENIERO ELECTROMECAÁNICO

Línea Terminal

DISEÑO Y MANUFACTURA

Presenta

CITLALY SULEM CONTRERAS CHÁVEZ

Dirigido por:

DR. ARTURO YOSIMAR JAEN CUELLAR

SINODALES:

DR. ARTURO YOSIMAR JAEN CUELLAR (11825)
Presidente

DR. DAVID ALEJANDRO ELVIRA ORTÍZ (16323)
Secretario

DR. JUAN JOSÉ SAUCEDO DORANTES (15647)
Vocal

DR. ROQUE ALFREDO OSORNIO RÍOS (5620)
Suplente

Four handwritten signatures are placed on horizontal lines to the right of the jury members' names. The signatures are: 1. A signature that appears to be 'M. Jaen' above the first line. 2. A signature above the second line. 3. A signature above the third line. 4. A signature above the fourth line.

San Juan del Río, Qro., enero 2021.

Resumen

En los últimos años el consumo excesivo de los combustibles fósiles ha causado alteraciones en la Tierra, como lo es el efecto invernadero, es por eso, que se han buscado soluciones que sustituyan el uso de los combustibles fósiles. A consecuencia de esto se han empezado a estudiar las energías renovables, las cuales se encuentran en el ambiente, estas energías las podemos encontrar en el viento, en el sol, en las corrientes de agua, etc., una de las tantas ventajas de estas energías, es que su uso no produce gases que afecten a la capa de ozono. En este trabajo se busca aprovechar la energía proveniente del sol, mediante un sistema de posicionamiento automático aplicado a un panel solar, en la metodología se implementa el sistema de control en la plataforma de desarrollo Arduino, la implementación de sensores ambientales de luz y UV. Se realizaron pruebas para validar la metodología descrita del sistema en un ambiente controlado y en condiciones reales de sol. La aplicación del sistema será en el Centro Académico y de Tecnología Avanzada Sustentable (CATAS), centro que busca ser un edificio sustentable, y que trabaja con proyectos relacionados con las energías renovables, sin embargo, el proyecto puede ser aplicado en la industria, escuelas, casas, etc.

(Palabras claves: Energías renovables, energía solar, panel solar, radiación, sensores ambientales, sistema de control).

Dedicatorias

A mi familia por el apoyo incondicional que me han brindado durante años, en especial a mi mamá, que siempre ha estado para mí apoyándome en cada paso que doy.

A cada una de las personas que han creído en mí y me han ayudado a llegar hasta donde estoy el día de hoy.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

Agradecimientos

A mi mamá por el soporte, los consejos, la paciencia y el amor incondicional que me da en cada paso que doy. A mi papá por el apoyo que me ha brindado hasta el día de hoy. A mis hermanos, Jahir, Yoel y Axel por siempre estar para mí.

A mis tíos, que han sido un pilar importante en mi formación tanto académica como personal.

A mi asesor el Dr. Arturo Yosimar, por darme la confianza de formar parte del proyecto, por la paciencia que tuvo conmigo durante este proceso, por la entrega, las enseñanzas, consejos y comentarios que me brindó para que este proyecto fuera posible.

A mis sinodales, Dr. Roque, Dr. David, Dr. Juan José, por el aporte y la entrega que le brindaron al proyecto, así mismo por los comentarios y correcciones que hicieron para mejorar el trabajo.

A mis compañeros y amigos, por brindarme su apoyo, pero sobre todo por brindarme su amistad, risas, y tantas aventuras que aligeraron el trayecto.

A cada uno de los profesores que fueron parte importante en mi desarrollo como estudiante, porque no desistieron en compartir sus conocimientos conmigo.

A Hilario por las enseñanzas que me brindó durante mi servicio social. Al personal administrativo, por todo el apoyo brindado durante mi estancia en la universidad.

A cada una de las personas que me he cruzado en el camino y que gracias a ellas he llegado hasta aquí.

Índice general

Resumen	i
Dedicatorias	ii
Agradecimientos.....	iii
Índice general.....	iv
Índice de tablas	vii
Índice de figuras.....	viii
Capítulo 1	1
Introducción.....	1
1.1 Antecedentes	4
1.2 Objetivos	7
1.2.1 Objetivo General.....	7
1.2.2 Objetivos Particulares	7
1.3 Descripción del problema.....	8
1.4 Justificación del Problema	9
1.5 Hipótesis	10
1.6 Planteamiento general del proyecto.....	10
1.6.1 Revisión de la literatura y documentos técnicos	10
1.6.2 Diseño de prototipo mecánico para posicionamiento de panel solar	11
1.6.3 Armado de estructura del panel solar	11
1.6.4 Integración de tarjeta Arduino y sensores de parámetros ambientales para retroalimentación del sistema	11
1.6.5 Verificación de la funcionalidad del sistema de posicionamiento.....	12
Capítulo 2.....	13
Revisión de literatura.....	13
2.1 Energía Solar	13
2.2 Celdas Fotovoltaicas.....	13
2.3 Energía solar fotovoltaica.....	15
2.4 Efecto fotovoltaico.....	15

2.5 Panel solar	16
2.6 Trayectoria solar	17
2.7 Parámetros eléctricos	17
2.7.1 Tensión de circuito abierto VOC	18
2.7.2 Corriente de corto circuito ISC:	18
2.7.3 Potencia	19
2.8 Factores ambientales en la generación fotovoltaica	20
2.8.1 Efectos de la temperatura	20
2.8.2 Radiación solar	21
2.8.3 Irradiancia	22
2.9 Ángulo de inclinación	22
2.10 Sistemas de posicionamiento.....	23
2.10.1 Seguidores de un eje	23
2.10.2 Seguidores de dos ejes	23
Capítulo 3.....	24
Metodología.....	24
3.1 Diseño del sistema de posicionamiento automático.....	25
3.2 Desarrollo de estructura mecánica.....	27
3.3 Sistema de posicionamiento	32
3.3.1 Actuadores.....	33
3.3.2 Sensores.....	33
3.4 Implementación en software	35
3.5 Validación del sistema de posicionamiento automático	50
Capítulo 4.....	51
Resultados	51
4.1 Resultados del diseño de posicionamiento automático.....	51
4.2 Resultado de la estructura mecánica	51
4.3 Resultados del sistema de posicionamiento	52
4.3.1 Actuadores.....	52
4.3.2 Sensores.....	53
4.4 Resultado de la validación del sistema de posicionamiento automático	54

4.4.1 Resultados numéricos del código implementado en IDLE de Arduino...	54
4.4.2 Resultados gráficos del código implementado en IDLE de Arduino.....	56
Capítulo 5.....	63
Conclusiones y prospectivas.....	63
Referencias.....	65

Dirección General de Bibliotecas UAQ

Índice de tablas

Tabla 1. Resumen de energías renovables y fuente de origen	1
Tabla 2 Tipos de energía solar activa	2
Tabla 3 Tipos de celdas	14
Tabla 4 Tipos de paneles solares.....	16
Tabla 5 Especificaciones UVM30A (elaboración propia).....	34
Tabla 6 Especificaciones LM393 (elaboración propia)	35
Tabla 7 Datos del Monitor Serial (elaboración propia)	55

Dirección General de Bibliotecas UAQ

Índice de figuras

Figura 1 Diagrama general de la metodología	10
Figura 2 Tipos de celdas	14
Figura 3 Energía solar fotovoltaica	15
Figura 4 Efecto fotovoltaico	16
Figura 5 Trayectoria solar	17
Figura 6 Tensión de circuito abierto	18
Figura 7 Corriente de corto circuito	18
Figura 8 Clasificación de la radiación	22
Figura 9 Diagrama general de la metodología	24
Figura 10 Base inferior	25
Figura 11 Base superior	25
Figura 12 Base de la estructura	25
Figura 13 Estructura panel solar	26
Figura 14 Diseño de estructura	26
Figura 15 Corte de barra	27
Figura 16 Maquinado de barra	27
Figura 17 Barra con rodamiento	27
Figura 18 Soldado de placa y barra	28
Figura 19 Maquinado de soporte rodamiento	28
Figura 20 Unión base superior e inferior	29
Figura 21 Incorporación perfil Bosch	29
Figura 22 Soporte panel solar	30
Figura 23 Integración de actuador lineal	30
Figura 24 Revisión del actuador lineal	31
Figura 25 Acopladores	31
Figura 26 Llave Allen	31
Figura 27 Integración de actuador rotativo	32
Figura 28 Estructura	32
Figura 29 Diagrama de sistema de posicionamiento	33
Figura 30 Módulo de sensor UV (UVM30A)	34
Figura 31 Módulo de Sensor LDR (LM393)	35
Figura 32 Implementación de Software	36
Figura 33 Asignación de pines de Arduino para canales de <i>encoder</i> y sensores LDR y UV.	37
Figura 34 Definición de variables en tarjeta Arduino de zonas en el panel.	38
Figura 35 Asignación de pines de Arduino para control de inclinación.	39
Figura 36 Función "ldrSensor()" de lectura y fusión de sensores LDR y UV.	41
Figura 37 Función "setRef()" para definir las referencias de los lazos de control. .	42

Figura 38 Parámetros de los controladores.....	44
Figura 39 Rutina del servicio de interrupción para la detección de flancos del <i>encoder</i> y definición de cuentas.....	45
Figura 40 Máquina de estados para la decodificación de posición del <i>encoder</i>	46
Figura 41 Función “CounterPosition()” que define la cuenta positiva o negativa del <i>encoder</i>	47
Figura 42 Función “setDirControl()” para definir el sentido de giro de los motores.....	47
Figura 43 Control PI para rotación del sistema en lazo cerrado.....	48
Figura 44 Control PI para inclinación del sistema en lazo cerrado.....	49
Figura 45 Ciclo principal infinito en el que los controladores son llamados.....	50
Figura 46 Diseño final de estructura.....	51
Figura 47 Resultado final estructura mecánica	52
Figura 48 Validación de actuador lineal	52
Figura 49 Datos de las variables, mostrados en el “Monitor Serial” de Arduino	54
Figura 50 Señal de inclinación, prueba 1	57
Figura 51 Señal de rotación, prueba 1	58
Figura 52 Señal de inclinación, prueba 2	59
Figura 53 Señal de rotación, prueba 2	59
Figura 54 Señal de inclinación, prueba 3	60
Figura 55 Señal de rotación, prueba 3	61
Figura 56 Señal de inclinación, prueba 4	61
Figura 57 Señal de rotación, prueba 4	62

Capítulo 1

Introducción

En los últimos años el consumo de las energías provenientes de los combustibles fósiles como lo son; el carbón, el petróleo y el gas natural han ido en aumento, causando así que las emisiones masivas realcen el efecto invernadero. En consecuencia, esto puede provocar que la temperatura mediana terrestre aumente y, si esta situación se mantiene en el tiempo, se produce lo que denominamos calentamiento global y cambio climático (González, 2012).

Por tal motivo, se comenzó a estudiar el uso de las energías denominadas renovables. Las energías renovables son aquellas que podemos encontrar de manera natural en el ambiente, a diferencia de los combustibles fósiles estas energías son libres de emisiones de gases contaminantes e inagotables a escala humana. Este tipo de energías se diferencian de los combustibles fósiles principalmente por su diversidad, abundancia y potencial de aprovechamiento, pero sobre todo en que no producen gases de efecto invernadero (“ENERGÍAS RENOVABLES”, s.f.). Entre las energías renovables o también llamadas energías limpias encontramos las que se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Resumen de energías renovables y fuente de origen

(Fuente: <https://www.acciona.com/es/energias-renovables/>)

Energía renovable	Fuente
Energía eólica	Viento
Energía solar	Sol
Energía hidráulica o hidroeléctrica	Ríos y corrientes de agua dulce
Biomasa y biogás	Materia orgánica
Energía geotérmica	Energía calorífica contenida en el interior de la Tierra
Energía mareomotriz	Mareas

Las energías renovables ya no son un tema de análisis y experimentación, son una realidad, ya que están en constante progreso, aumentando de esta manera su producción y cobertura. Debido a la cantidad de tipos de energía alternas y su extensa disponibilidad, existen tecnologías que hacen uso de estas energías, como es el caso de la energía solar, cuyos costes se han ido reduciendo significativamente de forma que ya son plenamente competitivas.

La energía solar se clasifica dependiendo de las características de su tecnología, en función de cómo se captura, convierte y distribuye (“Tipos de Energía Solar”, s.f.). Por lo que, dentro de la energía solar podemos encontrar la siguiente clasificación; energía solar pasiva y la energía solar activa.

Nos referimos a la energía solar pasiva aquella energía que aprovecha el calor del sol de manera natural, sin la necesidad de transformarla, un claro ejemplo de ello son las cocinas solares. Por otro lado, la energía solar activa es aquella que transforma la energía del sol mediante captadores solares.

La energía solar activa se divide en diferentes tipos, los cuales podemos ver en la Tabla 2.

Tabla 2 Tipos de energía solar activa

(Fuente: <http://calefaccion-solar.com/tipos-de-energia-solar.html>)

Energía solar activa	Descripción
Energía solar fotovoltaica	Esta energía necesita un dispositivo llamado célula fotovoltaica, la cual sirve para producir energía eléctrica a partir de la radiación solar. Cabe mencionar que es el tipo de energía solar más comercial.
Energía solar térmica	Esta energía aprovecha la radiación solar mediante colectores solares.
Energía solar híbrida	Esta es la combinación entre la energía solar y cualquier otro tipo de tecnología, lo que hace que no dependa totalmente del sol.

La Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ), consciente de la problemática ambiental que se está viviendo, a través de sus distintos proyectos de investigación está llevando a cabo el desarrollo de tecnologías que involucran el uso de fuentes renovables como lo son la energía solar, eólica, hidráulicas entre otras. Entre los diferentes campus con los que cuenta la UAQ dentro del Estado de Querétaro, se cuenta con uno en el municipio de Tequisquiapan, el cual el 15 de diciembre de 2017 inauguró el Centro Académico y de Tecnología Avanzada Sustentable (CATAS). Este centro busca ser un edificio sustentable, por lo cual, se propone trabajar con proyectos relacionados con paneles solares y aerogeneradores para hacer uso de las energías solar y eólica respectivamente, esto para la producción de la energía eléctrica. Cabe mencionar que el CATAS de igual forma cuenta con calentadores solares y una planta de tratamiento de aguas residuales.

El municipio de Tequisquiapan se encuentra al sureste del Estado de Querétaro y su clima es considerado semiseco y templado, con una humedad intermedia, siendo el periodo principal de lluvias el verano, durante los meses de febrero, marzo y abril. La temperatura fluctúa entre los 18°C y los 37°C, registrándose temperaturas más altas en los meses comprendidos de abril a junio y temperaturas más bajas en los meses comprendidos de noviembre a enero. Por otro lado, los vientos dominantes son en dirección Noreste suroeste (“CLIMA: TEQUISQUIAPAN”, s.f.).

El presente trabajo se enfocará en desarrollar un proyecto que haga uso de la tecnología de paneles solares y como mejorar su proceso de conversión mediante el desarrollo de un sistema automático que permita realizar el posicionamiento del panel. Lo anterior se pretende lograr mediante la integración de una estructura mecánica que dará soporte al panel y que le permitirá realizar movimiento en dos grados de libertad (rotación e inclinación). Adicionalmente, se integrarán al sistema los elementos actuadores, sensores y el sistema de control. En cuanto a la integración de los sensores en esta propuesta, se tiene la ventaja que se llevará a cabo una fusión de señales de los sensores de luz utilizados. Específicamente, se

fusionarán las señales de una resistencia dependiente de la luz (LDR) y del sensor de luz ultravioleta (UV) usando señales estandarizadas mediante un filtro de complemento. Esto dará ventaja respecto a sistemas existentes que se basan en un solo sensor, causando inexactitud en su movimiento.

1.1 Antecedentes

En los últimos años el excesivo uso de las energías fósiles ha deteriorado de manera drástica al medio ambiente, es por eso que hoy día se busca crear conciencia de ello haciendo uso de las energías renovables. Cabe destacar que el aprovechamiento de las energías renovables como la energía solar ha tenido un aumento significativo en los últimos años, lo que ha provocado que la producción incremente, bajando de esta manera los costos de este tipo de tecnologías.

Conforme pasa el tiempo uno de los mayores retos es obtener el mejor aprovechamiento de los recursos naturales, por ejemplo; para un mejor aprovechamiento de la energía solar se pueden utilizar sistemas de posicionamiento, por tal motivo, no es de sorprenderse que alrededor del mundo, investigadores trabajen en este tema.

