



Diseño y construcción de prototipo de seguidor solar fotovoltaico con sistema mecatrónico autónomo

Edwin Fabián Martínez Corredor

Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica
Tunja, Colombia
2020

Diseño y construcción de prototipo de seguidor solar fotovoltaico con sistema mecatrónico autónomo.

Edwin Fabian Martínez Corredor

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Electromecánico

Director:

Ing. Msc Juan David Rivera Niquepa

Línea de Investigación:

Mecatrónica

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Tunja, Colombia

2020

Porque el Señor da la sabiduría; conocimiento y ciencia brotan de sus labios.

PROVERBIOS 2:6

Agradecimientos

Primero que todo quiero darle gracias a Dios por el don de la vida, por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino personas que han sido mi soporte y apoyo para la realización de este sueño de ser Ingeniero electromecánico.

A mis padres por darme la vida, por sus consejos, valores y la constante motivación que me ha permitido ser una persona de bien, todo esto y mucho más se lo debo a ustedes y siempre estaré agradecido.

A mis hermanos por estar conmigo y por su ayuda incondicional, esto también se lo debo a ustedes.

Agradezco a los maestros, quienes marcaron cada etapa de mi camino universitario y me ayudaron a resolver las dudas presentadas en la elaboración del proyecto y a lo largo de mi carrera mediante asesorías, también a todos mis amigos y familiares que no recordé al momento de escribir estas palabras, que colaboraron en mi formación profesional y en la realización del proyecto.

Resumen

El presente proyecto describe el desarrollo de un prototipo de seguidor solar fotovoltaico con un sistema mecatrónico autónomo, el cual posee un rendimiento superior a los sistemas tradicionales de paneles fijos, utilizando una placa con microcontrolador programable que maneja la secuencia de movimiento en dos grados de libertad del seguidor.

Inicialmente se estableció un contexto conceptual fundamentado en la energía solar, donde se especifica el funcionamiento mecánico y electrónico del seguidor teniendo en cuenta los diferentes conceptos necesarios para el desarrollo del proyecto, posteriormente se dio la definición de las especificaciones técnicas cuantitativas del prototipo, que incluían todos los componentes del mismo, después se llevó a cabo la etapa de diseño comprendido por el esquema conceptual, de materialización y de detalle que incluye el principio de funcionamiento y modelado 3D en el que se muestra claramente cada una de las partes que lo componen y que son necesarias para la etapa de ensamble de cada una de las piezas y mecanismos electromecánicos; una vez finalizada esta etapa se desarrollaron una serie de pruebas que garantizaron la funcionalidad del prototipo según el diseño planificado y posteriormente se sintetizaron los resultados obtenidos de las pruebas realizadas, validaciones que permitieron dar cumplimiento a los objetivos planteados en el proyecto.

PALABRAS CLAVE: energía solar, fotovoltaico, seguidor solar, microcontrolador, panel solar, prototipo.

Abstract

This project describes the development of a prototype photovoltaic solar tracker with an autonomous mechatronic system, which has superior performance to traditional fixed panel systems, using a programmable microcontroller board that manages the movement sequence in two degrees of freedom of the follower.

Initially, it was established a conceptual context based on solar energy, the mechanical and electronic tracker's, taking into account the different concepts necessary for the development of the project, and later it was given the definition of the quantitative technical specifications of the prototype that included all the components of the prototype. Likewise, the design stage comprised by the conceptual, materialization and detail scheme was carried out, which includes the principle of operation and 3D modeling, which clearly shows each of the parts that make it up and that are important for the assembly stage of each of the electromechanical parts and mechanisms; Once this stage was completed, a series of tests were developed that guaranteed the functionality of the prototype according to the planned design, and the results obtained from the tests carried out under different operating conditions and the validations that allowed fulfilling the objectives set out in the draft.

Keywords: solar photovoltaic, solar tracker, microcontroller, solar panel, prototype.

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Lista de figuras.....	XIV
Lista de tablas	XVI
Lista de Símbolos y abreviaturas.....	XVIII
Introducción	1
Objetivos.....	3
Objetivo general.....	3
Objetivos específicos	3
1. Capítulo 1: Marco teórico	5
1.1 Energía solar.....	5
1.1.1 El sol como fuente de energía	5
1.1.2 Radiación solar.....	5
1.1.2.1. Medidas de la radiación solar	6
1.1.2.2. Elementos a tener en cuenta en la radiación solar que llega en la tierra	7
1.1.2.3. Radiación recibida en un panel solar	9
1.1.3 La energía solar fotovoltaica	9
1.1.4 El efecto fotovoltaico y las células solares	10
1.1.5 Paneles solares y tipos de células solares.....	11
1.1.6 Parámetros de funcionamiento de una célula solar.....	12
1.1.7 Orientación de los paneles solares	13
1.1.8 Seguidores solares	15
1.2 Sistema electrónico	19
1.2.1 Microcontrolador.....	19
1.2.2 Arduino	19
1.2.3 Tarjeta SHIELD expansión para Arduino	20
1.2.4 Módulo Slot o Adaptador de SD.....	20

1.2.5	Modulo reloj y calendario de tiempo real RTC DS1307	20
1.2.6	Sensores de luz visible: LDR.....	20
1.2.7	Sensor de Luz Ambiente TEMT6000.....	20
1.2.8	Modulo ACS712	21
1.2.9	Modulo FZ0430	21
1.3	Sistema eléctrico.....	21
1.3.1	Motores paso a paso.....	21
1.3.2	Drivers motores paso a paso.....	21
1.3.3	Regulador de carga.....	22
1.3.4	Baterías eléctricas.....	22
1.4	Sistema mecánico.....	22
1.4.1	Mecanismo sin fin - corona.....	22
1.5	Análisis computacional por medio de análisis de elementos finitos FEM	23
2.	Capítulo: Desarrollo metodológico.....	25
2.1	Definición de especificaciones para diseño.....	25
2.2	Diseño mecánico	27
2.2.1	Base soporte inferior	28
2.2.2	Soporte superior móvil.....	30
2.2.3	Mecanismo de transmisión de movimiento	31
2.3	Sistema electrónico.....	33
2.3.1	Microcontrolador Arduino Mega 2560 con tarjeta SHIELD de expansión.....	33
2.3.2	Sensores: Fotorresistores LDR, Sensor de Luz Ambiente TEMT6000	34
2.3.3	Recolección de datos y almacenamiento de información: modulo Slot, modulo RTC DS1307, modulo ACS712, modulo FZ0430	36
2.3.4	Programación del microcontrolador	37
2.3.5	Motores paso a paso	39
2.3.6	Controladores motores pasos a paso	42
2.4	Sistema eléctrico.....	45
2.4.1	Panel solar	45
2.4.2	Regulador de carga.....	46
2.4.3	Almacenamiento de energía.....	47
2.5	Ensamble del prototipo	54
3.	Capítulo: Pruebas y resultados	59

3.1	Pruebas y resultados preliminares de funcionamiento.....	59
3.2	Pruebas y resultados finales del prototipo	62
3.3	Simulación de comportamiento del prototipo en condiciones ambientales principales	69
4.	Conclusiones y recomendaciones.....	73
4.1	Conclusiones.....	73
4.2	Recomendaciones.....	75
	Anexo A: Manual de usuario: seguidor solar fotovoltaico EFMC MOD2020	77
	Anexo B: Planos mecánicos detallados	79
	Anexo C: Programación microcontrolador.....	80
	Lógica de programación para el funcionamiento de las LDR para el giro de motores paso a paso	80
	Anexo D: Fichas técnicas principales.....	88
	Anexo E: Resultados y cálculos complementarios	89
	Influencia del viento sobre el seguidor solar fotovoltaico.....	89
	Torque de salida de cajas reductoras para motores paso a paso	93
	Representaciones graficas de simulación de carga ejercida por el peso del soporte superior móvil sobre base soporte inferior	95
	Anexo F: Diagramas adicionales.....	100
	Bibliografía	101

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Distribución del espectro de la radiación solar	6
Figura 1-2: Movimientos de la tierra alrededor del sol	7
Figura 1-3: (a) Declinación solar respecto al plano del ecuador, (b) Variación anual de la declinación solar	8
Figura 1-4: Estructura célula fotovoltaica	10
Figura 1-5: Componentes panel solar	11
Figura 1-6: Parámetros característicos de un módulo fotovoltaico	13
Figura 1-7: Parámetros de orientación para paneles solares	15
Figura 1-8: Seguidor pasivo	16
Figura 1-9: Tipos de seguidores en un eje	17
Figura 1-10: Seguidor solar en dos ejes.....	18
Figura 1-11: Mecanismo sin fin corona	23
Figura 2-1: Boceto de diseño para seguidor solar fotovoltaico	27
Figura 2-2: Diseño base soporte Inferior	28
Figura 2-3: Diseño soporte superior móvil, (a) Vista frontal, (b) Vista trasera.....	31
Figura 2-4: (a) Ubicación de diseño para fotorresistores (LDR) en soporte, (b) Vista real de ubicación de LDR en soporte	34
Figura 2-5: Circuito general de conexión de fotorresistencias LDR	35
Figura 2-6: Diagrama de flujo general de la programación del microcontrolador	39
Figura 2-7: Diagrama de conexión general driver DRV8825 para motor paso a paso NEMA 17	42
Figura 2-8: Diagrama de conexión general driver TB6560 para motor paso a paso NEMA 23.....	44

Figura 2-9: Curva de profundidad de descarga de batería FL12280 (12V – 28Ah/20HR)	51
Figura 2-10: (a) Ensamble de soporte superior móvil soldadura de componentes, (b) posicionamiento de panel solar en ensamble superior móvil	54
Figura 2-11: (a) Organización para soldado de partes soporte base inferior, (b) Ensamble de base soporte inferior	55
Figura 2-12: (a) Conexión de caja reductora con motor paso a paso NEMA 17 usando carcaza en PLA, (b) vista de conexión de caja reductora con motor paso NEMA 17 usando acople cilíndrico	56
Figura 2-13: (a) Conexión de caja reductora con motor paso a paso NEMA 23 usando carcaza en PLA, (b) Rodamiento FY 3/4" TF - SKF para conexión entre base de soporte inferior y soporte superior móvil.....	57
Figura 2-14: Registro fotográfico ensamble del prototipo.....	58
Figura 3-1: Comportamiento de la potencia (W) obtenida por seguidor solar fotovoltaico en estado estacionario	63
Figura 3-2: Comportamiento de la potencia (W) obtenida por seguidor solar fotovoltaico en movimiento.....	65
Figura 3-3: (a) Perfil de irradiancia diaria (plano inclinado), (b) Resultados irradiancia diaria (plano inclinado)	67
Figura 3-4: Comportamiento del seguidor bajo condiciones de análisis FEM (velocidad de viento 3.25 m/s, temperatura 8° C, humedad 40%)	70

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1: Tipos de seguidores en un eje.....	17
Tabla 2-1: Resultados simulación elementos finitos (FEM) de la fuerza ejercida por el peso del soporte superior móvil sobre la base soporte inferior.....	29
Tabla 2-2: Estructura de programación de microcontrolador para seguidor solar fotovoltaico.....	38
Tabla 2-3: Características motor paso a paso NEMA 17 movimiento cenital (elevación) del seguidor	40
Tabla 2-4: Características motor paso a paso NEMA 23 movimiento en acimut del seguidor.....	41
Tabla 2-5: Control de operación driver motor paso a paso TB6560 para NEMA 23.....	44
Tabla 2-6: Características principales panel solar usado en el proyecto.....	45
Tabla 2-7: Características reguladores de carga	47
Tabla 2-8: Consumo sistema electrónico.....	48
Tabla 2-9: Consumo reguladores de voltaje	48
Tabla 2-10: Consumos energético general seguidor solar.....	49
Tabla 2-11: Porcentaje de capacidad afectado en la batería FL12280 según temperatura de operación	52
Tabla 2-12: Auto descarga de la batería FL12280 por tiempo de uso.....	52
Tabla 2-13: Energía disponible (Wh) por pérdidas de auto descarga de la batería FL12280 por promedio de temperatura de operación.....	53
Tabla 2-14: Días de autonomía con pérdidas por auto descarga la batería FL12280 por promedio de temperatura de operación	53
Tabla 3-1: Parámetros de prueba preliminar de seguidor en posición fija.....	60