Con respecto al desarrollo de tecnología que ayude a realizar un mejor uso de la energía solar, en España, por ejemplo, se creó un sistema de seguimiento solar de dos ejes basado en el mecanismo de biela-manivela, el sistema se basa en un novedoso mecanismo cinemático movido mediante un conjunto de actuadores hidráulicos. El diseño ha permitido optimizar aspectos como la simplicidad, la resistencia mecánica, la fiabilidad y el mantenimiento del sistema (Palomar et al., 2009). Sin embargo, el uso de actuadores hidráulicos hace del sistema y su mantenimiento un tema que requiere conocimiento específico debido a que no se trata de actuadores comerciales de fácil adquisición y reemplazo.

Por otro lado, integrantes del Grupo de Investigación Sobre Automatización (GISA), en colaboración con el Área de Física de la Atmósfera y Radiación Solar, de Buenos Aires, Argentina, diseñaron un seguidor solar de dos ejes parametrizado por software de computadora. Este prototipo está constituido por cuatro etapas

principales; sistema electrónico, sistema electromecánico, software del microcontrolador y software de la PC. En este prototipo se utilizan dos motores de potencia, los cuales están controlados usando retroalimentación mediante un *encoder* que detecta el desplazamiento angular de un eje (Grassi et al., 2012). Con este tipo de trabajo se muestra que el uso de sensores y actuadores que den una retroalimentación al sistema puede ayudar a que el proceso de conversión ejecutado por el panel solar sea mejorado.

De igual forma en la universidad de Oriente, en Santiago Cuba, los ingenieros trabajaron en un seguidor solar, optimizando el aprovechamiento de la energía solar, diseñaron e implementaron un dispositivo que obtiene la coordenada del sol en cualquier momento del día, este seguidor consta de dos partes principales; una tarjeta controladora y una parte mecánica. Se basaron en el uso de fotorresistencias, microcontroladores y motores a pasos (Mechado et al., 2015). La limitante de este trabajo se observa en el uso de un tipo de sensor solamente, ya que se puede obtener más información de factores ambientales si se utilizan más sensores.

A nivel nacional se ha trabajado con el tema de la energía solar, buscando opciones que logren aprovechar de mejor manera esta energía. Por tal motivo, alumnos de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) desarrollaron el diseño y construcción de un mecanismo automatizado de dos ejes para el seguimiento de la trayectoria solar (Arroyo y Cortés, 2015). Dicho proyecto se basa en el estudio y medición de la radiación solar por medio de un pirheliómetro, el cual es un dispositivo de alto costo. Además, este sistema de posicionamiento es en realidad un sistema de seguimiento pasivo, es decir, para su movimiento se toma en cuenta el hecho de que la posición del sol es conocida.

Por otro lado, Ramírez (2017), analizó la cantidad de energía solar que incide en una superficie plana de forma diaria, mensual y anual, con diferentes esquemas de seguimiento del sol, y dos casos donde la superficie plana se mantenía sin movimiento, Sin embargo, en este caso los diferentes esquemas de

seguimiento del panel solar no son de forma automática, lo que lleva al usuario a mover el sistema de forma manual.

A nivel local, Vorobiev (2006), diseñó un sistema de orientación automática para un calentador solar plano y un panel fotovoltaico, siguiendo la trayectoria del sol. Sin embargo, este trabajo solo considera el uso de fotorresistencias para la retroalimentación del sistema de control.

Martínez (2015), implementó un sistema de celdas fotovoltaicas las cuales fueron instaladas en los laboratorios de automatización de la facultad de ingeniería de la UAQ para el alumbrado de dichos laboratorios, los cuales están interconectados con la red eléctrica. Sin embargo, al ser un sistema interconectado a la red eléctrica, se sigue pagando (aunque en menor cantidad) un recibo, de igual forma, los sistemas instalados no cuentan con un sistema de auto posicionamiento propio que mejore el proceso de obtención de energía, en este sentido el uso de un sistema de seguimiento puede ayudar a disminuir aún más el costo de dicho recibo de electricidad.

A pesar de los trabajos existentes, aún a nivel local, se tiene la necesidad de desarrollar sistemas para el auto posicionamiento de paneles solares ya que hoy en día las tecnologías permiten desarrollar sistemas de posicionamiento modulares, flexibles, de arquitectura abierta y con las características deseadas, para que dichos sistemas aprovechen al máximo la energía solar. Sería interesante explorar la mejora del sistema de posicionamiento mediante la fusión de las señales de distintos sensores para que generen una retroalimentación de la posición más confiable y robusta, compensando las debilidades de uno con las fortalezas de otro, a diferencia de sistemas existentes basados en un solo sensor. Por ejemplo, en el Campus Tequisquiapan de la Universidad Autónoma de Querétaro se tiene un centro de investigación llamado Centro Académico y de Tecnología Avanzada Sustentable (CATAS) en el que se realiza y desarrolla investigación enfocada en tecnologías sustentables, por lo que el desarrollo de este tipo de prototipos puede ser muy útil como plataforma de pruebas que permita dar continuidad a estudios e investigaciones dedicadas a este tema.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Desarrollar un prototipo de sistema de posicionamiento automático de captación de energía solar, mediante el desarrollo de una estructura mecánica, la integración de un panel solar, así como la integración de sensores, actuadores, tarjeta de control Arduino y una tarjeta de diseño propietario para adquisición y monitoreo de energía PQUAQ, que será montado en las instalaciones del centro de investigación CATAS.

1.2.2 Objetivos Particulares

- Realizar el diseño de un prototipo simple de sistema de posicionamiento de captación de energía solar, mediante software de diseño para integrar en el sistema mecánico un panel solar y actuadores.
- Construir el sistema de posicionamiento prototipo basado en el diseño de estructura mecánica e integrar los actuadores en el mismo para contar con una plataforma de pruebas real.
- Desarrollar un sistema de control de posición basado en la plataforma de desarrollo Arduino, a fin de obtener un sistema de posicionamiento automático dependiente del sol.
- Integrar en el sistema de posicionamiento el controlador basado en la plataforma Arduino e integrar los sensores en el sistema para dar retroalimentación de la posición más adecuada.
- Integrar en el sistema desarrollado la tarjeta de diseño propietario PQUAQ para el monitoreo de la energía eléctrica obtenida por el panel, para su posterior uso en estudios de calidad de la energía.
- Instalar y montar el prototipo diseñado en las instalaciones del centro de investigación CATAS para poder ejecutar pruebas de su funcionalidad.
- Validar el sistema desarrollado al ajustar su posición de manera automática en pruebas controladas y condiciones de sol real.

1.3 Descripción del problema

El estudio y los trabajos de investigación sobre la conversión de energía solar en energía eléctrica aún son amplios y no todos los problemas están resueltos. En cuanto al desarrollo de sistemas de seguimiento de sol existen diversas estructuras y dispositivos que se basan en el uso de motores y engranajes. Sin embargo, en la mayoría de los casos las instalaciones de montaje fijo del panel solar (con una orientación e inclinación definida para aprovechar la energía del sol lo mejor posible) siguen siendo las más aplicadas. En parte de esta situación es que la instalación fija es más fácil, simple y de menor costo, por ello el desarrollo de sistemas de posicionamiento solar se encuentra con la problemática a superar de lograr simplicidad, reducir costos y que sean de fácil desarrollo. A continuación, se presentan una serie de problemas en el manejo de sistemas basados en paneles solares comerciales de montaje fijo:

- Los sistemas comerciales de paneles solares son, en su mayoría, equipos de estructura estática y montaje fijo, por lo que, el aprovechamiento de la radiación solar es limitado.
- Los sistemas de posicionamiento comerciales basados en paneles solares son de arquitectura cerrada (solo el fabricante puede darles mantenimiento o actualización), causando que no sea posible modificar las funciones fijas del sistema, es decir, tienen una función limitada y definida que es el seguimiento del sol.
- Existen sistemas de posicionamiento y seguimiento del sol, basados en el acoplamiento de motores y engranajes, en general son sistemas complejos que requieren de mantenimiento específico, partes especiales y son sistemas más costosos.
- Los sensores de parámetros ambientales no son dispositivos exactos, tienen un margen de error, dependiendo del tipo de sensor y fabricante.
- Debido a la creación de un nuevo centro de investigación en el Campus Tequisquiapan de la UAQ, que tiene enfoque en el desarrollo de tecnologías sustentables, existe una necesidad de desarrollar sistemas prototipos

que ayuden a dar continuidad en el desarrollo de investigaciones nuevas y que den impulso a desarrollar nuevas metodologías y tecnologías.

1.4 Justificación del Problema

El desarrollo del presente proyecto de investigación tiene como objetivo desarrollar un prototipo de sistema de posicionamiento automático que tendrá características como simplicidad, facilidad de desarrollo, montaje y operación y un costo adecuado. A continuación, se presentan los aspectos importantes que justifican el desarrollo del proyecto:

- Aprovechar de mejor manera la radiación solar, mediante una estructura mecánica que permita realizar el posicionamiento del panel solar en dos grados de libertad: rotación e inclinación. Es decir, aprovechar la energía solar mediante un sistema de posicionamiento automático.
- El sistema prototipo será de arquitectura abierta, lo que permitirá al usuario saber cómo está constituido el sistema y cómo funciona, además de que se le podrá adicionar algún funcionamiento si se requiere en el futuro.
- El sistema prototipo será de diseño simple sin la complejidad que implican los sistemas de seguimiento de sol comerciales. El sistema tendrá dos grados de libertad que requerirán únicamente de dos actuadores (motor rotativo y actuador lineal) para su funcionamiento. Tanto la estructura mecánica como los actuadores usados y el controlador implementado serán elementos simples de conseguir y de bajo costo.
- El desarrollo de este prototipo será de gran utilidad como plataforma de pruebas para estudios e investigaciones relacionadas con la generación y calidad de energía que se llevan a cabo en el centro de investigación CATAS del Campus Tequisquiapan, ya que ahí se desarrollará investigación enfocada a tecnologías sustentables.

1.5 Hipótesis

El desarrollo de un prototipo de posicionamiento para un panel solar que integre distintos sensores, como LDR y UV, para la medición de la luz incidente, así como la integración de un sistema mecánico con actuadores rotativos y lineales, permitirá obtener un sistema funcional y simple para el posicionamiento automático respecto al movimiento del sol.

1.6 Planteamiento general del proyecto

El planteamiento general del proyecto se presenta mediante el diagrama general a bloques de la Figura 1, y así mismo se presenta la descripción detallada de cada bloque.

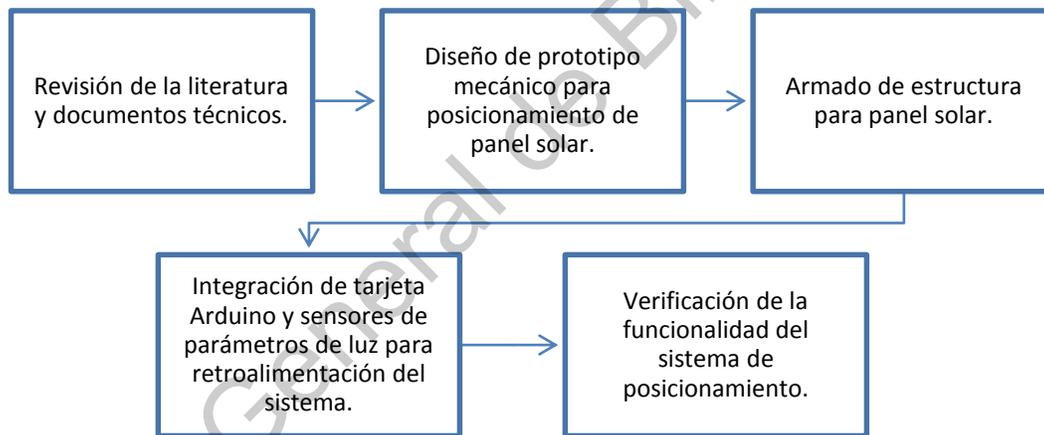


Figura 1 Diagrama general de la metodología

1.6.1 Revisión de la literatura y documentos técnicos

Es necesario tener un conocimiento de lo que se pretende realizar para llevar a cabo el proyecto, es por eso que el diagrama a bloques muestra al inicio de forma general una revisión de la literatura y documentación técnica. Primeramente, se revisará la literatura y documentos relacionados con el tema. Entre los aspectos a revisar se encuentran los sistemas de posicionamiento, características y tipos existentes de los mismos, también se investigará sobre sistemas de seguimiento de

sol, energía solar, tipos de energía solar, conversión de energía solar, paneles solares, y definiciones relacionadas con el tema tales como, azimut, altitud, radiación y temperatura, los cuales son temas y términos muy relacionados en el estudio de este tipo de proyectos.

1.6.2 Diseño de prototipo mecánico para posicionamiento de panel solar

Posterior a la revisión de la literatura tenemos el diseño del prototipo mecánico para el panel solar, en el cual se realizará el diseño y acondicionamiento de una base giratoria donde estará sentado el panel solar, el cual se desarrollará en el software de SolidWorks. El diseño de la estructura mecánica contempla el movimiento del panel solar en dos grados de libertad que son: orientación e inclinación del panel, por lo que, el diseño deberá contener una base giratoria donde estará sentado el panel solar, además deberá de contemplar la integración de los elementos actuadores del panel.

1.6.3 Armado de estructura del panel solar

Seguido del diseño del prototipo se definen, cortan y maquinan las piezas necesarias para la estructura, afinando los detalles necesarios. En el desarrollo de la estructura se contemplan los materiales y piezas a utilizar, tanto las piezas que se van a manufacturar en los laboratorios de la facultad, como aquellas piezas que se conseguirán de manera comercial.

1.6.4 Integración de tarjeta Arduino y sensores de parámetros ambientales para retroalimentación del sistema

A la par con el armado de estructura, se integra la tarjeta Arduino donde se programan y se condicionan los sensores de parámetros ambientales, tales como luz ambiental y radiación, los cuales nos sirven como retroalimentación para el sistema de control de posición.

1.6.5 Verificación de la funcionalidad del sistema de posicionamiento

Posteriormente a la integración de la tarjeta Arduino y los sensores de parámetros ambientales (luz) al sistema de posicionamiento automático, se realizan pruebas de funcionalidad para validar el desarrollo del sistema al ajustar su posición de manera automática.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

Capítulo 2

Revisión de literatura

2.1 Energía Solar

La energía solar es aquella que como su nombre lo indica tiene su origen en el sol; el sol emite una radiación que viaja a través del espacio en forma de fotones, los cuales cuando llegan a la Tierra se pueden percibir en forma de calor y de luz, por tal motivo es considerada como una energía sustentable, libre de emisiones e inagotable a escala humana, que por su infinito potencial y fácil acceso es una de las energías más prometedoras que existen hoy en día.

Los avances tecnológicos han traído sistemas que aprovechan esta energía solar y logran transformarla en electricidad, en los últimos años el coste de esta tecnología ha disminuido, logrando así su aprovechamiento.

2.2 Celdas Fotovoltaicas

La celda fotovoltaica también es llamada célula o fotocélula y es un dispositivo que convierte los fotones de la radiación solar que inciden sobre su superficie en energía eléctrica a través del efecto fotovoltaico.

Cuando estas celdas se agrupan en disposiciones serie-paralelo, se forman los paneles solares los cuales aumentan la producción de la energía eléctrica (Valentini, G. 2017).

Las celdas fotovoltaicas se clasifican según su composición como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3 Tipos de celdas

(Fuente: <http://greendates.com.mx/tipos-de-paneles-solares-energia-solar/>)

Celdas fotovoltaicas	Características
Monocrystalinas	Estas celdas se caracterizan por la forma circular u octagonal en la que se corta el cristal de silicio. Su costo es elevado por la dificultad del corte, sin embargo, son las celdas más eficientes que existen.
Policristalinas	Estas celdas se obtienen de un conjunto de partículas cristalizadas de silicio. Su costo no es elevado, sin embargo, no son tan eficientes como lo son las celdas monocrystalinas. Las celdas policristalinas se montan sobre marcos rígidos para poder protegerlas del deterioro.
Amorfás	Estas celdas son fabricadas con silicio no cristalizado, sobre una base que puede ser de diferentes materiales. Esta celda es la más económica de producir, sin embargo, se ve afectada su eficiencia.

En la Figura 2, se muestran los diferentes tipos de celdas antes descritas.