Tabla 3-2: Estadística descriptiva de los datos obtenidos de potencia para el rango de tiempo definido (prueba preliminar de seguidor en posición fija)	60
Tabla 3-3: Parámetros de prueba preliminar de seguidor en movimiento.....	61
Tabla 3-4: Estadística descriptiva de los datos obtenidos de potencia para el rango de tiempo definido (prueba preliminar de seguidor en movimiento).....	61
Tabla 3-5: Parámetros para prueba de rendimiento de seguidor en posición fija	62
Tabla 3-6: Estadística descriptiva de los datos obtenidos de potencia para el rango de tiempo definido (prueba de rendimiento de seguidor en posición fija).....	63
Tabla 3-7: Parámetros de prueba de rendimiento de seguidor solar en movimiento	64
Tabla 3-8: Estadística descriptiva de los datos obtenidos de potencia para el rango de tiempo definido (prueba de rendimiento de seguidor en movimiento)	64
Tabla 3-9: Fuerzas ejercidas sobre las paredes del seguidor solar fotovoltaico bajo condiciones de análisis FEM (velocidad de viento 3.25 m/s, temperatura 8° C, humedad 40%).....	70
Tabla 3-10: Fuerzas ejercidas sobre las paredes del seguidor solar fotovoltaico bajo condiciones de análisis FEM (velocidad de viento 4.62 m/s, temperatura 8° C, humedad 50%).....	71
Tabla 3-11: Comportamiento del seguidor bajo condiciones de análisis FEM (velocidad de viento 4.62 m/s, temperatura 8° C, humedad 50%)	71

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
F_F	Factor de forma	NA (%)	Ecuación 1.1
I_{SC}	Intensidad o corriente de cortocircuito	A	
I_{mpp}	Intensidad en el punto de máxima potencia	A	Sección 1.1.6
P_{mpp}	Potencia máxima	W	
V_{oc}	Tensión en circuito abierto	V	
V_{mpp}	Tensión en el punto de máxima potencia	V	

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
η	Eficiencia del módulo	%	Sección 1.2
α	Orientación	Angulo en grados	
β	Inclinación	Angulo en grados	Sección 1.1.7
Φ	latitud	Valor numérico	
δ	Declinación solar	Angulo en grados	Sección 1.1.2.2
λ	Longitud de onda	μm	Sección 1.1.2

Subíndices

Subíndice	Término
mpp	Punto máxima potencia

Superíndices

Superíndice Término

o	Grados sexagesimales
n	Potencia numérica

Abreviaturas

Abreviatura	Término
IDE	Entorno de desarrollo integrado
NASA	Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
PVGIS	Sistema de información geográfico fotovoltaico Unión Europea
PWM	Modulación por ancho de pulso
NEMA	Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos
RTC	Real Time Clock (Reloj de tiempo real)
LDR	light-dependent resistor (Resistencia dependiente de la luz)
PLA	poli-ácido láctico

Introducción

La utilización de celdas fotovoltaicas para generar electricidad a partir de la radiación solar ha sido la rama de mayor desarrollo e investigación, pues esta manera de generación es de las más limpias que existen, y surge como una nueva alternativa de consumo de energía responsable con el medio ambiente, ante el impacto generado por la energía no renovable [1]. Sin embargo, a pesar de las grandes mejoras que se han hecho en los últimos 30 años, la eficiencia de los paneles solares aún es baja. Existen diversos factores que provocan reducciones importantes en la eficiencia, entre ellos la temperatura, la calidad de la celda, suciedad, la radiación que se recibe en la región y el ángulo de incidencia en el que se recibe la radiación solar [2]. Ante estos problemas, se han realizado investigaciones para encontrar maneras de minimizar los factores antes mencionados, por ejemplo, mejoras en las técnicas de construcción de las celdas fotovoltaicas, el uso de superficies disipadoras de calor, y el posicionamiento de los paneles colectores por medio de dispositivos de seguimiento los cuales ayudan a minimizar el ángulo de incidencia, es decir el ángulo que un rayo de luz crea con una línea perpendicular a la superficie, entre la luz que entra y el panel, lo cual incrementa la cantidad de energía que el sistema produce [3]. Actualmente se han desarrollado seguidores solares de movimiento en dos ejes lo cual significa una mayor obtención de energía del sol debido a que tienen un mayor alcance de posicionamiento comparado con los seguidores que rotan en una sola dirección [4].

Como sabemos, la posición del sol cambia diariamente, y también en las distintas épocas del año, es por ello que la detección de la posición del sol y la construcción de dispositivos que puedan direccionar los diferentes tipos de paneles perpendiculares al sol juegan un papel fundamental en el desempeño de los mismos [5], al colocar los paneles en dirección a los rayos solares, la radiación que pueden captar se hace máxima y por tanto se mejora la eficiencia en el sistema con respecto a los sistemas tradicionales en donde los paneles se encuentran fijos lo cual nos permiten aprovechar completamente la radiación solar diaria [6].

En nuestro caso particular se desarrolló un prototipo de seguidor solar utilizando un algoritmo de seguimiento según la luminosidad por medio de un microcontrolador programable al cual podemos adaptar una serie de periféricos con los cuales podemos monitorear las condiciones de funcionamiento del panel, especialmente en lo referente a luminosidad y cantidad de energía generada con la cual podemos evaluar condiciones de rendimiento del seguidor y del panel, adicionalmente se podrán adaptar otra serie de periféricos alimentados por el panel que nos permitan determinar condiciones climatológicas que nos permitirán desarrollar futuros proyectos de energía solar térmica y fotovoltaica a mayor escala dentro de la universidad. Adicionalmente el seguidor solar construido es una alternativa relativamente económica y viable comparada con los sistemas comerciales los cuales disponen de algoritmos astronómicos de alta precisión, por lo que aumenta el grado de complejidad y el costo para el propósito de estudio del proyecto.

El proyecto busca dar un primer paso para que la comunidad universitaria de la Universidad Antonio Nariño se interese en todo lo referente a las energías alternativas especialmente la energía solar fotovoltaica a partir del desarrollo de un prototipo de seguidor solar que sirva para futuros proyectos relacionados con energías renovables.

De acuerdo a lo planteado anteriormente formulamos la siguiente pregunta ¿Es posible diseñar y construir un prototipo de seguidor solar fotovoltaico con un sistema mecatrónico autónomo que tenga un rendimiento superior a los sistemas tradicionales de paneles fijos y que además permita a la comunidad universitaria de la universidad Antonio Nariño sede Tunja aprender sobre la energía solar fotovoltaica especialmente los seguidores fotovoltaicos? respuesta que se pretende dar con el planteamiento de los objetivos que se presentan en el proyecto y determinar su cumplimiento a través de resultados.

Objetivos

Objetivo general

- Diseñar y construir un prototipo de seguidor solar fotovoltaico con un sistema mecatrónico autónomo que tenga un rendimiento superior a los sistemas tradicionales de paneles fijos.

Objetivos específicos

- Definir especificaciones cuantificables para la construcción de un seguidor solar fotovoltaico.
- Diseñar un seguidor solar fotovoltaico como alternativa a los sistemas tradicionales de paneles fijos.
- Ensamblar un seguidor solar fotovoltaico bajo las condiciones de diseño establecidas previamente.
- Desarrollar pruebas de funcionalidad y rendimiento para un prototipo de seguidor solar fotovoltaico.
- Comprobar la eficiencia de los seguidores solares fotovoltaicos con respecto a los sistemas tradicionales de paneles fijos.

1. Capítulo 1: Marco teórico

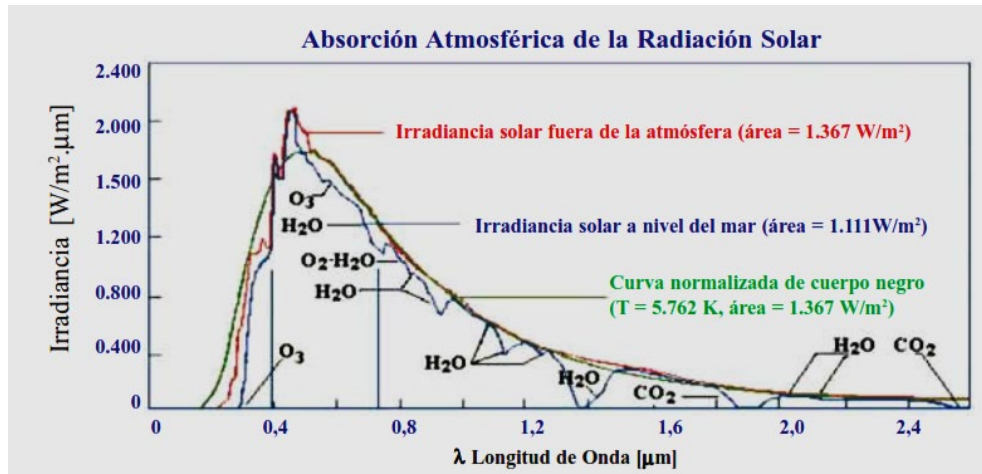
1.1 Energía solar

1.1.1 El sol como fuente de energía

El sol es la principal fuente de energía para los procesos biológicos de la tierra, podemos decir que la energía recibida anualmente por la tierra es de $1,5 \times 10^{18}$ KWh, lo que representa 10.000 veces el consumo de energía en ese mismo periodo, de esta manera podemos considerarlo como una fuente de energía disponible por gran cantidad de tiempo, de esta manera podemos aprovechar este recurso para obtener energía eléctrica y térmica usando diferentes sistemas de captación [5, p. 245].

1.1.2 Radiación solar

En la atmosfera terrestre se presenta una potencia de radiación promedio de 1367 W/m^2 (constante solar) [7, p. 83]. Esta energía en forma de radiación de onda corta está en un intervalo entre $0,290$ y $2,5 \mu\text{m}$ conocida como espectro de onda corta para distintos usos los cuales se encuentran especificados en la figura 1-1. donde se detalla la distribución espectral de la radiación solar para distintas longitudes de onda (λ) de las cuales podemos delimitar varias regiones como son: la región ultravioleta comprendida por ($\lambda < 0,38 \mu\text{m}$), la región visible ($0,38 \mu\text{m} < \lambda < 0,78 \mu\text{m}$) y la región infrarroja ($\lambda > 0,78 \mu\text{m}$), para cada una de estas regiones le corresponde un porcentaje de la energía total que incide sobre la parte superior de la atmosfera [7, p. 130].

Figura 1-1: Distribución del espectro de la radiación solar

Fuente: Distribución espectral de la radiación solar [7, p. 129]

La energía solar proveniente del sol se puede aprovechar al transformarla de dos maneras: En la primera la energía que proviene del sol en forma de calor la cual se denomina energía solar térmica, el calor puede ser aprovechado y transferido a otros cuerpos mediante colectores térmicos para distintos usos, uno de ellos puede ser llevar agua a vapor y por medio del ciclo Rankine tradicional generar electricidad proceso que se desarrolla en las centrales termosolares.

En la segunda la energía del sol se utiliza para producir energía eléctrica la cual se denomina energía fotovoltaica, de la cual profundizaremos en el presente proyecto.

1.1.2.1. Medidas de la radiación solar

La irradiación y la irradiancia son, respectivamente, magnitudes que cuantifican la potencia y la energía recibida por unidad de superficie debido a la radiación solar, magnitudes que describiremos a continuación:

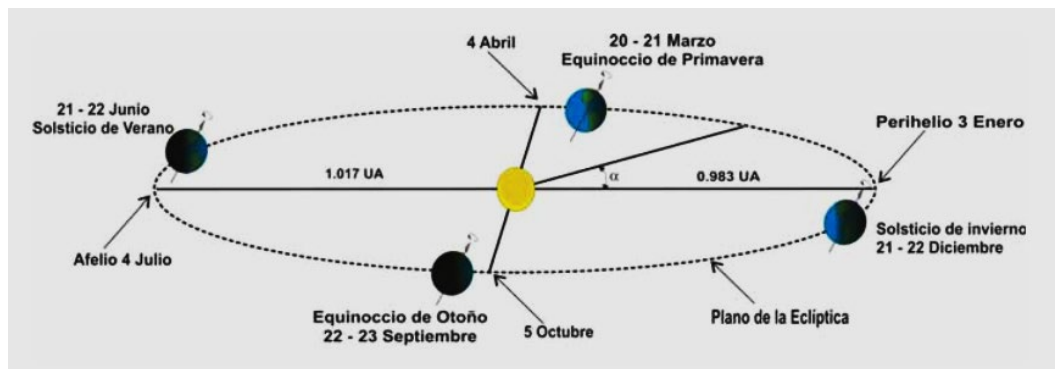
- **Irradiancia:** medida de la potencia solar incidente por unidad de superficie está cuantificado en W/m², a la superficie terrestre llegan aproximadamente 1000 W/m² si el cielo está despejado, dato normalizado que se utiliza para definir los parámetros nominales de los módulos fotovoltaicos [8, p. 24].
- **Irradiación:** la irradiación es la energía solar que recibe una unidad de superficie en un tiempo determinado está dada en Wh/m² [8, p. 24].

1.1.2.2. Elementos a tener en cuenta en la radiación solar que llega en la tierra

- **Factores astronómicos y geográficos**

Para calcular la radicación solar en el lugar donde se ubicará una instalación solar o en nuestro caso el seguidor solar es necesario tener en cuenta que el sol describe dos trayectorias una anual y otra diaria. La energía incidente sobre una superficie es mucho mayor en las horas centrales del día (mediodía) que en las horas cercanas al amanecer o a la puesta de sol y en el invierno los rayos del sol caen en un ángulo pequeño respecto a la horizontal mientras que en verano el ángulo es mucho mayor, ahora bien, la superficie terrestre recibe los rayos con una inclinación diferente según la época del año [9, p. 32] conceptos que detallaremos a continuación.

Figura 1-2: Movimientos de la tierra alrededor del sol



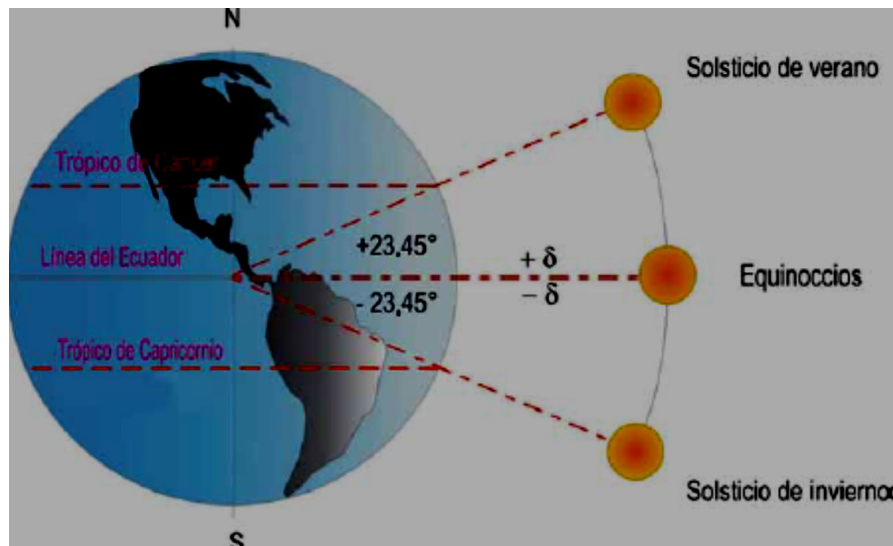
Fuente: movimiento de la tierra alrededor del sol [7, p. 116]

Para la Figura 1- 2 podemos destacar el perihelio donde la tierra se encuentra más cerca al sol siendo su radiación mayor y el afelio donde la tierra se encuentra mas alejada del sol siendo esta posición un 7% menos intensa en radiación solar con respecto al afelio.

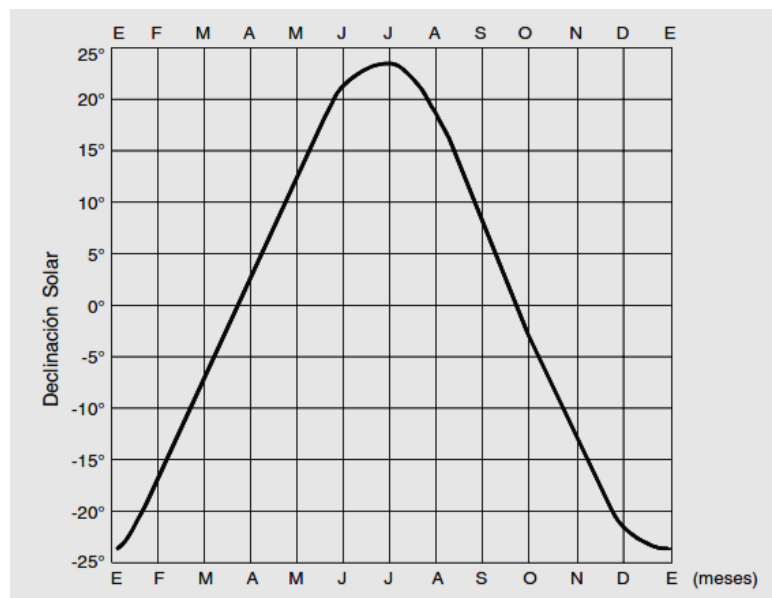
Otro de los factores a tener en cuenta es la declinación solar el cual es el ángulo que forma la línea del ecuador con respecto a la posición del sol, la declinación es positiva cuando el sol incide sobre el hemisferio norte y negativa sobre el hemisferio sur. De la figura 1- 3 se pueden resaltar el solsticio de invierno cuando el sol se encuentra en la parte más baja de hemisferio sur (-23.45°) y el solsticio de verano cuando el sol se encuentra mas al arriba de hemisferio norte ($+23.45^\circ$), también encontramos los equinoccios que se presentan

cuando el esta sobre el ecuador [10, p. 27]. La Figura 1-3 (a) representa la declinación solar y la Figura 1-3 (b) la variación anual de la declinación del sol (δ)

Figura 1-3: (a) Declinación solar respecto al plano del ecuador, (b) Variación anual de la declinación solar



(a)



(b)

Fuente: Grafica del cambio de declinación del sol - variación de la declinación del sol durante el año [7, p. 118].

1.1.2.3. Radiación recibida en un panel solar

La energía proveniente del sol conocida como radiación solar la cual recibe un módulo fotovoltaico o un captador solar térmico es la suma de los siguientes tipos de radiaciones y se conoce como radiación global.

- **Radiación directa:** proviene directamente del sol y se caracteriza por proyectar una sombra definida de los objetos opacos en los que incide [8, p. 12].
- **Radiación difusa:** es la radiación que sufre cambios en su dirección, principalmente debido a la reflexión y difusión en la atmosfera [9, p. 33]
- **Radiación reflejada o de albedo:** procede de la reflexión de la radiación incidente sobre el entorno (suelo, lagos, etc) [9, p. 33].

La inclinación de los paneles solares busca el mayor aprovechamiento de la radiación solar y consigue aumentar la cantidad de irradiancia W/m^2 , que es recibida por el panel por lo cual la correcta inclinación del panel solar determina valores más altos de irradiación y por tanto el aumento de la potencia generada, sin embargo, cuando la temperatura ambiente aumenta se produce un incremento en la temperatura de las células fotovoltaicas ya que en estas condiciones disipan peor el calor y como consecuencia se produce un descenso en la tensión sin carga, disminuyendo la potencia generada; de forma aproximada se puede decir que la potencia generada disminuye en torno al 15% cuando aumenta la temperatura del módulo desde 25 hasta 60 °C. [8, p. 24].

Para consultar los valores de radiación podemos revisar las bases de datos por ubicación que nos ofrece la NASA, la unión europea en su plataforma (PVGIS), solarGIS(Eslovaquia), NREL(departamento de energía de EE.UU), ArcGIS(España) o revisar el atlas interactivo de radiación del el IDEAM el cual nos ofrece datos de radiación para los principales lugares de la geografía nacional.

1.1.3 La energía solar fotovoltaica

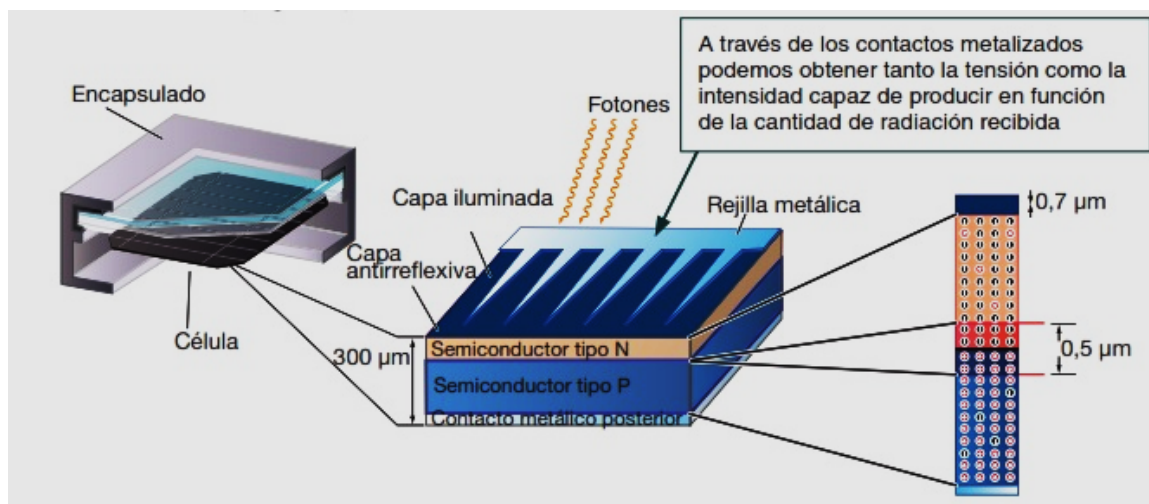
La energía solar fotovoltaica utiliza células fotovoltaicas elaboradas con materiales semiconductores que por efecto fotovoltaico producen una corriente eléctrica al incidir los rayos solares (radiación solar). Para la fabricación de células fotovoltaicas el silicio es el material más usado [11, p. 236].

1.1.4 El efecto fotovoltaico y las células solares

El efecto fotovoltaico es una propiedad que tiene algunos materiales de generar una corriente eléctrica cuando sobre ellos llega radiación lumínica, este es el principio de funcionamiento de las células solares las cuales se comportan como un diodo el cual es un componente electrónico fabricado con una unión P (conducción por huecos) y N (conducción por electrones) con la particularidad de conducir electricidad en un solo sentido, ahora bien, la parte expuesta a la radiación por parte de la célula solar es la parte N (silicio dopado con Boro) y la parte ubicada en donde no llega luminosidad es la parte P (dopado con fosforo) [9, p. 12].

Cuando el flujo solar incide sobre la capa de silicio del tipo N los fotones liberan cada uno un par electrón – hueco y los portadores de las cargas liberadas se propagan en el cristal por difusión, o bajo la influencia de un campo electromagnético. Por lo tanto, al ser absorbidos los fotones y liberados los portadores de cargas se produce el efecto fotoeléctrico bajo la forma de corriente eléctrica que circula desde la zona N hacia la zona P, cabe resaltar que el material semiconductor de la unión N- P no almacena energía eléctrica como lo hace una batería tradicional lo que hace es transformar la energía radiante que incide sobre él [12, p. 264]. La estructura de una célula solar se ilustra en la Figura 1-4.