Figura 2 Tipos de celdas

(Fuente: <http://greendates.com.mx/tipos-de-paneles-solares-energia-solar/>)

2.3 Energía solar fotovoltaica

En la actualidad el avance tecnológico nos permite aprovechar esta energía, que además de no ser contaminante, como lo son las energías fósiles, no tiene costo, para ello existen tecnologías como lo son los paneles solares que almacenan estos fotones que llegan y los convierten en electrones.

Al incidir la radiación del sol sobre la célula fotovoltaica se produce una diferencia de potencial eléctrico entre ambas caras, como se muestra en la Figura 3, lo que produce que los electrones salten de un lugar a otro, generando de esta manera la energía eléctrica (ACCIONA, 2017).

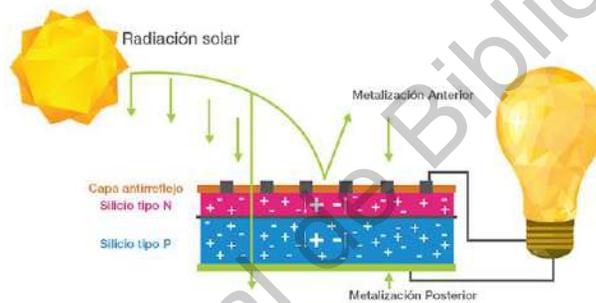


Figura 3 Energía solar fotovoltaica

(Fuente: enerbiomex.com/energía-solar/)

2.4 Efecto fotovoltaico

El efecto fotovoltaico es aquella transformación de la energía solar en energía eléctrica. Esto se consigue por medio del material empleado en los paneles fotovoltaicos por lo general silicio, el cual es un material semiconductor.

Para poder conseguir dicho efecto se emplean dos capas de un material semiconductor, las cuales tienen cargas eléctricas distintas la una de la otra, creando de esta manera un campo eléctrico, el cual, una vez que el material absorbe los fotones de la radiación solar y libera los electrones, ayuda a que estos cambien de posición, produciendo de esta manera energía eléctrica (Energía solar, 2017). En la Figura 4 podemos observar de forma ilustrativa el efecto fotovoltaico.

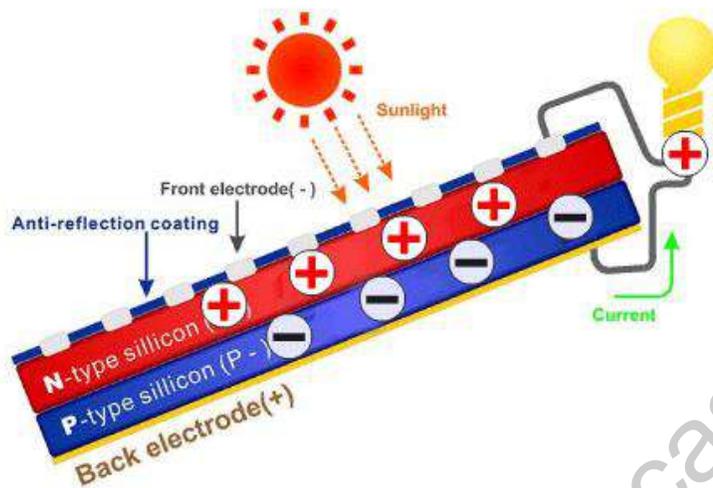


Figura 4 Efecto fotovoltaico

(Fuente: <https://www.certificadosenergeticos.com/energia-solar-beneficios-que-efecto-fotovoltaico>)

2.5 Panel solar

Los paneles solares son la composición de varias celdas solares conectadas entre sí, existen tres tipos de paneles solares como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4 Tipos de paneles solares

(Fuente: <https://www.acciona.com/es/energias-renovables/energia-solar/fotovoltaica/>)

Tipo de Panel	Características
Fotovoltaicos	Generadores de energía para las necesidades del hogar.
Térmicos	Se instalan en casa con recepción directa de sol.
Termodinámicos	Funcionan a pesar de la variación meteorológica, es decir, aunque este de noche, llueva o esté nublado.

Los paneles fotovoltaicos aprovechan la radiación del sol para generar energía eléctrica mediante el efecto fotovoltaico. La mayoría de los paneles

fotovoltaicos están constituidos por silicio que aprovechan la energía de los fotones que llegan con la radiación del sol para hacer saltar un electrón del silicio, los cuales generan la energía eléctrica.

2.6 Trayectoria solar

Al movimiento del sol, se le conoce como trayectoria solar, esto se debe al movimiento natural de la Tierra (rotación y traslación), respecto al sol, al igual que la inclinación del eje de rotación de la Tierra (Hernández, P. 2014).

En la Figura 5 podemos ver de forma gráfica la trayectoria del sol durante el invierno y verano.

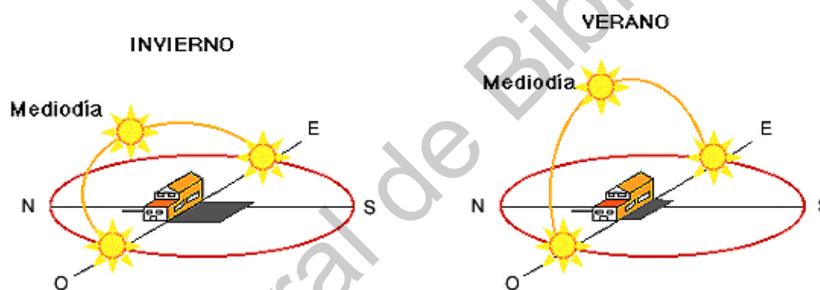


Figura 5 Trayectoria solar

(Fuente: pedrojhernandez.com)

El eje de rotación de la tierra no es siempre perpendicular al plano de su trayectoria de traslación con respecto al sol, sino que forma un ángulo variable dependiendo del momento del año en que nos encontremos (Escalante, 2012).

2.7 Parámetros eléctricos

Para la generación de energía eléctrica en las tecnologías fotovoltaicas se consideran varios parámetros importantes, entre ellos, por ejemplo, los eléctricos que a continuación se describen.

2.7.1 Tensión de circuito abierto VOC

Es la diferencia de potencial que se alcanza cuando una célula fotovoltaica es iluminada, sin estar conectadas las regiones P y N, como se muestra en la Figura 6, siendo proporcional a la iluminación recibida. Es el máximo valor de tensión de la célula.

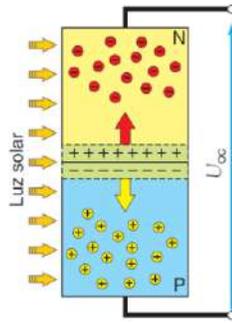


Figura 6 Tensión de circuito abierto

(Fuente: <https://ingelibreblog.wordpress.com/2014/11/09/influencia-de-la-irradiacion-y-temperatura-sobre-una-placa-fotovoltaica/>)

2.7.2 Corriente de corto circuito ISC:

Es aquella que se genera cuando las regiones P y N están unidas por un conductor exterior con una resistencia nula y es proporcional a la iluminación recibida, como se muestra en la Figura 7. Es el máximo valor de intensidad de la célula.

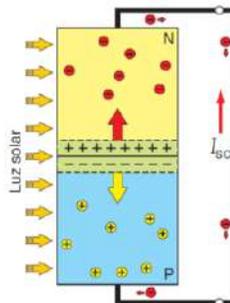


Figura 7 Corriente de corto circuito

(Fuente: <https://ingelibreblog.wordpress.com/2014/11/09/influencia-de-la-irradiacion-y-temperatura-sobre-una-placa-fotovoltaica/>)

2.7.3 Potencia

La potencia suministrada por la célula se expresa en la ecuación 1:

$$P_L = V_L * I_L \quad (1)$$

Donde:

$P_L =$ Potencia suministrada

$V_L =$ Tensión

$I_L =$ Intensidad

Se cumple que la tensión V_L y la intensidad I_L son siempre menores que la tensión de circuito abierto V_{oc} y la intensidad de corto circuito I_{sc} respectivamente.

Cuando se habla de la potencia máxima que se suministra en una célula se utiliza la siguiente ecuación 2.

$$P_{max} = V_{mpp} * I_{mpp} \quad (2)$$

Donde:

$P_{max} =$ Potencia máxima

$V_{mpp} =$ Tensión máxima

$I_{mpp} =$ Intensidad máxima

La potencia máxima en condiciones estándar de medida (CEM) o Standart Test Conditions (STC), que son temperatura de la célula 25°C, irradiancia 1000 W/m² y masa de aire (AM) 1.5, también se denomina potencia de pico de la célula.

Sin embargo, los sistemas fotovoltaicos raramente operan en condiciones estándar. Las condiciones de funcionamiento son muy variables, pudiendo variar en un rango de 0-1000 W/m² en el caso de la irradiancia y temperatura de la célula hasta 50°C superior a la temperatura ambiental.

La corriente de corto circuito de la célula es directamente proporcional a la irradiancia, disminuyendo a medida que se reduce la irradiancia. La tensión de

circuito abierto varía poco con la irradiancia, aunque también decrece, a efectos prácticos se puede considerar constante (Ingelibre, 2014).

La intensidad de cortocircuito I_{sc} , varía con la irradiancia, siendo esta variación lineal acorde a la ecuación 3:

$$I_{SC(G)} = G * \frac{I_{SC(CEM)}}{1000} \quad (3)$$

Donde:

$I_{SC(G)}$: intensidad de cortocircuito para una irradiación G (A)

$I_{SC(CEM)}$: intensidad de cortocircuito en condiciones CEM (A)

G : Irradiancia (W/m^2)

2.8 Factores ambientales en la generación fotovoltaica

Son factores generados por el medio ambiente que afectan en el funcionamiento de una célula fotovoltaica tal como la tensión, la intensidad y potencia generada por la misma.

2.8.1 Efectos de la temperatura

La temperatura es un factor que afecta de manera considerable a la tensión. La tensión de circuito abierto disminuye cuando aumenta la temperatura. La intensidad de cortocircuito aumenta cuando aumenta la temperatura, aunque la variación es muy pequeña considerándose constante.

La potencia entregada por la célula, disminuirá cuando aumente la temperatura de la célula.

La temperatura de trabajo de una célula está relacionada con la temperatura ambiente y la irradiación, se puede obtener mediante la siguiente ecuación 4:

$$T_c = T_a + G * \frac{TONC - 20}{800} \quad (4)$$

Donde:

T_c : temperatura de trabajo de la célula ($^{\circ}\text{C}$)

T_a : temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$)

T_{ONC} : temperatura de operación nominal de la célula ($^{\circ}\text{C}$)

G : irradiancia (W/m^2)

El valor de la temperatura de operación nominal de la célula (T_{ONC}) es un parámetro que se obtiene de las hojas características de los módulos fotovoltaicos, toma valores que van de 43 a 49°C y si no se dispone de él se puede tomar 45°C como un valor razonable.

T_{ONC} o NOCT "Nominal Operating Cell Temperature" corresponden a una irradiancia en el plano del módulo de $800 \text{ W}/\text{m}^2$ con orientación normal a la radiación incidente al mediodía solar, temperatura ambiente de 20°C , velocidad del viento de $1 \text{ m}/\text{s}$ y funcionamiento en circuito abierto.

2.8.2 Radiación solar

La radiación solar no es otra cosa más que la transferencia de energía solar a través de ondas electromagnéticas, esta se produce directamente de la fuente natural, en este caso desde el sol y se esparce en todas las direcciones, sin la necesidad de un medio material (Hernández, P. 2014).

La radiación se puede clasificar en tres categorías, dependiendo de la forma en la que se manifieste sobre la superficie de la Tierra:

- A. Radiación directa:** como su nombre lo indica es aquella radiación que proviene directamente del sol. Es por ello que para su mayor aprovechamiento se debe seguir el movimiento del sol durante su trayectoria.
- B. Radiación difusa:** es aquella radiación recibida de la atmosfera, como consecuencia de la dispersión. En los días nublados la radiación difusa es mayor que el porcentaje de radiación solar directa.

C. Radiación reflejada: la radiación reflejada es aquella que es reflejada por la superficie terrestre.

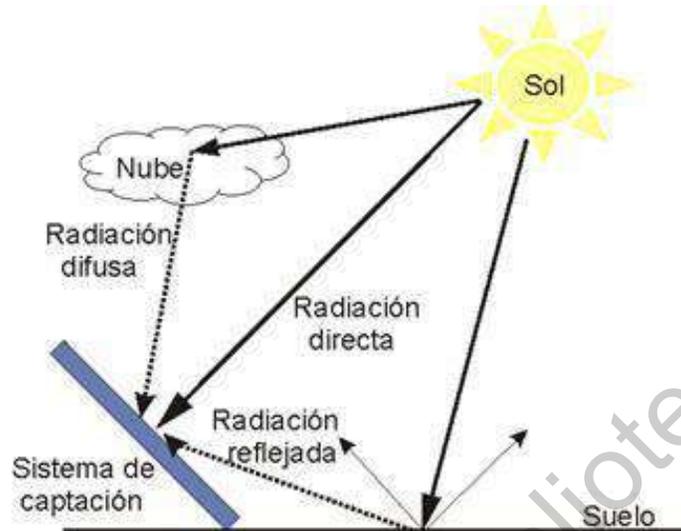


Figura 8 Clasificación de la radiación.

(Fuente: <https://pedrojhernandez.com/2014/03/08/radiacion-directa-difusa-y-reflejada/>)

En la Figura 8 se pueden observar de manera gráfica los tipos de radiación y la forma en la que inciden en un sistema de captación.

2.8.3 Irradiancia

La irradiancia es una magnitud la cual se representa como el cociente de la potencia entre el área donde incide la irradiancia, quedando como unidades de medición en el sistema internacional W/m^2 .

La irradiancia es la potencia que incide sobre una superficie por unidad de área, sus unidades son W/m^2 .

2.9 Ángulo de inclinación

La radiación que perciba el panel solar varía respecto al ángulo que se forma entre el panel y la propia radiación. El objetivo de orientar el panel solar es que los rayos del sol (radiación), incidan de manera perpendicular sobre el panel solar, ya que de esta forma la cantidad de radiación que recibe el panel es mayor, lo que provoca una mayor eficiencia, por lo tanto, una mayor generación de energía eléctrica.

2.10 Sistemas de posicionamiento

Para obtener una mejor captación de energía existen diferentes sistemas de posicionamiento del sol, en los cuales podemos encontrar de un eje o dos ejes.

2.10.1 Seguidores de un eje

- **Seguidores de eje vertical:** también conocido como seguidor acimutal. El eje de rotación es colineal con el eje cenital. La superficie tiene una inclinación fija respecto a la horizontal generalmente igual a la latitud local.
- **Seguidor de eje horizontal:** El eje de rotación de este seguidor permanece siempre paralelo a la superficie de la Tierra. Se orienta en dirección Este-Oeste o bien, en la dirección Norte-Sur.
- **Seguidor de eje inclinado:** Su eje de rotación está inclinado respecto a la superficie terrestre, generalmente esta inclinación es igual a la latitud local.

2.10.2 Seguidores de dos ejes

- **Seguidor de dos ejes:** Su eje de rotación acimutal debe ser paralelo al eje cenital, mientras que el eje de elevación rota siempre octogonal al eje acimutal como también es paralelo a la superficie de la Tierra. Esta superficie se ajusta de tal manera que siempre es normal al rayo incidente.
- **Seguidor tilt-roll:** Uno de sus ejes de rotación está alineando de manera paralela al eje de rotación de la Tierra, esto deriva en que la inclinación del eje es igual a la latitud local. El otro eje de rotación es perpendicular al eje polar. El ángulo de seguimiento de este eje depende del ángulo de declinación, mientras que el ángulo de seguimiento del eje polar es igual al ángulo horario.

Capítulo 3

Metodología

En este capítulo se presenta el desarrollo de la metodología empleada para el desarrollo del sistema de posicionamiento automático aplicado al panel solar. En la Figura 9, se observa el diagrama general de la metodología implementada para el alcance de los objetivos ya mencionados con anterioridad en el capítulo 1. A continuación, se describen cada una de las etapas de la metodología propuestas a seguir.