Figura 1-4: Estructura célula fotovoltaica

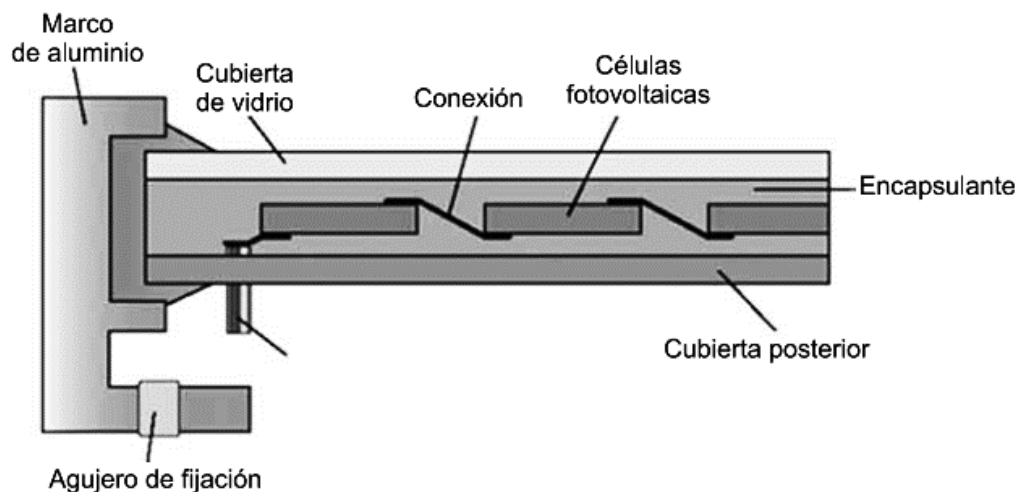


Fuente: Estructura de la célula solar [11, p. 12]

1.1.5 Paneles solares y tipos de células solares

Un panel solar o modulo fotovoltaico tiene un conjunto células conectas internamente y dispuestas generalmente en una estructura de aluminio, generalmente los paneles solares manejan tensiones de 6V, 12V, 24V a la salida en DC [9, p. 14]. Los principales componentes de un panel solar se ilustran en la Figura 1-5.

Figura 1-5: Componentes panel solar



Fuente: Componentes de un panel fotovoltaico [11, p. 238]

A continuación, se muestran los tipos de paneles solares según la fabricación de las células que los componen.

- **Paneles de células de silicio monocristalino:** su eficiencia es una de las más altas del mercado con un rendimiento directo entre 15% y 18%, dentro de sus características están su durabilidad y sus propiedades se deterioran poco con el paso del tiempo, están hechos con silicio puro fundido y dopados con boro [9, p. 14].
- **Paneles de células de silicio policristalino:** su eficiencia es menor comparada con los paneles monocristalinos encontrándose en un rendimiento directo entre 12% y 14%, la superficie de estos paneles está estructurada en cristales que contienen distintos tonos azules, y su la composición es la misma de los paneles monocristalinos sin embargo en los paneles policristalinos se disminuyen las fases de cristalización lo que reduce los costos de fabricación. [9, p. 14]

- **Paneles de células de silicio amorfo:** en estos paneles el rendimiento directo está por debajo del 10%, tienen un color marrón y son los paneles más económicos del mercado el consumo de material con respecto a los paneles monocristalinos y policristalinos es inferior, lo que reduce su eficiencia con el paso de los años. [9, p. 14]

Actualmente los paneles que alcanzan la mayor eficiencia son los paneles de arseniuro de galio (GaAs) los cuales alcanzan un rendimiento del 30% sin embargo presentan costos de fabricación elevados quedando limitados a aplicaciones especiales donde el bajo peso y las reducidas dimensiones son determinantes. Los módulos más utilizados actualmente en instalaciones fotovoltaicas son los paneles monocristalinos y policristalinos por su buena relación entre rendimiento y costo. [8, p. 52]

1.1.6 Parámetros de funcionamiento de una célula solar

Para el desarrollo del proyecto es necesario conocer cuáles son los parámetros más importantes que permiten caracterizar un módulo fotovoltaico los cuales son proporcionados por el fabricante, sin embargo, es necesario aclarar que los valores obtenidos por el fabricante son bajo condiciones estándar de manufactura valores que varían dependiendo del sitio donde son instalados, a continuación se resumen las principales características de una célula solar [9, p. 16]:

- **Intensidad o corriente de cortocircuito (I_{sc}):** se considera como la corriente que circula por el panel cuando la salida del mismo están en cortocircuito [9, p. 17].
- **Tensión en circuito abierto (V_{oc}):** es el voltaje en los terminales de conexión del panel cuando no existe ninguna carga conectada, siendo este valor de tensión el máximo que se puede extraer [9, p. 17].
- **Potencia máxima (P_{mpp} o P_p):** conocida también como potencia pico, que corresponde a la máxima potencia que puede generar el panel regularmente bajo condiciones estándar de manufactura [9, p. 17].
- **Tensión en el punto de máxima potencia (V_{mpp}):** es la tensión que proporciona el panel cuando está trabajando con su potencia pico o potencia máxima [9, p. 17].
- **Intensidad en el punto de máxima potencia (I_{mpp}):** es la corriente generada por el panel a potencia pico. [9, p. 17].

- **Factor de forma (F_F):** determina la relación entre la potencia máxima y el producto de la corriente de cortocircuito y la tensión en circuito abierto, mientras más próximo este valor se acerque a 1 mejor será la célula fotovoltaica [8, p. 96]. Ver ecuación 1.1

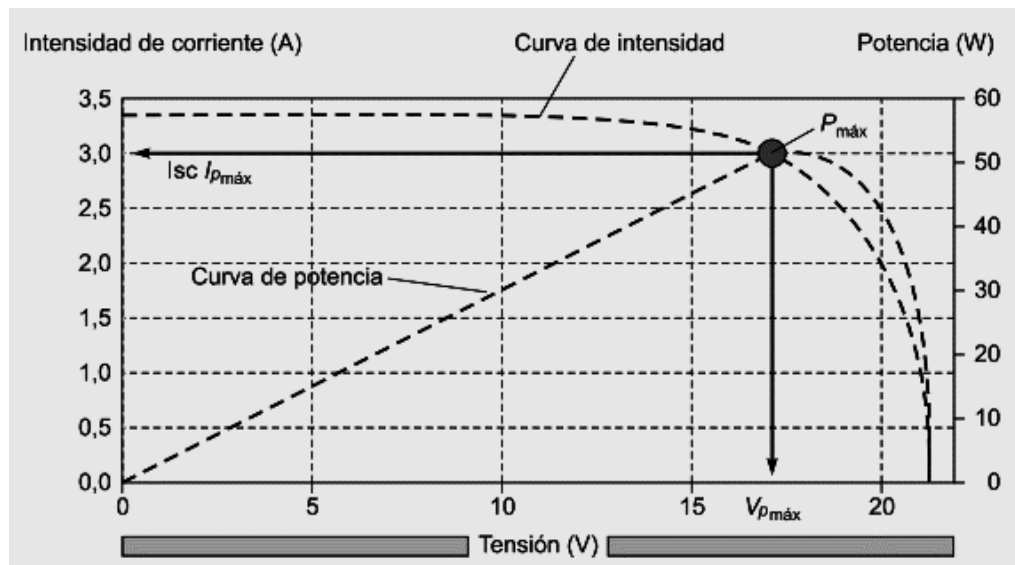
$$F_F = \frac{P_{mpp}}{V_{oc} * I_{sc}} \quad (1.1)$$

- **Eficiencia del módulo (η):** es la relación entre la potencia máxima generada por el módulo (condiciones ideales) y el producto del área superficial del módulo por la irradiancia que incide sobre el (en ocasiones el fabricante nos ofrece explícitamente este dato y está en 1000 W/m²) [8, p. 96]. Ver ecuación 1.2

$$\eta = \frac{P_{mpp}}{A * 1000 \text{ W/m}^2} \quad (1.2)$$

Los parámetros anteriormente detallados se muestran en la figura 1-6.

Figura 1-6: Parámetros característicos de un módulo fotovoltaico



Fuente: Característica I-V de una célula FV [11, p. 271]

1.1.7 Orientación de los paneles solares

Para el desarrollo de instalaciones solares fotovoltaicas es necesario conocer algunos conceptos fundamentales para el análisis de la orientación y la inclinación de paneles solares, conceptos que ilustramos a continuación:

- **Orientación (α):** viene caracterizada por el ángulo de acimut, α , que se define como el ángulo que forma la proyección sobre el plano horizontal de la perpendicular a la superficie del módulo con el meridiano de un sitio definido [8, p. 8].
- **Inclinación (β):** depende principalmente de la latitud del lugar (a mayor latitud mayor inclinación) y de la época en que se prevea dar uso a la instalación (para aplicaciones de uso invernal se requiere una mayor inclinación que para aplicaciones de uso en verano) [8, p. 8].

La mayor parte del territorio colombiano se encuentra en el hemisferio norte, por tanto, la orientación de los módulos y captadores debe ser hacia el sur geográfico no hacia el sur magnético es decir el ángulo de acimut debe ser 0° , los valores positivos del ángulo de acimut muestran una orientación hacia el oeste, mientras que los negativos indican que la orientación es hacia el este, cabe resaltar que un error hasta de 15° respecto a la posición óptima de orientación hace disminuir muy poco la radiación captada, aunque debe evitarse desviaciones superiores a este valor [8, p. 8].

Los módulos y los captadores solares reciben una radiación solar que depende del ángulo que formen con una superficie horizontal. Es posible lograr una captación máxima cuando el ángulo inclinación sea tal que su posición sea perpendicular a la radiación incidente, lo cual es posible lograr por medio de los seguidores solares los cuales realizan un seguimiento óptimo de inclinación en cada momento, tema del cual trata el presente proyecto [8, p. 8].

Cuando se determina la inclinación óptima de un panel solar fijo la latitud influye de gran manera, cuanto más al norte de Colombia nos encontremos la latitud será mayor por tanto mayor será la inclinación para aprovechar la máxima radiación incidente [8, p. 9].

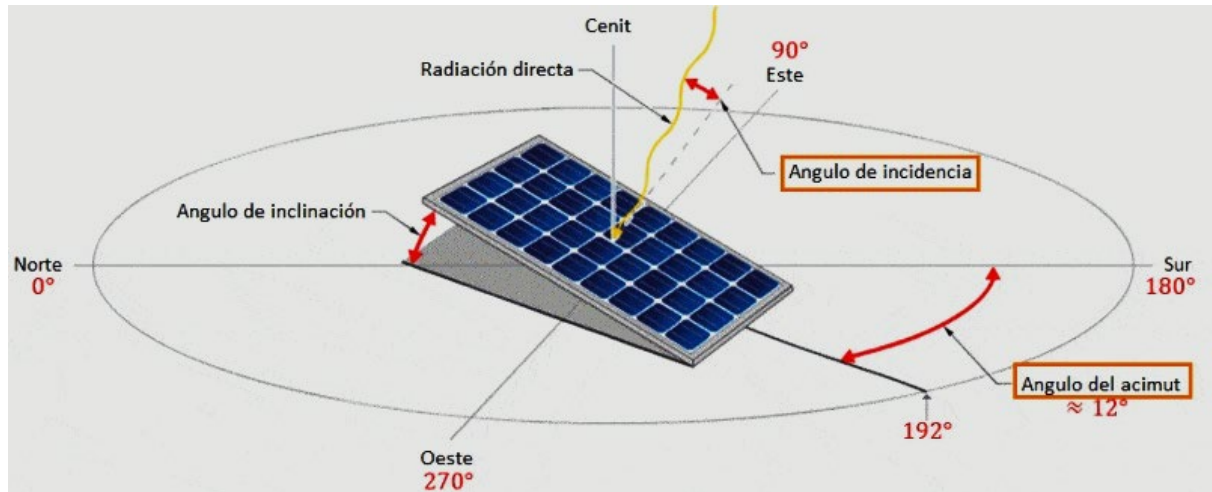
Para calcular el ángulo de inclinación (β) de los módulos de una instalación conectada a la red puede utilizarse la ecuación 1.3 sin embargo en las instalaciones fotovoltaicas aisladas el objetivo es garantizar el suministro teniendo en cuenta las condiciones de uso.

$$\beta = 3.7 + 0.69 * \phi \quad (1.3)$$

Siendo β el ángulo de inclinación óptimo y ϕ la latitud del lugar tomada con signo positivo [8, p. 10].

En la figura 1-7. se ilustran los parámetros a tener en cuenta para la orientación de paneles solares

Figura 1-7: Parámetros de orientación para paneles solares



Fuente: Ángulos de inclinación, de incidencia y de orientación (azimut) de los paneles solares [13]

1.1.8 Seguidores solares

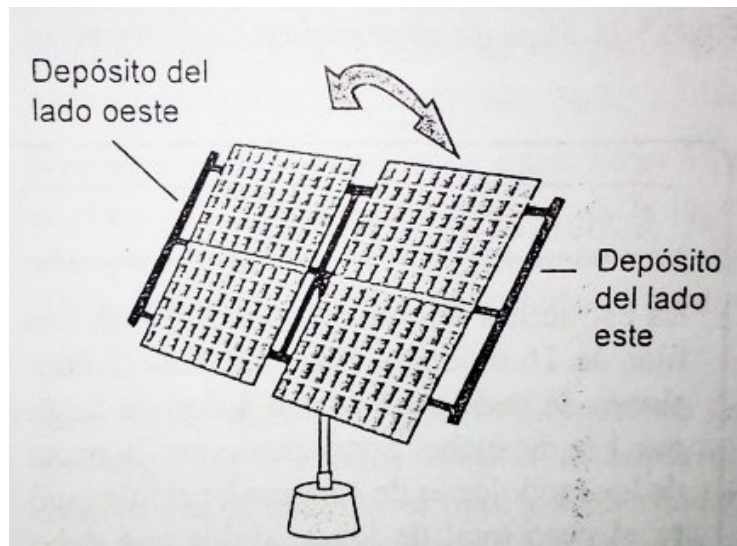
En este caso los paneles siguen la trayectoria del sol a lo largo del día intentando obtener siempre la mejor inclinación para la recepción de los rayos solares es decir que los rayos solares incidan de forma perpendicular a los módulos fotovoltaicos, se estima que según el funcionamiento de los seguidores solares comerciales se puede aumentar el rendimiento en un 30 – 40% con respecto a los sistemas tradicionales de paneles fijos [9, p. 94].

De acuerdo al funcionamiento del sistema de seguimiento los seguidores solares pueden ser de dos tipos:

- **Seguidor pasivo:** los seguidores pasivos realizan su movimiento sin consumir energía eléctrica utilizando el calor procedente del sol que modifica la distribución del peso que existe en sus lados este y oeste, la estructura dispone de un depósito en el lado este y otro en el lado oeste, que contiene un líquido de bajo punto de ebullición (freón) dichos depósitos cuentan con unas placas metálicas las cuales cuando las placas de un lado quedan expuestas al sol, las del otro lado quedan a la sombra. Al amanecer el líquido del lado opuesto al sol aumenta su temperatura y entra en ebullición mientras que el

lado que está a la sombra se mantiene en estado líquido. Los gases que se forman se dirigen hacia la zona más fría, condensando y aumentando el peso de esa zona lo que genera un movimiento de rotación de sentido oeste a este de tal forma que en la medida que trascurre el día el sol va calentado las partes metálicas de los depósitos en diferentes zonas regulando de esta manera la circulación de gases y a la vez la rotación de la estructura [8, p. 195].

Figura 1-8: Seguidor pasivo



Fuente: Seguidor pasivo [8, p. 195]

- **Seguidor activo:** los seguidores solares activos consumen cierta cantidad de energía eléctrica para el mecanismo de movimiento mediante motores de diferente tipo, los cuales dirigen el movimiento que puede ser en uno o dos grados de libertad, en este tipo de seguidores se incorpora un mecanismo de emergencia que direcciona los paneles solares paralelos al terreno ante fuertes vientos permitiendo que la superficie expuesta sea inferior y de esta forma evitar daños en los mecanismos y en la estructura del seguidor, esta posición también se optada por este tipo de seguidores en horario nocturno [8, p. 196].

En función del número de ejes los seguidores solares se pueden clasificar en:

- **Seguidores en un eje:** son aquellos en los que el movimiento del seguidor se realiza en una sola dirección los cuales se pueden distinguir en la tabla 1-1.

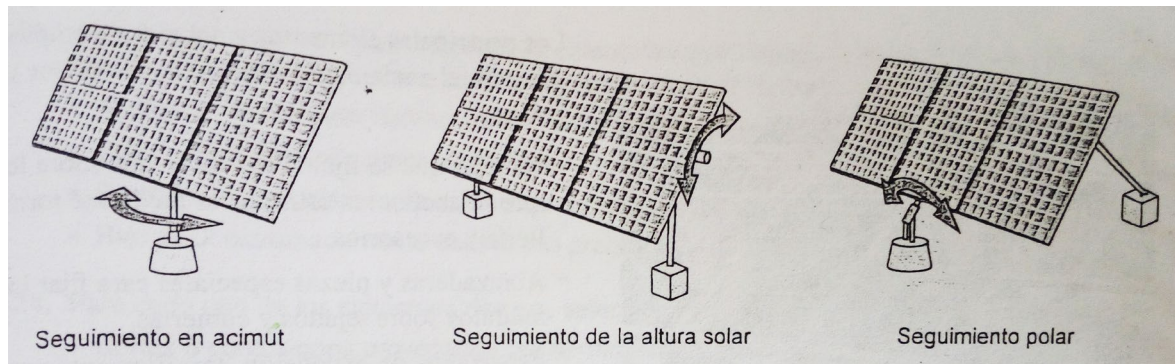
Tabla 1-1: Tipos de seguidores en un eje

Tipo	Funcionamiento
Seguimiento en acimut	los módulos tienen una inclinación fija y su estructura gira de este (al amanecer) a oeste (al atardecer) cada día en torno a un eje vertical para que la orientación sea correcta
Seguimiento de la altura solar (cenital)	Los módulos se colocan de forma paralela a un eje horizontal (cuya dirección es norte - sur), que gira la estructura de este a oeste para que la incidencia de los rayos sea lo más perpendicular posible.
Seguimiento polar	El seguidor gira en torno a un eje orientado en dirección norte – sur y que forma un determinado Angulo con respecto a la horizontal para que los módulos tengan una inclinación correcta, realizando el giro de este a oeste, es similar al seguidor en eje horizontal, pero incluye la mejora de incluir cierta inclinación

Fuente: seguimiento en un eje [8, p. 196]

En la figura 1-9. se ilustran los principales seguidores en un eje

Figura 1-9: Tipos de seguidores en un eje



Fuente: tipos de seguimiento en un eje [8, p. 197]

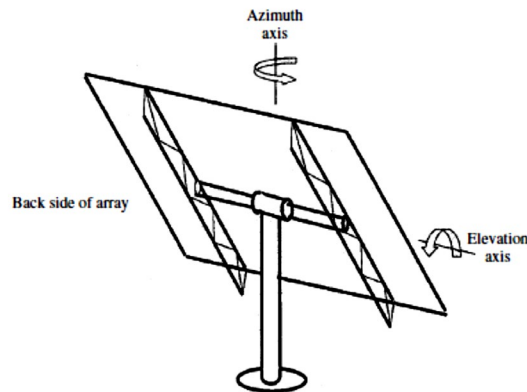
- **Seguidores en dos ejes:** son sistemas más sofisticados que los sistemas de seguimiento de un eje ya que realizan el seguimiento tanto de la altura solar como en acimut. Son los que presentan mayor eficiencia en cuanto al rendimiento de producción energética [9, p. 95].

Generalmente la estructura de los seguidores solares de dos ejes se compone de un mástil metálico donde se encuentra montado el seguidor el cual rota sobre su eje en ciclos diarios

de este a oeste siguiendo la posición en sentido acimutal este moviendo suele ser accionado por un motor eléctrico en posición vertical, a su vez esta estructura también varía su inclinación para garantizar una incidencia perpendicular de los rayos solares sobre los módulos en seguimiento cenital del sol, movimiento también realizado por un motor en posición horizontal [8, p. 197].

En la figura 1-10. se ilustra el principio de funcionamiento de un seguidor solar en dos ejes

Figura 1-10: Seguidor solar en dos ejes



Fuente: Two-axis tracking configurations. [14, p. 457]

Los principales sistemas de seguimiento usados ejecutan un movimiento según las directrices que les marcan algunos de los sistemas de seguimiento de la trayectoria de sol que describiremos a continuación:

- **Seguimiento por sensores fotoeléctricos:** estos sensores determinan el ángulo que forman los rayos incidentes sobre el módulo con la perpendicular de su superficie. Las señales de estos sensores son transmitidas al sistema de actuación para poner en marcha los motores y alcanzar el ángulo de inclinación de acuerdo a la señal recibida por los sensores, los cuales están fijos a los módulos y se mueven con ellos, sin embargo, el sistema tiene la desventaja de no poder realizar un seguimiento correcto cuando las nubes ocultan el sol [8, p. 198].
- **Seguimiento por reloj solar:** los motores que mueven la estructura actúan bajo un determinado horario marcado por relojes los cuales marcan el movimiento de rotación en los dos ejes, teniendo en cuenta la altura del sol dependiendo del día y del año en concreto, sin embargo no es un sistema muy preciso comparado con los otros sistemas de seguimiento [8, p. 198].

- **Seguimiento por coordenadas astronómicas:** las coordenadas que rigen el movimiento de la estructura están dadas por ecuaciones que buscan predecir la ubicación del sol en algún momento determinado, aunque la implementación de un algoritmo de este tipo representa un alto grado de complejidad comparado con los demás sistemas de seguimiento el seguimiento por coordenadas astronómicas es el que tiene mayor exactitud [8, p. 198].

1.2 Sistema electrónico

1.2.1 Microcontrolador

Es el dispositivo encargado de realizar las instrucciones definidas por la persona que programa el dispositivo de forma autónoma, en un sistema electrónico el microcontrolador es el componente más importante, está compuesto por una unidad central de proceso una memoria y una serie de patillas de entrada y salida [15, p. 62] .

1.2.2 Arduino

Es una placa de hardware libre que incorpora un microcontrolador reprogramable de tipo AVR (familia de microcontroladores del fabricante estadounidense Atmel) en la cual podemos conectar diferentes dispositivos, los cuales podemos controlar por medio de la programación que nosotros deseemos en el microcontrolador reprogramable, la cual utiliza programación basada en C y C++. Para realizar la programación utilizamos un entorno de programación integrado conocido con IDE que nos permite realizar modificaciones y correcciones en el código antes de que sean ejecutadas por el microcontrolador [15, p. 64].

Existen diferentes placas de arduino dependiendo del uso que necesitemos el cual está dado en función del tamaño, la memoria, el número de pines y el tipo de microcontrolador. Para el desarrollo del proyecto se utilizó una placa de Arduino Mega 2560 la cual por sus características se ajusta a los requerimientos del proyecto y de la cual hablaremos a continuación:

1.2.3 Tarjeta SHIELD expansión para Arduino

Además de las placas de arduino existen los denominados Shield (escudo), la cual tienen como función el ampliar la capacidad de la placa que nosotros vamos a utilizar en el proyecto (Arduino Mega 2560) y que muchas veces no es suficiente para conectar todos los dispositivos que nosotros requerimos para el proyecto [15, p. 117].