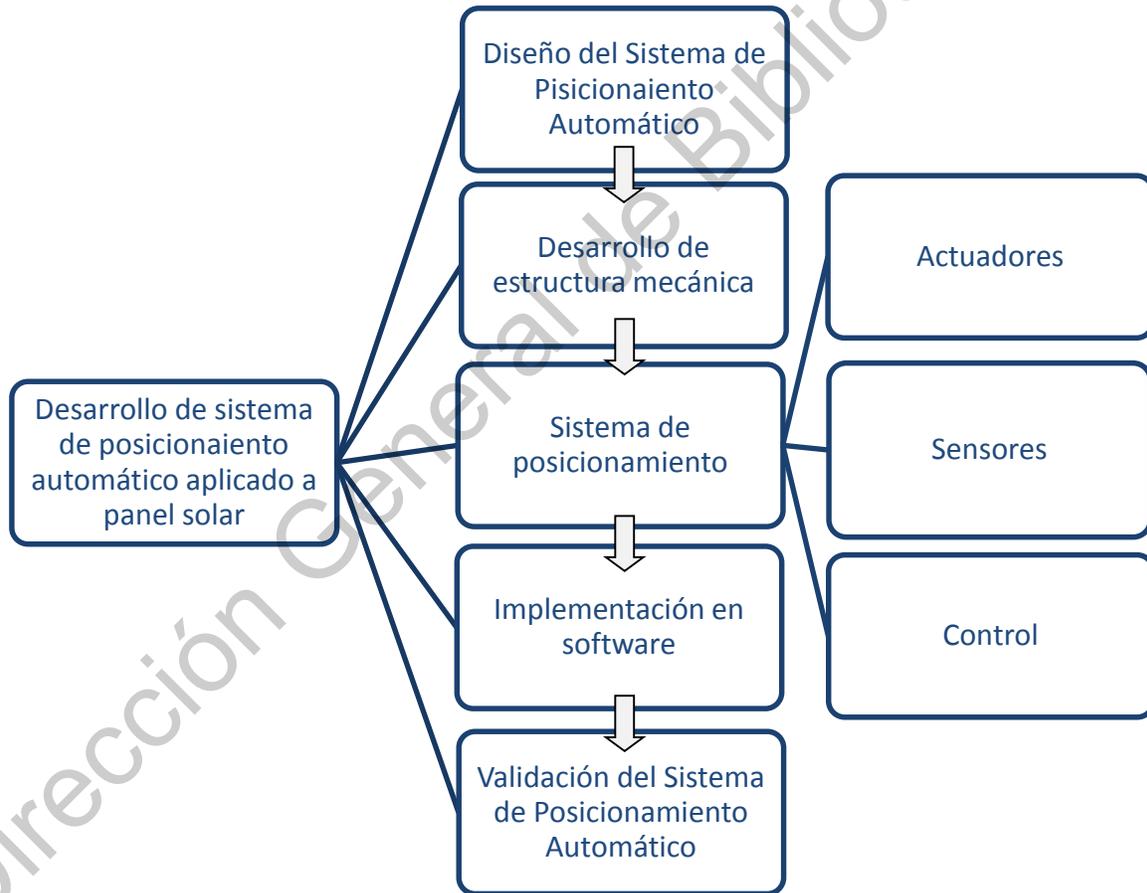


Figura 9 Diagrama general de la metodología

3.1 Diseño del sistema de posicionamiento automático

Se realizó el diseño de las piezas involucradas para el sistema de posicionamiento en SolidWorks. El diseño de la estructura mecánica involucra una base giratoria en la cual estará sentado el panel solar. En la Figura 10 se muestra el diseño de la base inferior, en la cual se puede observar que en la parte superior lleva un rodamiento, el cual ayudará para la rotación del panel. En la Figura 11 se puede ver la base superior del sistema, la cual embona con la base inferior mostrada anteriormente, la placa tiene dos perfiles Bosch y una base con un “gancho” que a su vez empalma con el soporte del panel solar. Esta base-gancho es una pieza tomada de un soporte de televisión.



Figura 10 Base inferior

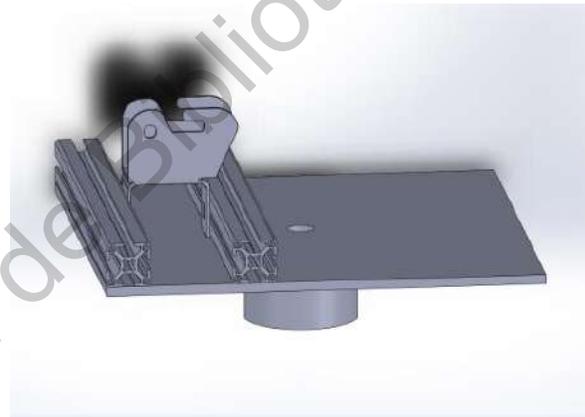


Figura 11 Base superior

En la Figura 12 se puede observar la base de la estructura, en la cual ya se integraron la parte inferior (Figura 10) y la parte superior (Figura 11).



Figura 12 Base de la estructura

Por su parte el panel solar tiene un soporte al centro (es la segunda pieza del soporte de televisión que va unido a la base-gancho) como se puede observar en la Figura 13, el cual embona con la parte superior de la base en el “gancho” que permiten que el panel tenga un movimiento de inclinación.

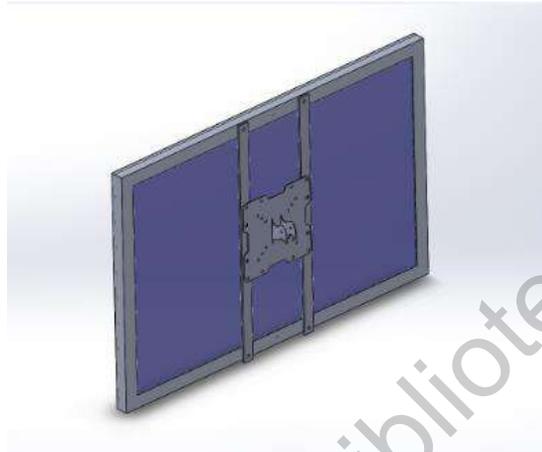


Figura 13 Estructura panel solar

En la Figura 14 se muestra una vista completa del diseño mecánico que formará parte del sistema automático de posición, integrando las 3 partes principales de la estructura: base inferior (Figura 10), base superior (Figura 11) y soporte de panel (Figura 13). Nuevamente, se remarca que con esta estructura el sistema puede realizar tanto movimiento de rotación como de inclinación.

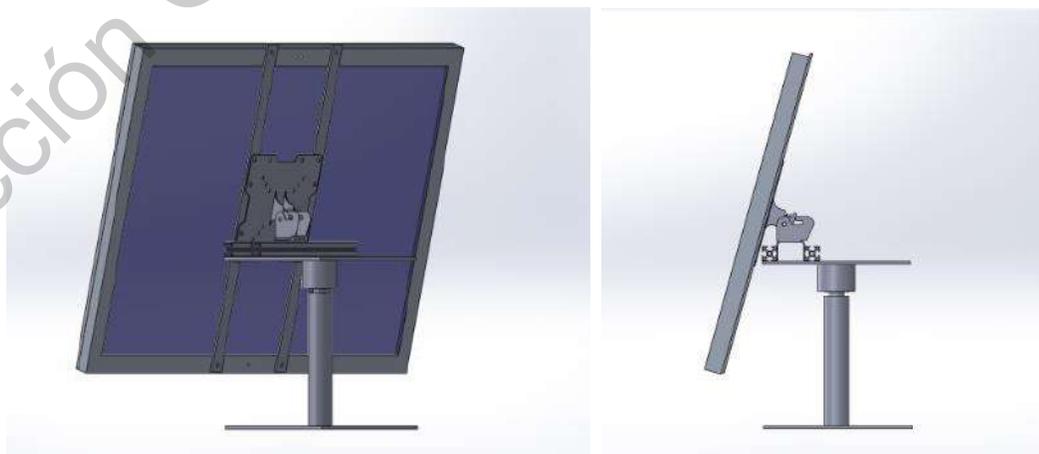


Figura 14 Diseño de estructura

3.2 Desarrollo de estructura mecánica

Una vez teniendo el diseño de la estructura en SolidWorks, se comenzó con el armado y maquinado de la estructura. Cabe mencionar que el desarrollo de la estructura consta de 4 partes: base inferior, base superior, soporte de panel y soporte de actuadores.

Para la base inferior, primeramente, se cortó la barra como se puede observar en la Figura 15, la cual es el soporte principal de la estructura.



Figura 15 Corte de barra

Una vez teniendo el corte de la barra a la altura deseada, se montó en el torno para carear las caras y tener un mejor acabado, de igual forma se maquino uno de los extremos como se observa en la Figura 16, ya que es donde se montará el rodamiento, Figura 17.



Figura 16 Maquinado de barra.



Figura 17 Barra con rodamiento

Con la finalidad de tener un mejor soporte y con ello una mejor estabilidad, se soldó la barra a una placa de acero como se muestra en la Figura 18.



Figura 18 Soldado de placa y barra

Sobre el rodamiento que se encuentra en la parte superior de la barra, se colocó una pieza, la cual nos ayudará a unir la base inferior con la base superior, esta pieza se maquinó en el torno, se barrenó y se realizó el proceso de machuelado en la parte superior, como se muestra en la Figura 19.



Figura 19 Maquinado de soporte rodamiento

En la placa de la base superior se marcó el lugar exacto donde se sujetará la pieza del soporte de rodamiento con la placa, una vez teniendo las marcas se barrenó la placa y se sujetó la pieza con tornillos para una mejor sujeción. La unión de la base superior e inferior se puede observar en la Figura 20.



Figura 20 Unión base superior e inferior

En la placa de la base superior se colocaron dos barras de perfil Bosch, los cuales sujetan la pieza en forma de “gancho” o base-gancho, como se muestra en la Figura 21, la cual embonará posteriormente con la placa-base de televisión sujeta al panel solar.



Figura 21 Incorporación perfil Bosch

En la Figura 22 se observa la placa-base de televisión que soporta al panel solar y que embonará con la base-gancho. Cabe mencionar que se utilizó un soporte comercial para televisión por cuestión de practicidad y reducción de costos, ya que estos soportes están diseñados para soportar elementos de forma y peso similar al de un panel solar (como lo son las pantallas planas de tv) y que ya está manufacturado con un costo mínimo. Dicho soporte está sujeto a dos soleras, las

cuales a su vez están sujetas al panel, y éstas sirven para la unión entre el soporte giratorio complementando a su vez con el movimiento de inclinación.



Figura 22 Soporte panel solar

Una vez que se tiene el soporte para el sistema, se llevó a cabo los soportes para los actuadores, para el actuador lineal se incorporaron dos perfiles Bosch, en la parte inferior del panel solar y por debajo de la placa de la base superior del soporte giratorio, como se puede observar en la Figura 23.



Figura 23 Integración de actuador lineal

En la Figura 24 se puede observar la integración del actuador lineal en la estructura, se corroboró que el actuador funcionará con las condiciones reales de la estructura, es decir, se probó que el motor lineal subiera y bajara el sistema aún con el peso del panel fotovoltaico. Las pruebas de lazo abierto mostraron que el motor es capaz de ajustar la inclinación de la estructura propuesta sin mayor complicación para el actuador, ya que el movimiento fue fluido y el motor mantiene la corriente que demanda según sus especificaciones.



Figura 24 Revisión del actuador lineal

Para integrar el motor o actuador cuya función es generar el movimiento rotativo del soporte giratorio fue necesario maquinarse un acoplador, que a su vez se une con otro acoplador comercial flexible (Figura 25). Estos acopladores se unen al motor, por la parte del acoplador flexible, como se observa de la imagen, y a su vez se unen al soporte giratorio por la parte del acoplador rígido (el que fue maquinado). Para lograr esta última unión se usa a su vez en una llave Allen (

Figura 26), la cual fue modificada o cortada para obtener una barra para que conectara a los acopladores con la cabeza de un tornillo Allen enroscado justamente por arriba de la base superior del soporte giratorio.



Figura 25 Acopladores



Figura 26 Llave Allen

En la Figura 27 se puede ver el acoplamiento del actuador con la estructura.

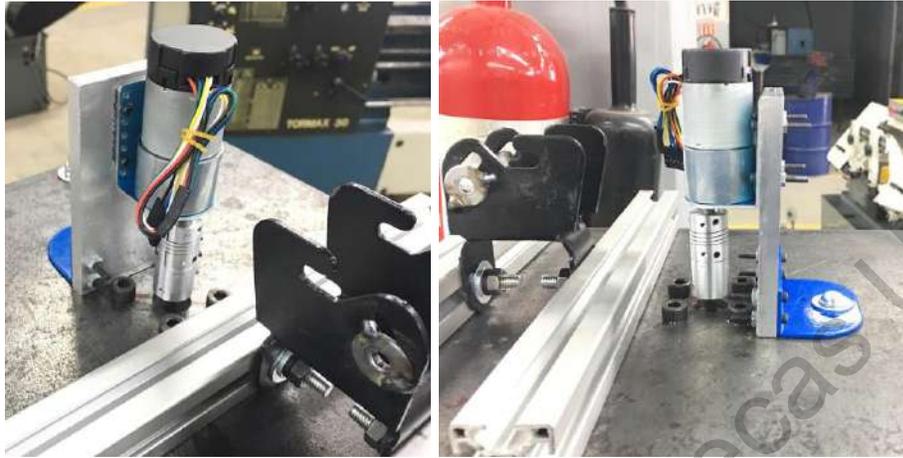


Figura 27 Integración de actuador rotativo

Por último, en la Figura 28 se pueden ver dos vistas de la estructura con la integración de las 4 partes (base inferior, base superior, base del panel, base para actuadores).



Figura 28 Estructura

3.3 Sistema de posicionamiento

En esta sección se describen las 3 partes principales del sistema de posicionamiento; actuadores, sensores y control. En la Figura 29 se muestra el diagrama del sistema de posicionamiento.

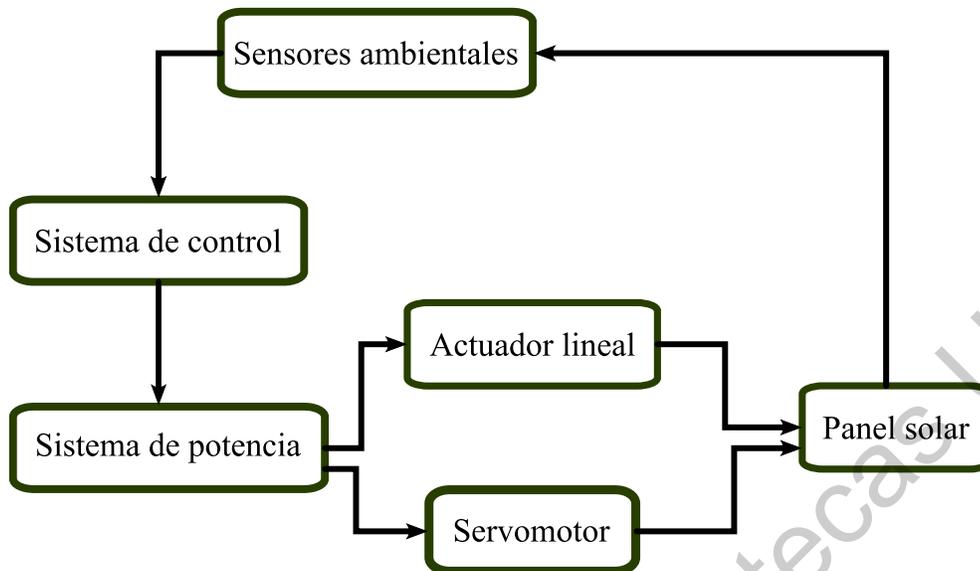


Figura 29 Diagrama de sistema de posicionamiento

3.3.1 Actuadores

Los cuales nos ayudarán al movimiento de la estructura, se hace el uso de un actuador lineal, el cual nos ayuda con el movimiento de inclinación y un actuador rotativo, el cual sirve para el movimiento de rotación del panel. Para ambos, el funcionamiento del actuador lineal y para el actuador rotativo, se requiere de un sistema de acondicionamiento que consta de un puente H (L298N), que alimentará a los actuadores a fin de que se muevan y a su vez definirá el sentido del movimiento de estos.

3.3.2 Sensores

Los sensores de parámetros ambientales para el sistema de posicionamiento fueron los siguientes; Módulo de Sensor Ultravioleta (UVM30A) y Modulo LDR Sensor Fotosensible (LM393). El módulo de Sensor Ultravioleta (UVM30A) Figura 30, es configurable para programas como Arduino, las especificaciones técnicas se muestran en la Tabla 5, es un sensor que se utiliza para detectar el índice de intensidad ultravioleta (UV), dicha intensidad tiene un valor superior a cero, cuanto más alto el valor del índice mayor es el riesgo sobre la salud.

Tabla 5 Especificaciones UVM30A (elaboración propia)

Especificaciones del sensor UVM30A		
Voltaje de funcionamiento:	3.3 a 5 Vdc	 <p>Figura 30 Módulo de sensor UV (UVM30A)</p>
Corriente:	0.06mA	
Respuesta de Longitud de onda:	200 a 370 nm	
Temperatura de trabajo:	20 a 85 °C	

El Módulo LDR Sensor Fotosensible (LM393) Figura 31, al igual que el sensor anterior es configurable para Arduino (las especificaciones técnicas se muestran en laTabla 6), El funcionamiento del sensor se basa en el LDR que tiene integrado, cuya resistencia varía de acuerdo a la intensidad de luz que este reciba, el cual entre mayor cantidad de luz reciba menor será la resistencia, caso contrario cuando recibe menos luz, ya que la resistencia del LDR aumenta su valor.

Se debe hacer hincapié que se usarán ambos sensores para determinar la posición que el sistema de posicionamiento debe conseguir, la idea es realizar una fusión de ambos sensores para tener una información más exacta de la cantidad de luz que recibe el panel fotovoltaico en vez de usar un solo sensor. La fusión de los sensores se realizará usando un filtro de complemento muy simple para evitar cargar el código que será implementado en la plataforma Arduino. Se puede resumir que dicho filtro de complemento consiste en una suma ponderada de las señales que se perciben de cada sensor. Esta fusión de sensores es con el objetivo de proporcionar al sistema de una ventaja sobre los sistemas de seguimiento que únicamente se basan en sensores del tipo LDR.

Tabla 6 Especificaciones LM393 (elaboración propia)

Especificaciones del sensor LM393		
Voltaje de funcionamiento:	3.3 a 5 Vdc	 <p>Figura 31 Modulo de Sensor LDR (LM393)</p>
Conexión 4 cables:	VCC, GND, DO, AO	
Opamp en modo comparador:	LM393	

3.4 Implementación en software

En esta sección se describe la ejecución del sistema de control, para el sistema de posicionamiento automático. El software desarrollado fue implementado usando la interfaz IDLE de la plataforma de Arduino, en dicho programa se fueron describiendo los códigos del sistema de control de forma modular a través de funciones e interrupciones. Cabe recordar que Arduino es un software de código abierto.

A continuación, la Figura 32 muestra un diagrama a bloques de los principales módulos descritos para la implementación del sistema de control. La idea es mostrar también el código desarrollado y explicar en detalle el funcionamiento y forma de trabajar del mismo.

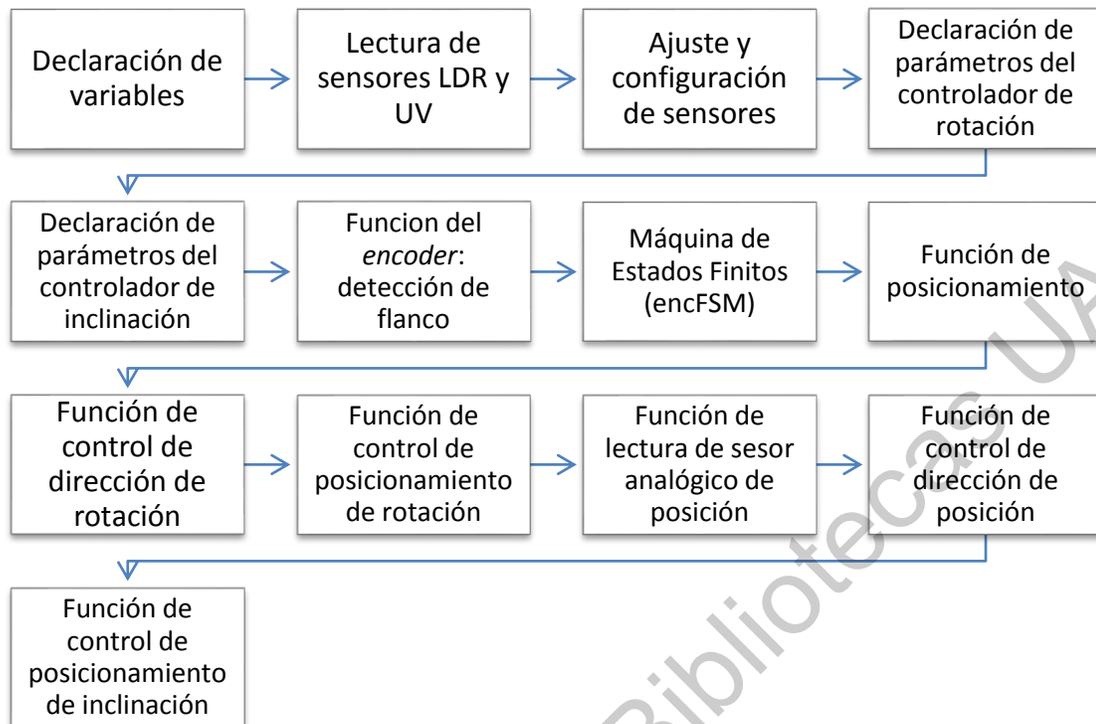


Figura 32 Implementación de Software

En la Figura 33 se muestra el código correspondiente a la asignación de pines de la tarjeta de desarrollo utilizada, en este proyecto fue una Arduino MEGA 256. Se puede apreciar del código que los pines 2 y 3 fueron asignados para recibir los pulsos generados por el *encoder* acoplado al motor que hace girar al sistema. Se trata de un *encoder* incremental de 2 canales, por lo tanto, estos dos pines reciben los pulsos en cuadratura del sensor de posición. Los pines 22 y 23 están asignados para poder controlar el sentido de giro del motor, de esta manera se puede controlar la rotación a la izquierda o a la derecha. Por su parte, en el pin 10 se generará la señal modulada en pulso (PWM) que se usará para que el motor encargado de la rotación funcione.

Por su parte, en la Figura 34, es posible ver que se definieron variables para la lectura de cada uno de los sensores usados, en este caso un total de 8 sensores de los cuales seis son resistencias detectoras de luz, LDR, y dos son sensores de luz ultravioleta, UV. Las variables *adc1*, *adc2*, ... *adc8*, se usaron para la lectura en bruto en los convertidores de la tarjeta, mientras que las variables

$adc1r$, $adc2r$,... $adc8r$, son usadas para representar las señales en su equivalente a unidades de voltaje. Así mismo, las variables $p1$, $p2$, $p3$ y $p4$, servirán para definir zonas en el panel fotovoltaico como se verá más adelante. Por último, las variables fL , fR , fU y fB , son los flancos del panel, que también serán usadas para indicar al panel que movimiento debe realizar.

```
// *** --- SISTEMA DE CONTROL DE POSICIÓN DE PANEL FOTOVOLTAICO --- *** //

// *** --- ARDUINO MEGA - ASIGNACIÓN DE PINES Y DEFINICIÓN DE VARIABLES ---*** //
// Pin 8  -> D1      (Pin de dirección de rotación)
// Pin 9  -> D2      (Pin de dirección de rotación)
// Pin 10 -> PWM     (Señal de modulación de ancho de pulso)
// Pin 2  -> ENC_CHA (Pin de interrupción para canal A del encoder)
// Pin 3  -> ENC_CHB (Pin de interrupción para canal B del encoder)

// ***--- ASIGNACIÓN DE PINES ---*** //
// ***-- Rotación
const int EncChA  = 2;
const int EncChB  = 3;
const int R_PWMOUT = 10;
const int R_DIR1  = 22;
const int R_DIR2  = 23;

// ***--- Sensores LDR y UV
const int S_LDR1 = A1;
const int S_LDR2 = A2;
const int S_LDR3 = A3;
const int S_LDR4 = A4;
const int S_LDR5 = A5;
const int S_LDR6 = A6;
const int S_UV1  = A7;
const int S_UV2  = A8;
```

Figura 33 Asignación de pines de Arduino para canales de *encoder* y sensores LDR y UV.

```

// ***--- DEFINICIÓN DE VARIABLES ---***//
int adc1 = 0;
int adc2 = 0;
int adc3 = 0;
int adc4 = 0;
int adc5 = 0;
int adc6 = 0;
int adc7 = 0;
int adc8 = 0;

float adc1r = 0;
float adc2r = 0;
float adc3r = 0;
float adc4r = 0;
float adc5r = 0;
float adc6r = 0;
float adc7r = 0;
float adc8r = 0;

float p1 = 0.0;
float p2 = 0.0;
float p3 = 0.0;
float p4 = 0.0;

float fL = 0.0;
float fR = 0.0;
float fU = 0.0;
float fB = 0.0;

```

Figura 34 Definición de variables en tarjeta Arduino de zonas en el panel.

Continuando con la definición de variables observamos en la Figura 35, que los pines 26 y 27 son asignados para poder controlar el avance del motor lineal cuando se haga un movimiento de inclinación (hacia arriba o hacia abajo). El pin 8, es la señal modulada en pulso (PWM) para el control del motor lineal y el pin A0 es la señal que se recibe desde el elemento de retroalimentación de este lazo de control, que consiste en un potenciómetro que retroalimenta la posición del motor lineal (que tan extraído se encuentra). Por su parte, la variable *adc* es donde se almacena la lectura del potenciómetro directamente del convertidor; la variable *pot* es el valor correspondiente de la lectura en voltaje. Así también, las variables *i* y *j*, son contadores auxiliares para los controladores; *T* es el periodo de muestreo del sistema ya que se implementó un algoritmo PI discretizado en cada lazo, se define su valor como 10 ms. En los casos de *min_rRef*, *max_rRef*, *min_iRef*, *max_iRef*, se trata de los límites mínimo y máximo que las referencias de los controladores de

rotación e inclinación pueden tomar, respectivamente. Esto último para evitar que el sistema se mueva a una posición que no puede alcanzar por la constitución física del sistema mismo. El caso de *rinc*, e *iinc*, se trata de los incrementos mínimos que las referencias pueden ir adquiriendo según las lecturas de los sensores. Por su lado, *rumbra*l e *iumbra*l son variables auxiliares definidas para determinar la diferencia entre las lecturas de los sensores para que exista un movimiento, si el umbral no es superado no habrá movimiento del sistema, si el umbral es superado el movimiento se dará de acuerdo a los incrementos definidos para las referencias. Estos umbrales fueron definidos debido a que sin ellos el sistema se encuentra el movimiento permanente, volviendo el sistema algo inestable. Finalmente, *rRef* e *iRef* son los valores de las referencias manuales para control de rotación e inclinación, pero solo para pruebas independientes de cada lazo de control, estas referencias solo se usan cuando los sensores LDR y UV no son quienes generan las referencias.

```
// ***-- Inclinación
const int I_DIR1 = 26;
const int I_DIR2 = 27;
const int I_PWMOUT = 8;
const int I_POT = A0;
//const int I_POT2 = A1;
int adc = 0;
//int adc2 = 0;
float pot = 0.0;

int i = 0;
double j = 0.0;
const float T = 0.001;

int min_rRef = -1050;
int max_rRef = 1050;
int rinc = 20;
float min_iRef = 0.0;
float max_iRef = 2.5;
float iinc = 0.1;
float rumbra = 1.2;
float iumbra = 2.2;

// Referencias manuales de los controladores Rotación/Inclinación
int rRef = 0; // Referencia en cuentas del encoder, para el motor actual 8400 cuentas = 1 rev
float iRef = 0.0; // Referencia en volt del potenciometro, para el motor lineal [0V - 5V] = Inclinación completa
```

Figura 35 Asignación de pines de Arduino para control de inclinación.

Como se aprecia de la Figura 36 la función nombrada “ldrSensor()” definida para la lectura de los sensores LDR y de UV muestra que lo primero que se realiza cuando se llama esta función es leer el valor de los seis LDR y los dos UV, directamente de los convertidores de la tarjeta. Una vez realizadas las lecturas se aplica un factor de calibración a fin que los sensores tengan lecturas similares, ya que estos factores se definieron al aplicar el mismo estímulo a todos los sensores (misma cantidad de luz). En seguida se observa un diagrama simbólico de la disposición de los sensores en el panel fotovoltaico, distribuyendo tres LDR arriba del panel mirando al frente como: izquierdo, centro y derecho. La misma distribución se aplicó para los restantes tres LDR en la parte inferior del panel. Por su parte, los dos sensores de UV se dispusieron a izquierda y derecha del panel. Posteriormente, se definen cuatro zonas $p1$, $p2$, $p3$ y $p4$, y cuatro flancos fU , fB , fR y fL con los que se define finalmente el movimiento que el panel realizará, siendo: inclinación arriba (MU), inclinación abajo (MB), rotación izquierda (ML) y rotación derecha (MR). Los respectivos valores se calculan de acuerdo a las líneas siguientes que se aprecian en el código. Casi por terminar esta parte, el movimiento (MU , MB , ML , MR) se define con la diferencia entre las zonas respecto al umbral definido. Si no es superado el umbral es porque los sensores están retroalimentando lecturas similares y significa que el panel está centrado respecto a la cantidad de luz que recibe. Si el umbral es superado significa que algunos sensores registran mayor lectura que otros y el panel requiere ajuste de posición. Se puede observar también el filtro con el que se realiza la fusión de los sensores LDR con los UV. Al final, se manda llamar una función, denominada “setRef()” a la que se le indica el movimiento que el panel debe realizar, y por tanto, en dicha función es donde se define la referencia de rotación y de inclinación como se explicará más adelante.

```

void ldrSensor(void) {
  adc1 = analogRead(S_LDR1);
  adc2 = analogRead(S_LDR2);
  adc3 = analogRead(S_LDR3);
  adc4 = analogRead(S_LDR4);
  adc5 = analogRead(S_LDR5);
  adc6 = analogRead(S_LDR6);
  adc7 = analogRead(S_UV1);
  adc8 = analogRead(S_UV2);

  adc1r = adc1 * 1.56;
  adc2r = adc2 * 0.97;
  adc3r = adc3 * 1.43;
  adc4r = adc4 * 1.07;
  adc5r = adc5 * 0.54;
  adc6r = adc6 * 1.2;
  adc7r = adc7 * 1;
  adc8r = adc8 * 1;

  //   ldr1 ----- ldr2 ----- ldr3           // ldr1 light sensor measurement 1
  //   |               |               |           // ldr2 light sensor measurement 2
  //   |           p1       fU           p2       |           // ldr3 light sensor measurement 3
  //   |               |               |           // ldr4 light sensor measurement 4
  //   |               |               |           // ldr5 light sensor measurement 5
  //   uvs1      fL  ML           MR  fR      uvs2           // ldr6 light sensor measurement 6
  //   |               |               |           // p1 mean of ldr1-ldr2 = (ldr1+ldr2)/2.0;
  //   |               |               |           // p2 mean of ldr2-ldr3 = (ldr2+ldr3)/2.0;
  //   |           p3       fB           p4       |           // p3 mean of ldr4-ldr5 = (ldr4+ldr5)/2.0;
  //   |               |               |           // p4 mean of ldr5-ldr6 = (ldr5+ldr6)/2.0;
  //   ldr4 ----- ldr5 ----- ldr6

  // ----> fL = Fusion filter ((P1+P3)/2.0)*0.7 + uvs1*0.3;
  // ----> fR = Fusion filter ((P2+P4)/2.0)*0.7 + uvs2*0.3;
  // ----> fU = Fusion filter (P1+P2)/2.0
  // ----> fB = Fusion filter (P3+P4)/2.0
  // ----> ML = fL > fR
  // ----> MR = fL < fR
  // ----> MU = fU > fB
  // ----> MB = fU < fB

  p1 = (adc1r + adc2r) / 2.0;
  p2 = (adc2r + adc3r) / 2.0;
  p3 = (adc4r + adc5r) / 2.0;
  p4 = (adc5r + adc6r) / 2.0;

  fL = ((p1 + p3) / 2.0); //*0.7 + adc7*0.3;
  fR = ((p2 + p4) / 2.0); //*0.7 + adc8*0.3;
  fU = (p1 + p2) / 2.0;
  fB = (p3 + p4) / 2.0;

  if (abs(fL - fR) > iumbral){
    if (fL > fR) {
      MR = 1;
      ML = 0;
    } else{
      MR = 0;
      ML = 1;
    }
  } else {
    MR = 0;
    ML = 0;
  }

  if (abs(fU - fB) > iumbral){
    if (fU > fB) {
      MU = 0;
      MB = 1;
    } else {
      MU = 1;
      MB = 0;
    }
  } else {
    MU = 0;
    MB = 0;
  }

  setRef(ML, MR, MU, MB);
}

```

Figura 36 Función “ldrSensor()” de lectura y fusión de sensores LDR y UV.