1.2.4 Módulo Slot o Adaptador de SD

Diseñado para aplicaciones de manera mucho más dinámica y sencilla especialmente para sistemas de control se conecta a la tarjeta SHIELD expansión para Arduino, en el momento de conectar una tarjeta SD es posible leer o escribir códigos de programación de la misma manera que recolectar datos de los periféricos que se conecten, el módulo cuenta con un regulador interno de 3.3 V para alimentar la SD y permitir su correcto funcionamiento [16].

1.2.5 Modulo reloj y calendario de tiempo real RTC DS1307

Un reloj de tiempo real (RTC) es un módulo electrónico que al conectarse a la tarjeta SHIELD expansión para Arduino permite obtener mediciones de tiempo en las unidades temporales que se emplean de forma cotidiana, los RTC son más parecidos a los relojes y calendarios que usamos habitualmente funcionando con segundos con minutos, horas, días, semanas, meses y años. También tiene la ventaja de reducir el consumo de energía, aportar mayor precisión y liberar a arduino de tener que realizar contabilización de tiempo, los RTC vienen incorporados con una batería interna para mantener el valor del tiempo en caso de pérdida de alimentación [17].

1.2.6 Sensores de luz visible: LDR

Estos sensores están compuestos por una resistencia la cual cambia su valor cuando sobre el incide mayor o menor cantidad de luz, son fabricados de sulfuro de cadmio y son conocidos como LDR “resistor dependiente de la luz” [15, p. 391].

1.2.7 Sensor de Luz Ambiente TEMT6000

Este sensor funciona como un fototransistor, entre mayor sea la luz incidente, mayor será la corriente en el pin de salida. Este sensor tiene mayor exactitud comparado con las LDR porque tiene mayor rango antes los cambios de iluminación [15, p. 405].

1.2.8 Modulo ACS712

El módulo ACS712 es un componente que permite medir la corriente, este componente trabaja con un sensor de efecto hall que detecta el campo magnético que se produce por inducción de la corriente por el conductor sobre el cual se está midiendo, lo que el sensor interno hace es dar una salida de voltaje proporcional a la corriente que pasa por ese conductor [18].

1.2.9 Modulo FZ0430

El módulo FZ0430 es un sensor de voltaje que consiste en un divisor de tensión conformado por dos resistores uno de 7.5 k Ω y uno de 30 k Ω , con el cual podremos ser capaces de reducir el voltaje medido y por tanto medir una tensión máxima de 25 V, para un procesador de tensión de alimentación de 5 V (Vcc) y 16,5 V para un procesador de 3.3 (Vcc) [19].

1.3 Sistema eléctrico

1.3.1 Motores paso a paso

Los motores paso a paso son motores que giran por medio de pasos o pulsos los cuales pueden ser configurados modificando los patrones de corriente según sea necesario, lo que permite ubicar al eje del motor en una posición exacta, estos motores tienen un mayor torque a menor velocidad comparados con los motores tradicionales DC, dentro de los tipos de motores paso a paso encontramos los unipolares y bipolares siendo estos últimos los de mayor torque sin embargo su control es más complicado [15, p. 280].

1.3.2 Drivers motores paso a paso

Para controlar y coordinar los patrones de corriente de un motor paso a paso es necesario usar un driver el cual toma la señal de control de baja corriente y luego la convierte en una señal de corriente más alta que pueda conducir al motor de acuerdo a una secuencia establecida y con un control de corrientes adecuado en las bobinas.

1.3.3 Regulador de carga

El regulador de carga es el dispositivo que nos permite cargar una batería evitando sobrecargas y alargando su vida útil, además garantiza una carga suficiente y una descarga excesiva de la batería [9, p. 18].

1.3.4 Baterías eléctricas

Las baterías son dispositivos que nos permiten transformar la energía química en eléctrica, para nuestro caso particular estas son recargadas usando el regulador de carga, y dan autonomía al sistema en caso de no contar con la electricidad suministrada por el panel. [9, p. 21]. En una instalación solar la batería tiene como funciones: dar autonomía un número determinado de días, dar potencia instantánea en un nivel elevado si es necesario y fijar la tensión de trabajo de la instalación.

Dentro de la selección de baterías es necesario tener en cuenta los siguientes parámetros:

- **Capacidad:** cantidad de electricidad que puede obtenerse en una descarga total del acumulador iniciando de un estado de carga total, está dado por amperios hora (Ah) [9, p. 21].
- **Eficiencia de carga:** corresponde a la relación entre la energía usada para recargar la batería y la energía real almacenada [9, p. 21].
- **Autodescarga:** es la capacidad que la batería pierde sin tener ninguna carga conectada [9, p. 22].
- **Profundidad de descarga:** corresponde al porcentaje que se obtiene de la batería en una descarga teniendo la batería completamente cargada [9, p. 22].

1.4 Sistema mecánico

1.4.1 Mecanismo sin fin - corona

Este mecanismo consiste en un tornillo sin fin y una corona sin fin (también llamada engranaje de gusano o corona sin fin) como el que se ilustra en la figura 1-11, conectan ejes perpendiculares entre si, usualmente dispuestos en ángulos rectos. Lo tornillos sin fin usualmente solo tienen un diente conocido como entrada las cuales determinan la velocidad de giro de la corona a la salida [20, p. 630].

Si el sinfín es de una sola entrada, por cada vuelta que gira el tornillo, la corona avanza un diente. O lo que es igual para que la corona de una vuelta completa el tornillo sinfín ha debido girar tantas vueltas como dientes tiene la corona [21].

Los mecanismos de tonillo sin fin proporcionan bajas velocidades y altos torques además de tener autobloqueo es decir no tendrá movimiento de retroceso, este movimiento es transmitido del motor al sin fin y este a la corona, lo que le permite soportar grandes cargas por ejemplo, la carga del peso del panel solar en caso de bloqueo de posición para el movimiento del seguidor solar fotovoltaico en una posición determinada [20, p. 631].

Figura 1-11: Mecanismo sin fin corona



Fuente: Mecanismo sin fin corona [20, p. 631]

1.5 Análisis computacional por medio de análisis de elementos finitos FEM

El análisis de elementos finitos es un método computarizado que nos permite predecir como reaccionara una estructura o un elemento a una condición determinada que puede ser una fuerza, al calor, al flujo de fluidos y a otros efectos físicos del mundo real, el análisis de elementos finitos descompone un objeto real en un número (entre miles y cientos de miles) de elementos finitos, como pequeños cubos. Las ecuaciones matemáticas permiten predecir el comportamiento de cada elemento. La computadora cumple la función de sumar todos los comportamientos individuales para predecir el comportamiento real del objeto [22]

2. Capítulo: Desarrollo metodológico

2.1 Definición de especificaciones para diseño

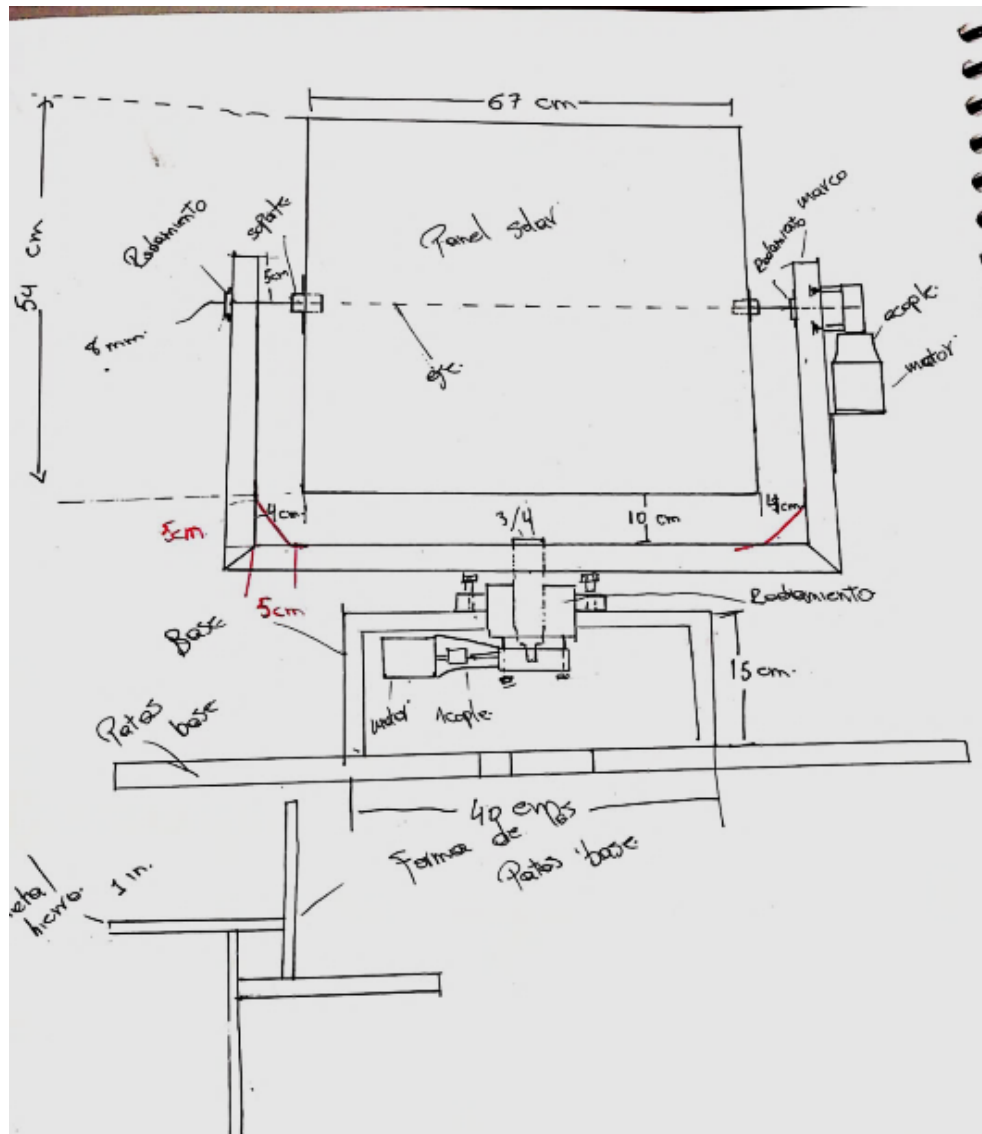
En esta primera etapa de desarrollo del proyecto es necesario definir las generalidades con las cuales pretendemos crear el prototipo y bajo que parámetros queremos que se haga para lo cual es necesario definir las siguientes condiciones:

1. El seguidor será un seguidor activo según el tipo de estructura que se usará, el tipo de seguimiento será en dos grados de libertad los cuales tendrán un rango de movimiento básico del sol en un día normal tanto en elevación como en azimut y el movimiento estará dado por medio de motores paso a paso.
2. El seguidor estará limitado a un panel solar de 50 W bajo el cual se diseñará la estructura y demás componentes que sean necesarios para su movimiento.
3. La estructura de la base en la cual estará soportado el panel solar a la cual denominaremos como base del seguidor estará construida por perfiles metálicos tubulares de acero que tenga mayor resistencia mecánica comparados con la parte móvil del seguidor y que permitan ser perforados, doblados y soldados de ser necesario.
4. La parte móvil del seguidor en la cual se encontrará el panel será de un metal liviano como el aluminio lo cual permitirá ahorrar energía a los motores que dan movimiento al seguidor.
5. Se tratará de usar la menor cantidad de soldadura para las uniones que sean necesarias realizar en cambio se utilizaran uniones roscadas para que en caso de manteniendo o cambio de alguna de las partes como el panel y el sistema de movimiento del seguidor estas puedan ser desmontadas y cambiadas con facilidad.