Como se observa a continuación, en la Figura 37, una vez que el movimiento que debe realizar el panel es definido (arriba, abajo, izquierda, derecha) se debe entonces especificar cuanto es el movimiento a realizar. Para esto, la función “setRef()” considera mediante 4 comparaciones que movimiento es el que está activo, y una vez detectado, se realiza un incremento o decremento de la referencia en base al incremento mínimo definido por rinc e iinc. Estos incrementos se definieron considerando que el panel no debe tener movimientos bruscos, ya que pueden llevar a la inestabilidad a los lazos de control debido a las inercias provocadas por el peso del panel. Es posible mitigar dicha inestabilidad implementando una estructura de control avanzada o más robusta, pero a costo de mayor complejidad de los cálculos y por ende con un incremento de los recursos computacionales requeridos. Esto podría comprometer su implementación en la Arduino. Entonces, la opción más económica fue ajustar las referencias con cambios mínimos. Además, el movimiento del sol a lo largo del día no es tan rápido, lo que permite al sistema que su referencia cambie lento y gradual. Cabe destacar que el movimiento se realiza dentro de los límites establecidos mínimos y máximos.

```

// *** --- Reference Adjustmen according Sensors
void setRef(int ml, int mr, int mu, int mb) {
  (ml == 1) ? rRef = rRef - rinc : rRef = rRef;
  (mr == 1) ? rRef = rRef + rinc : rRef = rRef;

  (mu == 1) ? iRef = iRef + iinc : iRef = iRef;
  (mb == 1) ? iRef = iRef - iinc : iRef = iRef;

  if (rRef > max_rRef) {
    rRef = max_rRef;
  }

  if (rRef < min_rRef) {
    rRef = min_rRef;
  }

  if (iRef > max_iRef) {
    iRef = max_iRef;
  }

  if (iRef < min_iRef) {
    iRef = min_iRef;
  }
}

```

Figura 37 Función “setRef()” para definir las referencias de los lazos de control.

En la Figura 38 a continuación, se pueden apreciar los parámetros definidos de los controladores implementados para el lazo cerrado de rotación y para el lazo cerrado de inclinación. En el caso de lazo de rotación tenemos que los parámetros mostrados son los valores de la ganancia proporcional, rP , integral, rI y derivativa, rD , en seguida aparece su discretización, y por último, el cálculo de los coeficientes que serán usados por las ecuaciones en diferencias para el control de rotación: $ra0$, $ra1$, $ra2$, $rb1$ y $rb2$, respectivamente. Una definición similar ocurre para el control de inclinación, los parámetros definidos son los valores de la ganancia proporcional, iP , integral, iI y derivativa, iD , de igual manera después aparece su discretización, y por último, el cálculo de los coeficientes que serán usados por las ecuaciones en diferencias para el control de inclinación: $ia0$, $ia1$, $ia2$, $ib1$ e $ib2$, respectivamente.

El valor que alimenta al controlador, por medio de la ecuación en diferencias, se almacena en las variables ruk e iuk , para rotación e inclinación, respectivamente. Por su parte, $ryout$ e $iyout$ son variables usadas para limitar la salida del controlador a la resolución del PWM de 8 bits del Arduino, es decir, se acota la salida a valores entre 0 y 255. Por lo tanto, para poder usar los valores negativos que la ecuación en diferencias del controlador proporciona, se obtienen los absolutos de dichos valores y las banderas $rflag$ e $iflag$ son usadas para definir el sentido de giro de los motores de rotación y lineal. Del código también se pueden apreciar algunos parámetros auxiliares para almacenar los valores anteriores de las ecuaciones en diferencias como: ruk_1 , ruk_2 , ryk_1 , ryk_2 , iuk_1 , iuk_2 , iyk_1 , iyk_2 . Los valores de la señal de error para rotación e inclinación se almacenan en $rError$ e $iError$, respectivamente.

```

// ***--- ROTATION CONTROLLER PARAMETERS ---*** //
int rError = 0;

const float rP = 0.5;           // Este fue un buen comportamiento, lento pero sin sobrepasos bruscos
const float rI = 1.5;           // Este fue un buen comportamiento, lento pero sin sobrepasos bruscos
const float rD = 0.0;
const float rTi = rP / rI;
const float rTd = rD / rP;
const float rKp = rP - ((rP*T) / (2.0 * rTi));
const float rKi = rP * (T / rTi);
const float rKd = rP * (rTd / T);

const float ra0 = rKp + rKi + rKd;
const float ra1 = -(rKp + (2.0 * rKd));
const float ra2 = rKd;
const float rb1 = 1.0;
const float rb2 = 0.0;

volatile bool A = 0;
volatile bool B = 0;

int Count = 0;
int md = 0;
int Qp = 0;
int ContPos = 0;

float ruk = 0.0;
float ruk_1 = 0.0;
float ruk_2 = 0.0;
float ryk = 0.0;
float ryk_1 = 0.0;
float ryk_2 = 0.0;

float ryout = 0.0;
int rflg = 0;

// ***--- INCLINATION CONTROLLER PARAMETERS ---*** //
float iError = 0.0;

const float iP = 300.0;
const float iI = 800.0;
const float iD = 0.1;
const float iTi = iP / iI;
const float iTd = iD / iP;
const float iKp = iP - ((iP*T) / (2.0 * iTi));
const float iKi = iP * (T / iTi);
const float iKd = iP * (iTd / T);
const float ia0 = iKp + iKi + iKd;
const float ia1 = -(iKp + (2.0 * iKd));
const float ia2 = iKd;
const float ib1 = 1.0;
const float ib2 = 0.0;

float iuk = 0.0;
float iyk = 0.0;
float iuk_1 = 0.0;
float iuk_2 = 0.0;
float iyk_1 = 0.0;
float iyk_2 = 0.0;

float iyout = 0.0;
int iflg = 0;

```

Figura 38 Parámetros de los controladores.

La Figura 39 muestra el código de la interrupción, denominada “edgeCh()”, usada para detectar las señales en cuadratura del *encoder*. La idea es que cada vez que un canal del *encoder* genera un pulso, este es detectado y en ese momento se inicia la rutina del servicio de interrupción, o ISR, “edgeCh()”. Cuando se ejecuta esta rutina lo primero que se hace es leer el valor lógico detectado en el pin en el que se disparó el cambio, es decir, se detecta un cambio de flanco. Lo siguiente es que en base a los niveles lógicos leídos en los canales del *encoder* se define la cuenta en la que se encuentra el sensor. Con dicha cuenta es posible definir si el motor se encuentra en movimiento y además su sentido de giro. Por lo que, finalmente, se llaman dos funciones “encFSM()” y en seguida “CounterPosition()”.

```

// ***--- ENCODER FUNCTIONS
// ***--- EDGE DETECTION FUNCTION ----*** //
void edgeCh(void) {
  A = digitalRead(EncChA);
  B = digitalRead(EncChB);

  if (!A && !B)
    Count = 0;
  else if (!A && B)
    Count = 1;
  else if (A && !B)
    Count = 2;
  else
    Count = 3;

  encFSM();
  CounterPosition();
}

```

Figura 39 Rutina del servicio de interrupción para la detección de flancos del *encoder* y definición de cuentas.

En la Figura 40 se aprecia solo una fracción del código descrito para la máquina de estados finitos que se encarga de la detección de cuentas del *encoder* “encFSM()” a fin de definir los valores de la señal que permitirán detectar si el motor se encuentra en movimiento y el sentido de giro de este. Se trata de la descripción de un grafo simple en el que la cuenta definida por la interrupción permite el cambio de un estado a otro en la máquina, definiendo una secuencia directa y una secuencia inversa. En la secuencia directa el motor genera cuentas en cierto orden y la rotación es horaria, en la secuencia inversa el motor genera las mismas cuentas,

pero el orden de dos de las cuentas se invierte, y el motor gira en rotación antihoraria. Se puede concluir que esta máquina de estados es un decodificador de posición para un *encoder* incremental de dos canales.

```
// ***--- Encoder Finite State Machine (encFSM) ---*** //
void encFSM(void) {
    switch (Qp) {
        case 0:
            md = 0;
            switch (Count) {
                case 0:
                    Qp = 1;
                    break;

                case 1:
                    Qp = 2;
                    break;

                case 2:
                    Qp = 4;
                    break;

                case 3:
                    Qp = 3;
                    break;

                default:
                    Qp = Qp;
            }
            break;
    }
}
```

Figura 40 Máquina de estados para la decodificación de posición del *encoder*.

Mientras tanto, en la Figura 41 se observa como los valores de la máquina de estados del *encoder* son usados para el conteo de la posición del motor, es decir, una vez que las cuentas pasan por la máquina de estados en cada estado se define el valor para movimiento y dirección, *md*, de forma que, si su valor es 1, se trata de una secuencia directa y el conteo de posición se incrementa. Pero si el valor es de 3, es una secuencia inversa, y el conteo de posición se decrementa. La posición y su valor son almacenados en la variable *ContPos*.

```

// ***--- Positioning Function ---*** //
void CounterPosition(void) {
    (md == 1) ? ContPos++ : ContPos = ContPos;
    (md == 3) ? ContPos-- : ContPos = ContPos;
}

```

Figura 41 Función “CounterPosition()” que define la cuenta positiva o negativa del *encoder*.

El cambio de dirección de los motores se puede apreciar en la función “setDirControl()” de la Figura 42. La bandera como argumento de entrada se define simplemente poniendo en alto dicha bandera cuando el controlador genera valores negativos, se pone en bajo cuando el controlador genera valores positivos. Entonces, el cambio de giro del motor es simplemente intercambiando los niveles de los pines 22 y 23, 26 y 27, que están conectados a las entradas de habilitación de giro de un puente H externo.

```

// ***--- Rotation Direction Control Function ***--- //
void setDirRControl(int fl) {
    if (fl == 1) {
        digitalWrite(R_DIR1, HIGH);
        digitalWrite(R_DIR2, LOW);
    } else {
        digitalWrite(R_DIR1, LOW);
        digitalWrite(R_DIR2, HIGH);
    }
}
}

```

Figura 42 Función “setDirControl()” para definir el sentido de giro de los motores.

El control de rotación es observado en la función “rotationPID()” de la Figura 43. Se observa de la imagen que lo primero que realiza el controlador es generar el valor del error, *rError*, restando la referencia (generada por los cambios en los sensores LDR y UV) y la posición actual del motor, *ContPos*. Si el error existe se asigna a la variable *ruk* y se procesa en la ecuación en diferencias, la salida *ryk* es limitada generando *ryout* (entre 0 y 255 por la resolución del PWM), y entonces, si su valor es negativo se cambia la dirección con *rflg*. Finalmente, la salida es enviada al PWM. A continuación, algunos parámetros son mostrados en el Monitor Serial para saber si el sistema hace su trabajo.

```

// ***--- Rotation Positioning Control Function ---*** //
void rotationPID() {
  rError = rRef - ContPos;
  ruk = rError;
  //yk =a0*uk - a1*uk_1 + a2*uk_2 + yk_2;
  ryk = ra0 * ruk + ra1 * ruk_1 + ra2 * ruk_2 + rb1 * ryk_1 + rb2 * ryk_2;
  ruk_1 = ruk;
  ruk_2 = ruk_1;
  ryk_1 = ryk;
  ryk_2 = ryk_1;

  ryout = ryk;
  if (abs(ryout) >= 255.0) {
    ryout = 255.0;
  }

  (ryk < 0) ? rflg = 0 : rflg = 1;
  setDirRControl(rflg);

  analogWrite(R_PWMOUT, int(abs(ryout)));

  Serial.print(rRef);
  Serial.print(" ");
  Serial.print(rError);
  Serial.print(" ");
  Serial.print(int(abs(ryout)));
  Serial.print(" ");
  Serial.print(rflg);
  Serial.print(" ");
  Serial.print(ContPos);
  Serial.print("\t");
}

```

Figura 43 Control PI para rotación del sistema en lazo cerrado.

Con una lógica similar se define el controlador en lazo cerrado para la inclinación del panel, llamada "inclinaciónPID()". En la Figura 44 se muestra el control de inclinación. La principal diferencia en este caso es que en el control de inclinación no se usa una interrupción para la lectura de los sensores, sino que se manda llamar una función cada vez que el control es ejecutado.

```

// ***--- Inclination Positioning Control Function ---*** //
void inclinationPID() {
  readSensor();
  iError = iRef - pot;
  iuk = iError;
  iyk = ia0 * iuk + ia1 * iuk_1 + ia2 * iuk_2 + ib1 * iyk_1 + ib2 * iyk_2; //PID
  iuk_1 = iuk;
  iuk_2 = iuk_1;
  iyk_1 = iyk;
  iyk_2 = iyk_1;

  iyout = iyk;
  if (abs(iyout) >= 255.0) {
    iyout = 255.0;
  }

  (iyk < 0) ? iflg = 1 : iflg = 0;
  setDirIControl(iflg);
  analogWrite(I_PWMOUT, int(abs(iyout)));

  Serial.print(iRef);
  Serial.print(" ");
  Serial.print(iError);
  Serial.print(" ");
  Serial.print(int(abs(iyout)));
  Serial.print(" ");
  Serial.print(iflg);
  Serial.print(" ");
}

```

Figura 44 Control PI para inclinación del sistema en lazo cerrado.

Finalmente, el lazo infinito en el que los controladores son llamados se muestra en la Figura 45. Las condiciones observadas solo son un retardo para el llamado de la función, el valor está estimado para el periodo de muestreo definido. Esto garantiza que el controlador se ejecuta cada periodo de tiempo y no de forma continua a la frecuencia que la Arduino trabaja, de lo contrario el sistema se volvería inestable ya que los cálculos no podrían ser ejecutados debido a la rapidez en que las señales en cuadratura se generan.

```

void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:
  encFSM();
  CounterPosition();

  if (i == 5000) {
    rotationPID();
    inclinationPID();
    i = 0;
  }

  i++;

  if (j == 200000) {
    ldrSensor();
    j = 0.0;
  }

  j = j + 1.0;
}

```

Figura 45 Ciclo principal infinito en el que los controladores son llamados.

3.5 Validación del sistema de posicionamiento automático

Una vez que se tiene ensamblado el sistema de posicionamiento (sensores, actuadores, control e implementación del software) se verifica que el sistema funcione debidamente, para ello se realizan pruebas. Las primeras pruebas a realizar serán dentro de un ambiente controlado, es decir, el panel estará sometido a una luz artificial, la ventaja de utilizar la luz artificial para la validación del sistema es la rapidez de respuesta en el movimiento del panel, ya que de esta forma se pueden excitar los sensores a conveniencia. Una vez realizadas las pruebas en el ambiente controlado, entonces el sistema será puesto en condiciones normales, de esta forma se validará que el sistema tenga un posicionamiento automático siguiendo la luz solar.

Capítulo 4

Resultados

En este capítulo se presentarán los resultados obtenidos conforme a la metodología ya mencionada.

4.1 Resultados del diseño de posicionamiento automático

Se muestra el diseño final del sistema de posicionamiento automático, realizado en el software SolidWorks (Figura 46)

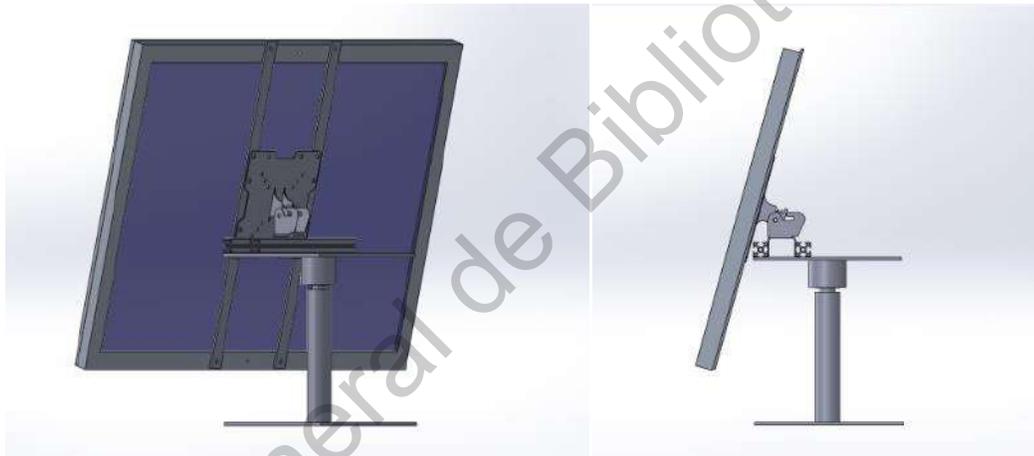


Figura 46 Diseño final de estructura

Dicho sistema integra componentes que se maquinaron en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Electromecánica y de igual forma se integraron componentes comerciales, los cuales facilitaron el diseño de la estructura, como lo son la base de televisión, el acoplador flexible, los perfiles, y los tornillos.

4.2 Resultado de la estructura mecánica

Como resultado podemos observar la estructura mecánica de la Figura 47, la cual integra todos los componentes del diseño que se realizó en SolidWorks, de igual forma incluye los actuadores, que si bien no se consideraron dentro del diseño si se consideraron en el armado de la estructura mecánica.



Figura 47 Resultado final estructura mecánica

El resultado final es un sistema mecánico que es capaz de posicionarse de acuerdo a una rotación del panel y una inclinación del panel. El motor en la base superior permite que el panel gire a la derecha y a la izquierda. Por su parte, el motor lineal habilita a la estructura para que el panel sea inclinado, hacia arriba o hacia abajo.

4.3 Resultados del sistema de posicionamiento

4.3.1 Actuadores

Se corroboró el funcionamiento de los actuadores en el sistema mecánico, tanto el actuador lineal como el actuador rotativo. En la Figura 48 se puede observar al fondo una fuente de voltaje regulable, con la cual se alimenta el actuador lineal, por su parte en panel se puede ver que tiene una inclinación, la cual se debe al actuador lineal.



Figura 48 Validación de actuador lineal

4.3.2 Sensores

Por su parte los sensores de parámetros ambientales para el sistema de posicionamiento automático que se utilizaron fueron el módulo de sensor ultravioleta (UVM30A) y el módulo LDR Sensor fotosensible (LM393), dichos sensores fueron programados en la plataforma Arduino, cabe recordar que Arduino es una plataforma electrónica de código abierto, lo que hace fácil el uso y programación de dichos sensores.

Módulo LDR:

Para el funcionamiento de los sensores se conectaron una protoboard y la tarjeta Arduino, para el caso del módulo LDR únicamente se conectaron tres de los 4 pines, los cuales fueron; tierra, alimentación (5v) y la salida analógica. Para el sistema de posicionamiento se utilizaron 6 módulos LDR, de los cuales, están ubicados en la parte superior e inferior de la estructura del panel.

El funcionamiento del sensor es simple, su principal componente del módulo es un LDR, el cual es una resistencia que cambia su valor dependiendo de la cantidad de luz que incida sobre él. El valor de la resistencia eléctrica del LDR es baja cuando la luz incide sobre él, caso contrario cuando la luz es escasa, ya que la resistencia eléctrica es alta.

Módulo UV:

Para el sistema de posicionamiento, además de los módulos LDR también se utilizaron sensores ambientales UVM30A, los cuales se utilizan para medir el índice de la intensidad de luz ultravioleta que incide sobre el sensor.

El sensor cuenta con 3 pines; alimentación (5v), tierra y una salida analógica, para el sistema de posicionamiento se utilizaron 2 sensores los cuales estuvieron ubicados en los laterales del panel.

4.4 Resultado de la validación del sistema de posicionamiento automático

En esta sección se describen los resultados obtenidos de las pruebas realizadas para la validación del sistema de posicionamiento automático aplicado al panel solar.

4.4.1 Resultados numéricos del código implementado en IDLE de Arduino

Para corroborar la validación de las pruebas realizadas al sistema de posicionamiento automático, se hizo uso del “Monitor Serial” de la plataforma de Arduino.

En la Figura 49 se puede observar una captura del “Monitor Serial” durante una prueba realizada al sistema de posicionamiento, en donde se muestran los valores de las variables significativas que se utilizaron en el sistema de control.



Figura 49 Datos de las variables, mostrados en el “Monitor Serial” de Arduino

En la Tabla 7 se muestran las variables de los valores que se observan en el “Monitor Serial”, dichos datos nos sirven para hacer posteriormente una visualización gráfica de las pruebas realizadas para la validación del sistema.

Tabla 7 Datos del Monitor Serial (elaboración propia)

Columna(s)	Variable(s)				Valor de la variable
1, 6	<i>rRef</i>	<i>iRef</i>			Referencias para el control de rotación e inclinación.
2,7	<i>rError</i>	<i>iError</i>			Señal de error para el control de rotación e inclinación.
3,8	<i>ryout</i>	<i>iyout</i>			Variables usadas para limitar la salida del controlador (valores entre 0 y 255).
4,9	<i>rflg</i>	<i>iflg</i>			Son variables usadas como banderas para definir el sentido del movimiento del sistema mecánico (valor 0 o 1).
5	<i>ContPos</i>				Es una variable que almacena el valor de la posición del <i>encoder</i> del sistema de rotación.
10	<i>pot</i>				Es una variable que almacena la lectura en voltaje del actuador lineal (potenciómetro).
11-18	<i>adc1r, adc2r, ..., adc8r</i>				Señales para la lectura equivalentes en unidades de voltaje en los convertidores de la tarjeta.
19-22	<i>fL</i>	<i>fR</i>	<i>fU</i>	<i>fB</i>	Valores de los sensores con la fusión del filtro
23-24	<i>fL-fR</i>		<i>fU-fB</i>		Valores absolutos de los flancos que definen el movimiento del panel.
25-28	<i>ML</i>	<i>MR</i>	<i>MU</i>	<i>MB</i>	Banderas utilizadas para definir el movimiento del panel, movimiento izquierdo, derecho, arriba y abajo respectivamente, los valores que se muestran son 0 y 1.

4.4.2 Resultados gráficos del código implementado en IDLE de Arduino

Para la validación del sistema de posicionamiento automático se realizaron dos tipos de pruebas como se mencionó anteriormente; la primera prueba se realizó en un ambiente controlado donde se utilizó una luz artificial, en este caso se hizo uso de una lámpara de led, la cual sirvió para darle un recorrido al panel y validar el control.

Las gráficas que se muestran a continuación muestran los resultados de una prueba que se realizó en un entorno controlado.

En la Figura 50 se muestran los resultados de la señal de inclinación en este caso, es el actuador lineal el que mueve al panel. En la gráfica se muestra la señal de referencia en color verde y la señal de la posición en un color morado, se puede observar que la señal de posición hace el mismo recorrido que la señal de referencia.

Vale la pena mencionar que la escala vertical de la gráfica muestra que el panel tiene un recorrido de 0 volts, que corresponde de una posición en la que el panel se encuentra mostrando su superficie de captación en una forma completamente vertical, hasta 3 volts, que corresponde, a su vez, a una posición en la que tiene un ángulo de inclinación de aproximadamente 15° de la horizontal. Esta inclinación puede ser mejorada ampliando el rango en el que el motor lineal puede extraerse. Por ahora, debido a la forma en que este motor se encuentra acoplado este es el rango de movimiento que tiene el sistema.

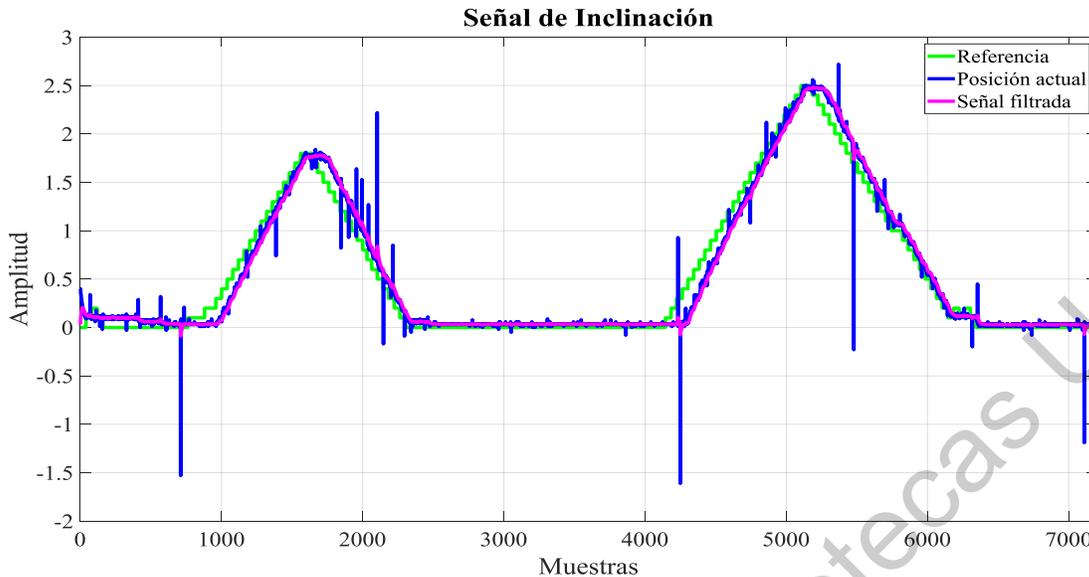


Figura 50 Señal de inclinación, prueba 1

En la Figura 51 se muestra la gráfica de rotación que se obtuvo de la misma prueba, en la gráfica se muestra la señal de referencia y la señal de posición. Se puede observar que el sistema de posicionamiento tiene buena respuesta. La escala vertical de la gráfica nos muestra que el movimiento del motor que hace rotar al panel en unidades de cuentas del *encoder*. En este caso 8400 cuentas representan una revolución completa del motor. Para las pruebas realizadas se definieron varias consideraciones. Por ejemplo, como parte de las limitaciones de movimiento rotativo se tiene que el panel gira de -2000 a 2000 cuentas debido al cableado del panel, que no permite que tenga múltiples vueltas. Esta situación no es grave, en el entendido que el panel se mueve siguiendo al sol, por lo que, una vez que el sol se oculta se puede programar una rutina que lo vuelva a posicionar en un origen definido. Por estas cuestiones de seguridad se observa que el movimiento del panel está limitado en estos rangos, implicado un giro de aproximadamente $\frac{1}{4}$ de vuelta a la izquierda y $\frac{1}{4}$ de vuelta a la derecha. Este rango se puede ampliar fácilmente para lograr media vuelta en ambos sentidos.

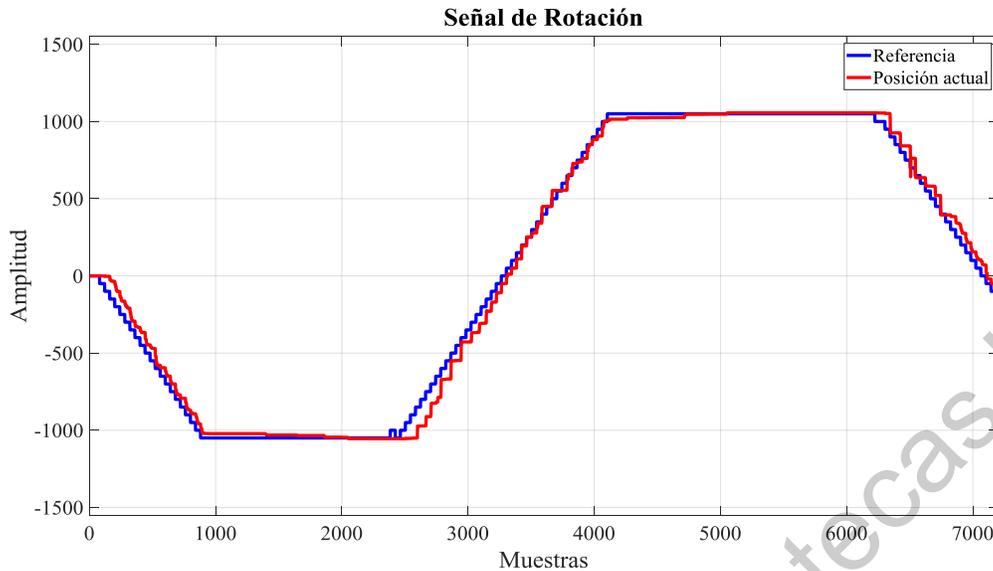


Figura 51 Señal de rotación, prueba 1

Las segundas pruebas que se realizaron fueron con el panel en condiciones reales, es decir siguiendo la trayectoria del sol.

En la Figura 52, se muestra la gráfica del control de inclinación, en la gráfica se muestra la señal de referencia y la señal de posición actual.

Se puede observar que la señal se mantiene casi constante en cero, esto se debe a que en el tiempo que se realizó la prueba la posición del sol no fue considerable para que el sistema mostrará un cambio en la inclinación del sol.

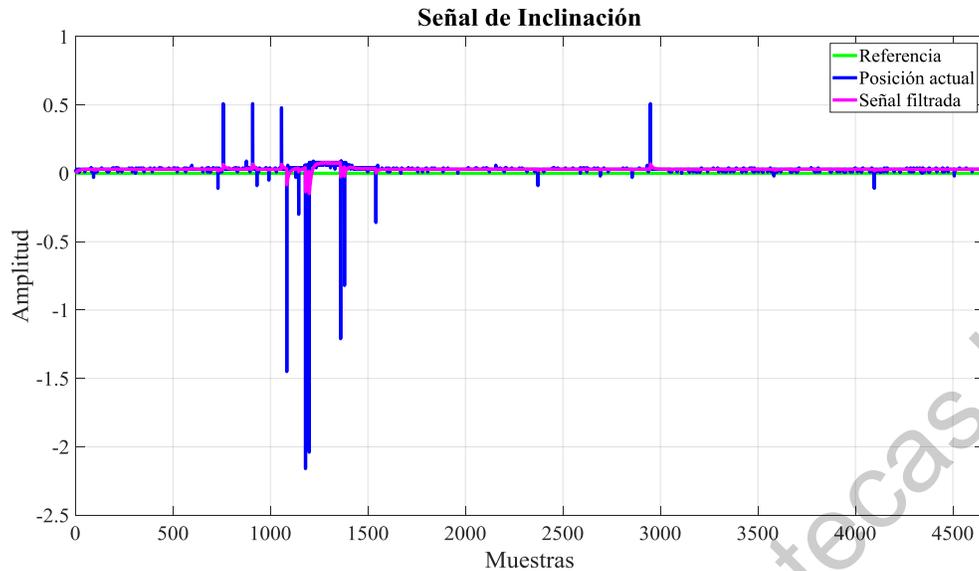


Figura 52 Señal de inclinación, prueba 2

En la Figura 53, se observa la gráfica de la señal de rotación de la segunda prueba que se realizó. Se observa la señal de referencia y la señal de posición. Se puede observar que el sistema de control trata de seguir la referencia, sin embargo, hay un desfase provocado por el tiempo de respuesta del sistema y la inercia generada por el peso del panel, los picos que se observan se deben a un sobrepaso provocado por la inercia y juego mecánico del sistema.

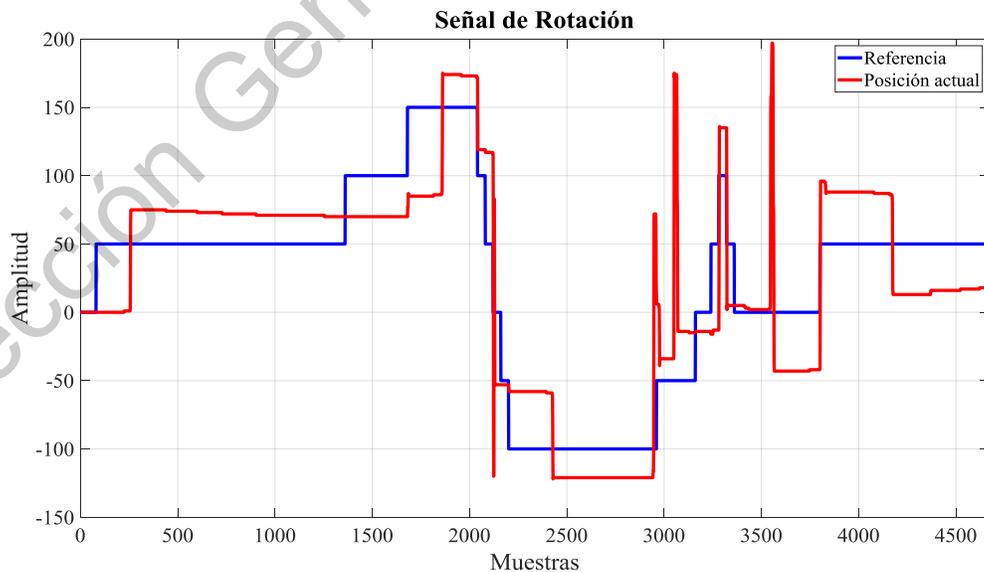


Figura 53 Señal de rotación, prueba 2

En la Figura 54, se muestran los resultados de una prueba en un entorno controlado, en la gráfica se observa la señal de inclinación, como ya se mencionó es el actuador lineal el que ejerce el movimiento al panel. Se puede observar que la señal de posición actual en color azul tiene un pequeño desfase, sin embargo, trata de seguir la señal de referencia.