6. El sistema de seguimiento se ejecutará por medio de sensores foto resistivos LDR los cuales determinaran el ángulo que forman los rayos incidentes sobre el módulo con la perpendicular de su superficie, los LDR comparados con otros sensores son dispositivos económicos, estables y fiables a temperaturas elevadas y ambientes hostiles por esto son usados en gran variedad de aplicaciones como en alumbrado público, su intercambio es relativamente fácil en caso de falla además de que su configuración y programación dentro del microcontrolador no requiere mayor complejidad.
7. Para el control operacional del dispositivo se dispondrá de una tarjeta arduino mega basada en el microcontrolador ATmega2560, que será la encargada recibir la señal analógica de las LDR y por medio de una programación especifica definir el movimiento de los motores paso a paso, adicionalmente será la encargada de recibir la señal de los sensores que realizan las mediciones en el dispositivo.
8. La programación utilizada para dar movimiento al seguidor será una programación que permita cumplir con el objetivo del proyecto sin requerir cálculos complejos de posicionamiento que requieren otro tipo de seguidores (seguimiento por coordenadas astronómicas), y que permita ser modificada en caso de ser necesario.
9. Los materiales y componentes a utilizar serán exequibles en el mercado nacional y local de tal forma que estos puedan ser adquiridos tanto en tiendas electrónicas, ferreterías o almacenes de comercialización metales, ya sea por comercio en línea o por compra directa, esto dará la facilidad de conseguir los componentes de forma rápida y ser intercambiados en caso de algún mantenimiento o cambio de alguna pieza.

El diagrama presentado en el anexo F (DIAGRAMA BÁSICO DE FUNCIONAMIENTO DEL SEGUIDOR) representa los requerimientos de diseño básicos que se pretenden para el funcionamiento del seguidor. De la misma manera la figura 2-1 se representa el boceto general con el cual se comenzó el diseño del seguidor solar fotovoltaico en su estructura.

Figura 2-1: Boceto de diseño para seguidor solar fotovoltaico



Fuente: Autor

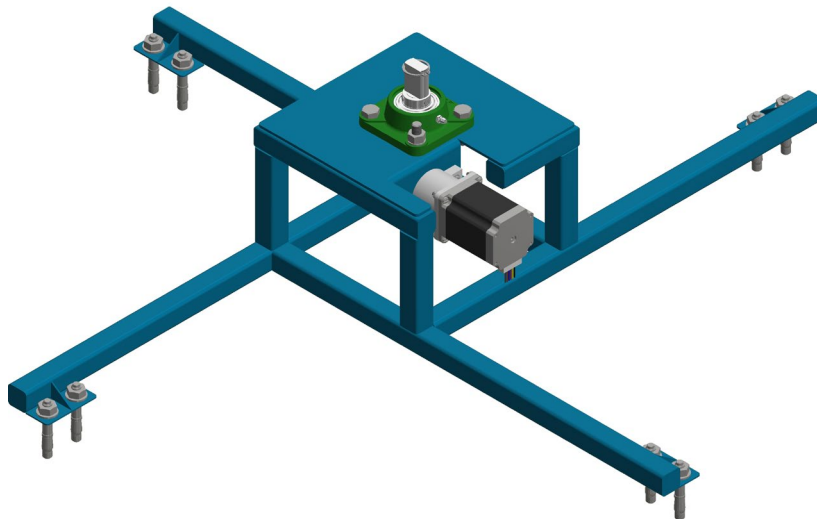
2.2 Diseño mecánico

En este capítulo estableceremos las especificaciones y arquitectura del prototipo de tal manera que podamos darnos una idea de la estructura modular la cual estará sustentada en dos partes fundamentales de la estructura mecánica y son: la base soporte inferior y el soporte superior móvil del panel solar.

2.2.1 Base soporte inferior

A partir de la idea referenciada en las especificaciones para el diseño se comenzó a dar forma a una de las dos partes fundamentales que componen la estructura del seguidor de esta manera se dispuso la creación de la base la cual debe soportar todos los componentes que dan movimiento al seguidor, la cual debe ser en un material resistente tanto a las cargas sometidas como al ambiente al que va a estar expuesta, la base debe contener parte del sistema que da movimiento al seguidor en sentido acimut y debe permitir ser empotrada para dar mayor estabilidad al seguidor. En la figura 2-2 se ilustra el diseño para la base de soporte inferior utilizando el programa Autodesk Inventor

Figura 2-2: Diseño base soporte Inferior



Fuente: Autor Autodesk Inventor

Las especificaciones del diseño completo de la base de soporte inferior se encuentran disponibles dentro del Anexo B - Planos mecánicos detallados (PLANO 1 - 2), ahora con respecto a la carga que tiene que soportar la base tomaremos el peso del soporte superior sobre la base el cual sería de (68.8 N) teniendo en cuenta principalmente la masa del panel fotovoltaico seleccionado de 50 W de 4.3 kg (ficha técnica panel solar del anexo D) , la masa de la transmisión de movimiento superior que incluye el motor NEMA 17 con la caja reductora y el resto de componentes que se muestran en la figura 2-3, llegando un valor de 7 Kg dando un margen de holgura por encima de la masa real para realizar la simulación de elementos finitos y aumentar el factor de seguridad, ahora teniendo el valor de la carga de 68.8 N realizamos una simulación de elementos finitos FEM por medio de Autodesk

Inventor para determinar la tensión de Von Mises, dicho valor nos indica cual es el esfuerzo máximo en el eje en donde se encuentran los esfuerzos principales, con el valor de von Mises máximo obtenido en algún punto de la estructura lo comparo con la tensión máxima admisible del material (límite elástico) en nuestro caso se usara acero galvanizado como material para la base (46000 psi – 317.17 MPa límite de elasticidad del material seleccionado), resultados obtenidos en la tabla 2-1.

Tabla 2-1: Resultados simulación elementos finitos (FEM) de la fuerza ejercida por el peso del soporte superior móvil sobre la base soporte inferior

Nombre	Mínimo	Máximo
Volumen	1345170 mm ³	
Masa	10,5596 kg	
Tensión de Von Mises	0 MPa	2,37754 MPa
Primera tensión principal	-0,637583 MPa	2,04257 MPa
Tercera tensión principal	-2,34604 MPa	0,493453 MPa
Desplazamiento	0 mm	0,000321256 mm
Coefficiente de seguridad	15 su	15 su
Tensión XX	-1,36982 MPa	1,4887 MPa
Tensión XY	-0,641682 MPa	0,801347 MPa
Tensión XZ	-0,976122 MPa	0,6486 MPa
Tensión YY	-2,0991 MPa	1,57112 MPa
Tensión YZ	-0,873803 MPa	0,671383 MPa
Tensión ZZ	-1,35938 MPa	1,0421 MPa
Desplazamiento X	-0,0000361083 mm	0,0000541912 mm
Desplazamiento Y	-0,000321087 mm	0,0000141071 mm
Desplazamiento Z	-0,000036711 mm	0,0000516749 mm
Deformación equivalente	0 su	0,0000103028 su
Primera deformación principal	-0,0000000351309 su	0,00000861108 su
Tercera deformación principal	-0,00000921056 su	0,000000146692 su
Deformación XX	-0,00000516301 su	0,00000648031 su
Deformación XY	-0,00000397232 su	0,00000496072 su
Deformación XZ	-0,00000634479 su	0,00000375893 su
Deformación YY	-0,00000763083 su	0,00000661801 su
Deformación YZ	-0,00000567972 su	0,00000436399 su
Deformación ZZ	-0,0000049112 su	0,0000046897 su
Presión de contacto	0 MPa	5,31422 MPa
Presión de contacto X	-3,21921 MPa	3,61928 MPa
Presión de contacto Y	-5,31084 MPa	4,47585 MPa
Presión de contacto Z	-2,1267 MPa	1,98398 MPa

Fuente: Autor Autodesk Inventor

De los resultados anteriores destacamos la tensión de Von mises en la cual el valor máximo es de 2,37754 MPa valor muy por debajo del límite elástico del material seleccionado (acero galvanizado), lo cual indica que este material soporta ese esfuerzo máximo de Von mises simulado y es un material adecuado para ser usado en la construcción del prototipo, la primera tensión principal máxima de 2,04257 MPa representa la tensión de elasticidad máxima que presenta en la pieza debido a la carga del peso del soporte superior móvil, la tercera tensión representa la compresión máxima -2.34604 MPa, el desplazamiento representa la magnitud de la deformación con respecto a la pieza original sin recibir la carga del peso y el factor de seguridad por encima de uno llegando 15 indica el grado de capacidad máxima de la estructura con respecto el requerimiento real (carga del peso) al tener un valor de 15 el grado de confiabilidad es muy alto.

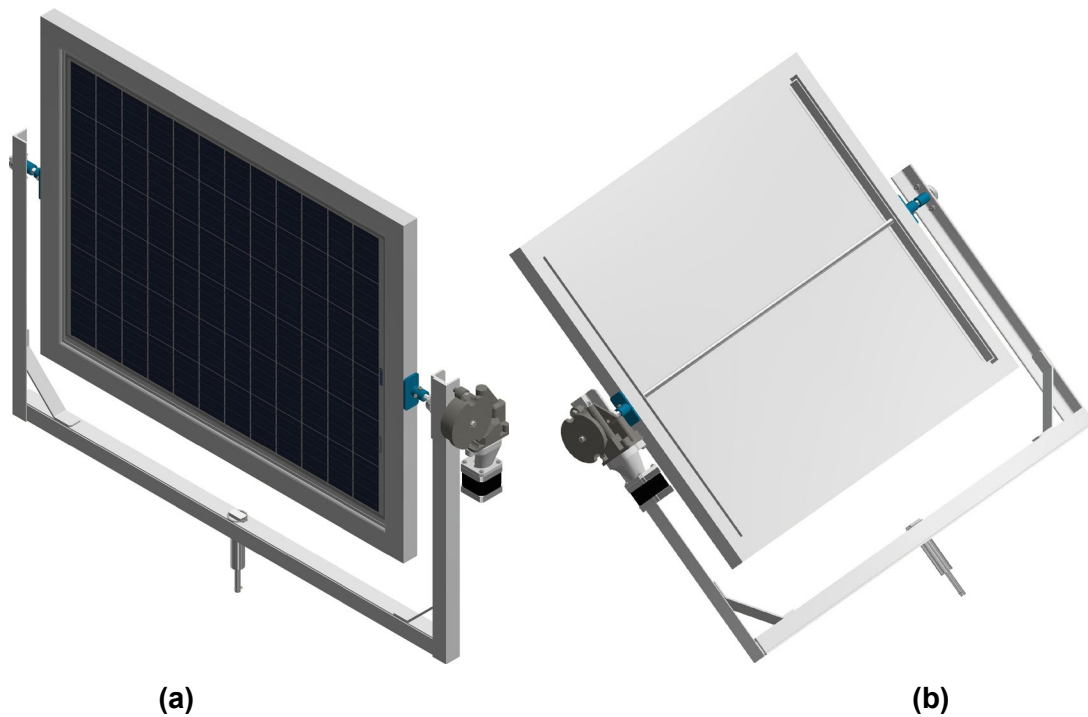
Como complemento a los resultados presentados anteriormente dentro del Anexo E - Resultados y cálculos complementarios se encuentran algunas graficas que ilustran lo hallado en la simulación anterior.

2.2.2 Soporte superior móvil

La segunda parte fundamental de la estructura del seguidor solar fotovoltaico corresponde al soporte superior móvil, la cual debe contener al panel y al sistema de trasmisión que da movimiento en sentido cenital del seguidor, debe estar construida en un material resistente pero liviano que permita soportar las cargas a las cuales estará sometido especialmente las cargas de viento.

Las especificaciones del diseño completo del soporte superior móvil se encuentran disponibles dentro del Anexo B - Planos mecánicos detallados (PLANO 3 - 4), ahora teniendo en cuenta que las mayores cargas que pueden afectar el soporte superior móvil se presentan por el viento, por medio de un análisis detallado del mismo se determinó que la fuerza ejercida por el viento sobre el panel es de 4.82 N para la una posición de 90° la cual es la de mayor incidencia del viento, para detallar estos cálculos a profundidad se dispuso en el anexo E - Resultados y cálculos complementarios en donde se especifican a detalle dichos cálculos.