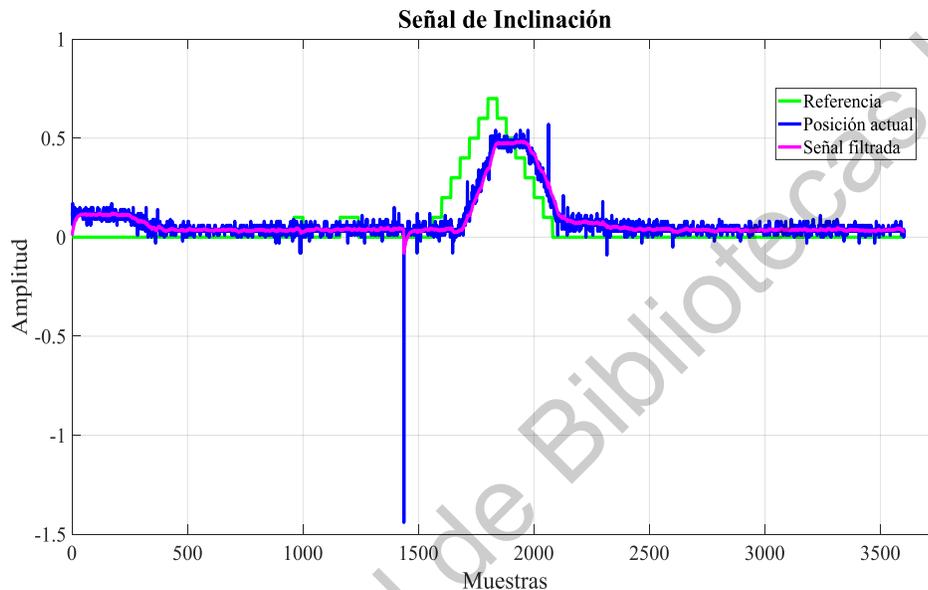


Figura 54 Señal de inclinación, prueba 3

En la Figura 55, se muestra la gráfica de rotación de la prueba 3, en la gráfica se puede observar como la señal de posición, sigue la trayectoria de la señal de referencia, sin embargo, sigue existiendo un desfase que se debe al tiempo de respuesta del sistema.

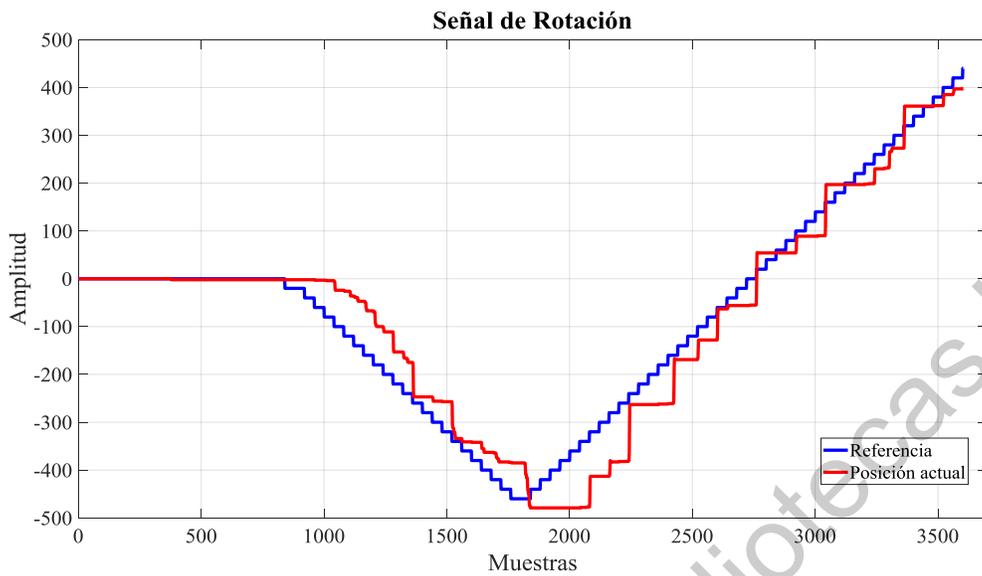


Figura 55 Señal de rotación, prueba 3

En la Figura 56, se muestran los resultados de la prueba 4 de inclinación, en la gráfica se observa el comportamiento de la señal de posición actual, la cual, aunque presenta un desfase provocado por el tiempo de respuesta del sistema, la señal trata de seguir la trayectoria de la señal de referencia.

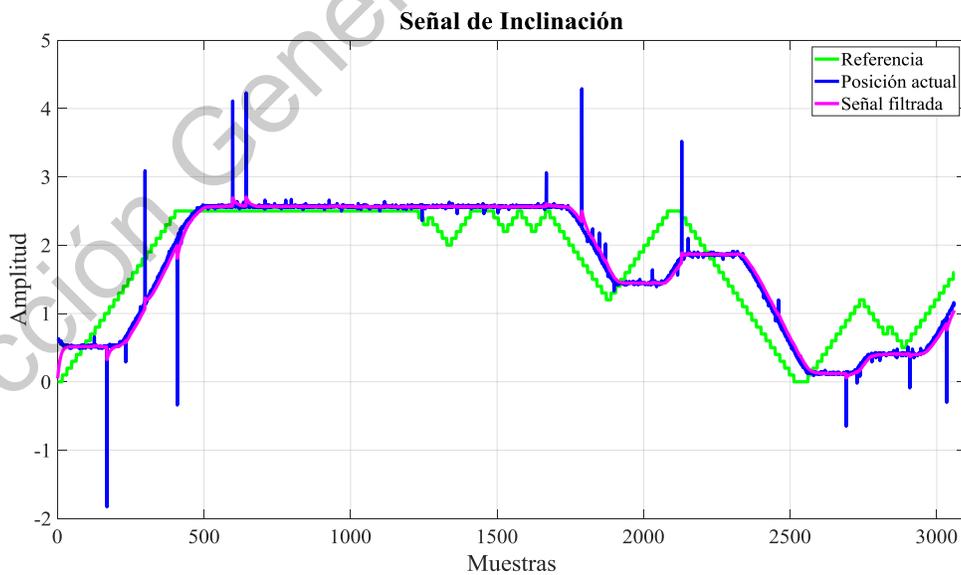


Figura 56 Señal de inclinación, prueba 4

En la Figura 57, se muestra la gráfica de rotación de la prueba 4, en la gráfica se puede observar que la prueba que se realizó, el panel solo se movió en un solo sentido como se aprecia en la señal de referencia, de igual forma podemos observar la señal de la posición, esta señal muestra un desfase respecto a la señal de referencia por el retardo en la respuesta del sistema.

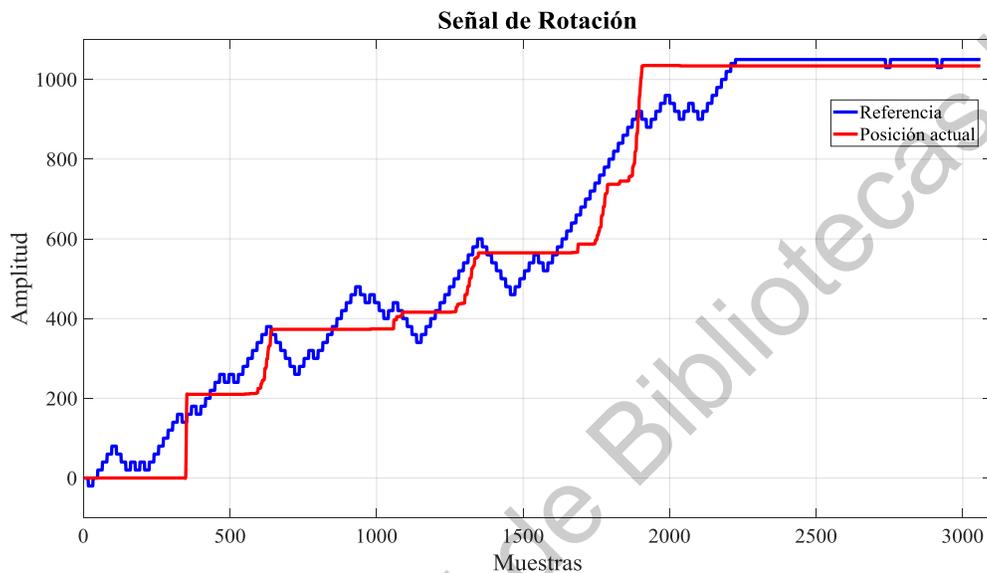


Figura 57 Señal de rotación, prueba 4

Capítulo 5

Conclusiones y prospectivas

Se realizó el prototipo mediante el software de diseño de SolidWorks de un sistema simple de posicionamiento que capte la energía solar.

Se construyó un sistema de posicionamiento mecánico basado en el prototipo realizado, donde se incluyó un sistema mecánico, un panel solar, actuadores y sensores ambientales, dicho sistema se construyó con materiales fáciles de conseguir, buscando siempre en economizar en costos.

Se desarrolló un sistema de control de posición en la plataforma Arduino, con el fin de tener un sistema de posicionamiento automático. Se integraron sensores ambientales al sistema los cuales retroalimentan al sistema de posicionamiento, además de que los sensores que se utilizaron son de bajo costo.

Al desarrollar el sistema de control en una plataforma como lo es Arduino, permite que el proyecto sea de arquitectura abierta, lo cual hace posible que en un futuro se puedan hacer mejoras, de igual forma permite la integración de sensores ambientales como temperatura, humedad entre otros, los cuales pueden ser factores de estudio en la captación de la luz.

Se validó el sistema desarrollado con las pruebas realizadas tanto en un entorno controlado como en un entorno real, el sistema de posicionamiento muestra que es capaz de seguir la señal de entrada, es decir, la señal que le proporcionan los sensores ambientales colocados en el panel.

Una de las prospectivas generales del proyecto es la mejora del sistema mecánico del sistema de posicionamiento automático, ya que este presenta un juego mecánico en la base de rotación del mecanismo, lo cual provoca sobrepasos en el sistema de control.

De igual forma queda como prospectiva, para el monitoreo de la energía, la integración de una tarjeta PQUAQ en el sistema de posicionamiento automático y en un sistema de posicionamiento fijo, para que se puedan realizar estudios basados en el análisis de la calidad de la energía de sistemas fotovoltaicos con el control de posicionamiento propuesto.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

Referencias

Arroyo, G. Cortés, L. (2015). DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MECANISMO AUTOMATIZADO PARA EL SEGUIMIENTO DE LA TRAYECTORIA SOLAR. [Tesis]. Universidad Nacional Autónoma de México.

CLIMA: TEQUISQUIAPAN. (s.f.). [Sitio Web]. Recuperado de <https://es.climate-data.org/location/28386/>

Definición de radiación solar. (13 de abril, 2017). [Sitio Web]. Recuperado de <https://solar-energia.net/definiciones/radiacion-solar.html>

Energía solar fotovoltaica (s.f.). [Sitio Web]. Recuperado de <http://enerbiomex.com/energía-solar/>

ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA. (s.f.). [Sitio Web]. Recuperado de <https://www.acciona.com/es/energias-renovables/energia-solar/fotovoltaica/>

Energía solar y sus beneficios ¿Qué es el efecto fotovoltaico? (s.f.). [sitio Web]. Recuperado de <https://www.certificadosenergeticos.com/energia-solar-beneficios-que-efecto-fotovoltaico>

ENERGÍAS RENOVABLES. (s.f.). [Sitio Web]. Recuperado de <https://www.acciona.com/es/energias-renovables/>

Escalante, T. (2012). Trayectoria solar. *Revista ARQHYS.com*. [Sitio Web]. Recuperado de <https://www.arqhys.com/arquitectura/trayectoria-solar.html>

González, R. (2012). Consecuencias del efecto invernadero. [Sitio Web]. Recuperado de <https://twenergy.com/a/consecuencias-del-efecto-invernadero-609>.

Grassi, F., Salum, G. M., & Ansaldi, J. C. (2012). Diseño de un Seguidor Solar de Dos Ejes Parametrizado por PC.

Influencia de la irradiación y temperatura sobre una placa fotovoltaica (s.f.). [Sitio Web]. Recuperado de <https://ingelibreblog.wordpress.com/2014/11/09/influencia-de-la-irradiacion-y-temperatura-sobre-una-placa-fotovoltaica/>

Ingelibre. Influencia de la irradiación y temperatura sobre una placa fotovoltaica. (9 de noviembre, 2014). [Sitio Web]. Recuperado de <https://ingelibreblog.wordpress.com/2014/11/09/influencia-de-la-irradiacion-y-temperatura-sobre-una-placa-fotovoltaica/>

Los tipos de paneles solares que debes conocer (s.f.). [Sitio Web]. Recuperado de <http://greendates.com.mx/tipos-de-paneles-solares-energia-solar/>

Machado, N. Lussón, A. Carralero, O. Leysdian, L. Bonzon, J. & Escalona, O. (2015). Seguidor solar optimizando el aprovechamiento de la energía solar. Ingeniería Energética. [Sitio Web]. Recuperado de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012015000200008

Martínez, J. (Marzo, 2014). IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CELDAS FOTOVOLTAICAS PARA EL ALUMBRADO DEL LABORATORIO DE AUTOMATIZACIÓN DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UAQ. [Tesis]. Universidad Autónoma de Querétaro.

Palomar, J. Casanova, P. Díaz, F. Cruz, F. & López, R. (2009). Nuevo sistema de seguimiento de dos ejes basado en el mecanismo de biela-manivela. DYNA- Ingeniería e Industria. [Sitio Web]. Recuperado de <http://web.b.ebscohost.com/abstract?direct=true&profile=ehost&scope=site&authtype=crawler&jrnl=00127361&AN=48216745&h=2rhBtkLIE6JE1R4LbhQpRLV6MbD78BTxqtFy9qoGhB1IOY1QtpUmBDeswul3T8t9NtSs4KWX4V6JUd2x18dplA%3d%3d&crl=c&resultNs=AdminWebAuth&resultLocal=ErrCrlNotAuth&crlhashurl=login.aspx%3fdirect%3dtrue%26profile%3dehost%26scope%3dsite%26authtype%3dcrawler%26jrnl%3d00127361%26AN%3d48216745>

Pérez, I. Destaca UAQ en desarrollo de dispositivos programables. (29 de junio, 2016). [Sitio Web]. Recuperado de <http://conacytprensa.mx/index.php/tecnologia/robotica/8213-destaca-uaq-a-nivel-internacional-en-dispositivos-programables-fpga-reportaje>

Pons, R. (S.F.). Entendiendo el Azimut y la Elevación. *PhotoPills*. [Sitio Web]. Recuperado de <https://www.photopills.com/es/articulos/entendiendo-el-azimut-la-elevacion>

RADIACIÓN DIRECTA, DIFUSA Y REFLEJADA. (S.F.). [Sitio Web]. Recuperado de <https://pedrojhernandez.com/2014/03/08/radiacion-directa-difusa-y-reflejada/>

Ramírez, M. (2017), Irradiación solar en una superficie plana con diferentes esquemas de seguimiento del Sol. [Tesis]. Universidad Nacional Autónoma de México.

Tipos de Energía Solar (s.f.). [Sitio Web]. Recuperado de <http://calefaccion-solar.com/tipos-de-energia-solar.html>

Vorobiev, P. (Noviembre, 2006). DISEÑO DE UN SISTEMA DE ORIENTACIÓN AUTOMÁTICA HACIA EL SOL, DE UN CALENTADOR SOLAR PLANO Y PANEL FOTOVOLTAICO. [Tesis]. Universidad Autónoma de Querétaro.