Figura 2-3: Diseño soporte superior móvil, **(a)** Vista frontal, **(b)** Vista trasera



Fuente: Autor Autodesk Inventor

2.2.3 Mecanismo de transmisión de movimiento

Con el fin de transmitir el movimiento entre el motor y el seguidor es necesario un mecanismo que trasmita el movimiento entre ejes perpendiculares según la disposición de los motores de esta manera se dispuso el uso de una caja reductora compuesta por un mecanismo sin fin corona sin garganta la cual está compuesta por un tornillo sin fin de una entrada y una corona de 65 dientes con una relación de trasmisión de 1:65 ($1/65$), una de las ventajas que presenta este mecanismo es evitar la transmisión del movimiento desde la corona al sin fin lo que permite un autobloqueo de la caja reductora y mantener fija la posición del panel cuando este se ubique en una posición determinada adicional a lo anterior este mecanismo permite reducir la velocidad y aumentar el par de giro de los motores paso a paso.

Para obtener el número real de pasos posibles tenemos que tener en cuenta que los motores realizan 200 pasos/vuelta, ahora este valor debe ser multiplicado por el factor de

reducción del sistema sin fin corona así: 200 pasos (pasos del motor por ficha técnica) con 1/65 (relación reducción caja reductora) sería de $200 \cdot 65 = 13000$ pasos por vuelta a la salida de la corona lo que se traduciría en que el motor tendría que realizar 13000 pasos para dar una vuelta en la salida de la corona, ahora teniendo en cuenta este valor tenemos. Ver ecuación 2.1

$$\alpha = \frac{2\pi}{SPR} \quad (2.1)$$

α = ángulo de paso de la corona expresado radianes

$SPR = N^\circ$ de pasos / vuelta de la corona

$$\alpha = \frac{2\pi}{13000}$$

$$\alpha = \frac{2\pi}{13000} = 4.83 \cdot 10^{-4} \text{ radianes} = 0.02767^\circ$$

Este valor representa los grados de avance de la corona por 1 paso del motor paso a paso ahora bien dentro de la programación se definieron una serie de parámetros como son la velocidad de avance de los motores como 1 paso por segundo, y se estableció en 30 pulsos (pasos) de avance para los motores traducidos en $(0.02767 \cdot 30) = 0.8301^\circ$ de avance en las coronas de las cajas reductoras de los dos motores las cuales son iguales, cabe resaltar que para realizar la unión entre el eje del motor con la caja reductora se usaron acoples rígidos definidos en los planos de detalle y se dispusieron de dos piezas creadas por impresora 3D que cumplen la función de unir las carcasas de los motores con la carcasas de las cajas reductoras estas piezas se encuentran construidas en PLA material con buena resistencia a la tracción y buen acabado superficial que se ajusta a la función necesaria dentro de la estructura del panel, las dimensiones y formas de estas dos piezas se encuentran dentro del anexo de planos de detalle (ANEXO B – PLANO 2 - 3) de la misma manera que las características del material usado para las piezas en impresora 3D disponible en el anexo de fichas técnicas (ANEXO D - FICHA TECNICA PLA)

De acuerdo a los torques mecánicos de los motores especificadas en las tablas 2.3 y 2.4 es necesario determinar los toques de salida en las cajas reductoras para los dos motores para los cuales se obtuvieron 33.79 Nm como torque de salida para la corona de la caja reductora del motor NEMA 17 que da movimiento al seguidor en el sentido cenital, y 50.98 Nm como torque de salida para la corona de la caja reductora del motor NEMA 23 que da

movimiento en el seguidor en el sentido acimut. Los cálculos detallados referentes a este ítem se encuentran disponibles en el Anexo E - Resultados y cálculos complementarios (Torque de salida de cajas reductoras para motores paso a paso).

2.3 Sistema electrónico

Para el desarrollo del proyecto es muy importante contar con una serie de dispositivos que permitan dar control y funcionamiento al seguidor solar, de esta manera se dispusieron una serie de componentes que son:

- Sensores: fotorresistores (LDR), sensor de luz ambiente TEMA6000, medidor de parámetros eléctricos de salida panel, sensor ACS712 y sensor FZ0430.
- Circuitos internos de procesamiento los cuales procesan la señal eléctrica según sea necesario tanto de entrada como de salida esto por medio del hardware del sistema y el conjunto lógico de instrucciones que pueda ejecutar de forma autónoma en nuestro caso el microcontrolador Arduino MEGA 2560 con su Tarjeta SHIELD de expansión y los controladores de los motores paso a paso.
- Los actuadores: Motores paso a paso NEMA 17 y NEMA 23.
- La fuente de alimentación que proporciona la energía necesaria para la operación del sistema electrónico sería la batería alimentada por el panel solar.

Adicional a los dispositivos anteriores es necesario instalar una serie de módulos a la placa del microcontrolador que nos permitirán medir ciertos parámetros eléctricos para luego esta información ser almacenada, con el fin de evidenciar la eficiencia del seguidor, a continuación, detallaremos sobre los elementos que componen el sistema electrónico.

2.3.1 Microcontrolador Arduino Mega 2560 con tarjeta SHIELD de expansión

Para el control de movimiento es fundamental contar con un dispositivo electrónico que nos permita ejecutar de forma autónoma las diferentes instrucciones definidas dentro de la programación del mismo, adicionalmente el microcontrolador arduino tiene grandes ventajas con respecto a otros microcontroladores como son su bajo costo, flexibilidad de trabajo en varias plataformas informáticas, es una plataforma abierta para el público, y además tiene grandes beneficios en entornos educativos uno de los propósitos que se pretenden con el desarrollo del proyecto.

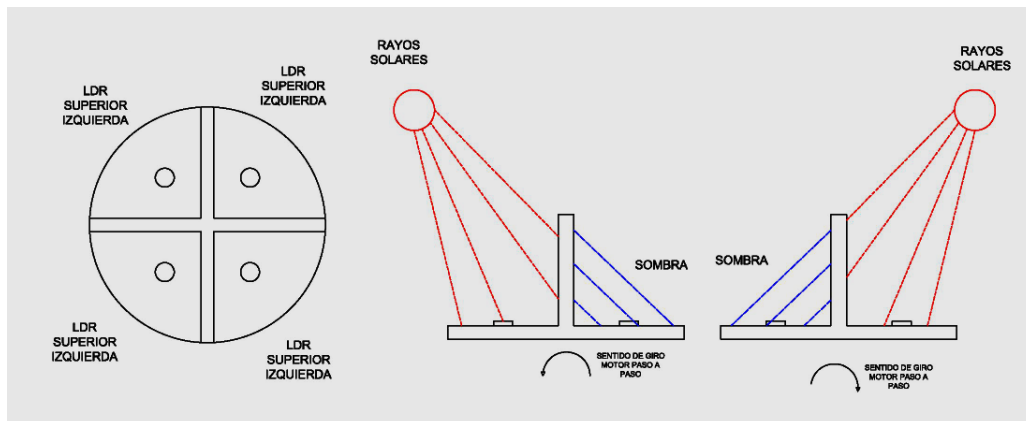
Con respecto a las otras placas, arduino mega es el microcontrolador más robusto y capaz de la familia arduino, gracias a la cantidad de pines que posee, la memoria que dispone y el microcontrolador ATmega2560 de la placa se determinó que era el adecuado para el proyecto [15, p. 102]. Las características adicionales se encuentran disponibles dentro del anexo D de fichas técnicas (FICHA TECNICA ARDUINO MEGA 2660).

Como complemento a la placa del microcontrolador es necesario contar con un módulo de expansión Shield V2.0 para arduino Mega, esta board de expansión está diseñada para permitir fácilmente la conexión de todas las entradas, salidas digitales y entradas análogas de diferentes dispositivos como sensores, controladores de motores y módulos adicionales que son necesarios para el control y operación del seguidor [23].

2.3.2 Sensores: Fotorresistores LDR, Sensor de Luz Ambiente TEMT6000

Para determinar la posición del sol se usaron 4 fotorresistores según especificación de ficha técnica en anexo D (FICHA TECNICA – LDR), los cuales cambian su valor de resistencia dependiendo de la luz que llega a cada LDR, estas se ubican de acuerdo a la disposición establecida en la estructura que las contiene, que se puede apreciar en la figura 2-4.

Figura 2-4: (a) Ubicación de diseño para fotorresistores (LDR) en soporte, (b) Vista real de ubicación de LDR en soporte



(a)

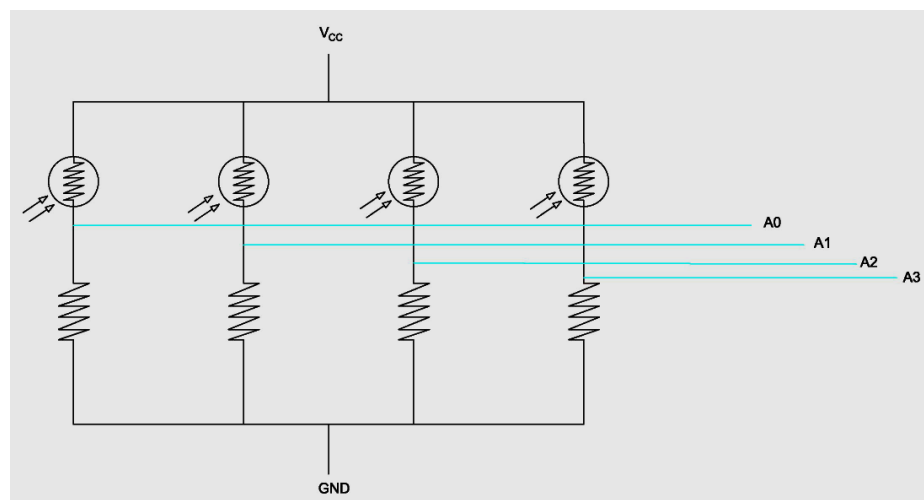


(b)

Fuente: Autor

La división utilizada para separar las LDR y que se aprecia en la figura 2-2 se utiliza para limitar la intensidad lumínica que incide sobre cada LDR en cada cuadrante lo cual aumenta la precisión de seguimiento. Una vez establecida la ubicación de las LDR se realiza la conexión del circuito de forma general como se presenta en la figura 2- 5 y se encuentra detallado en el anexo F (DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA DE COMPONENTES EN EL SISTEMA)

Figura 2-5: Circuito general de conexión de fotorresistencias LDR



Fuente: Autor

Del circuito mostrado en la figura 2-5 podemos apreciar los divisores de voltaje en donde estamos utilizando resistencias de (220Ω) para poder medir el voltaje resultante, el cual vamos a hacer llegar en forma de entrada analógica a las entradas analógicas A0, A1, A2, A3 de arduino en un rango comprendido entre 0 a 1023.

El voltaje de salida varía en función de la resistencia de cada una de las LDR (inversamente proporcional) en la medida que haya más luminosidad su resistencia será menor y el voltaje de salida será mayor, ahora si hay menos luminosidad o nos encontramos en completa oscuridad su resistencia será mayor y por tanto su voltaje de salida se aproximara a 0. Estas variaciones de voltaje son recibidas por el microcontrolador e ingresan a la programación definida en el anexo C (LÓGICA DE PROGRAMACIÓN FOTORRESISTENCIAS LDR), la cual se analiza en la programación del microcontrolador para ser transmitidas a los actuadores que son los motores paso a paso y que darán movimiento al seguidor solar fotovoltaico tanto en el sentido azimutal como cenital.

Como sensor adicional se acondicionó un sensor de luz ambiente analógico el cual es el TEMT6000, dentro de las fichas técnicas del anexo D (FICHA TECNICA TEMT6000) se encuentran las especificaciones detalladas y en el anexo F (DISTRIBUCION ELECTRICA DE COMPONENTES EN EL SISTEMA) se evidencia la forma de conexión a la placa del microcontrolador, cabe resaltar que para el sensor TEMT6000 se realiza un mapeo de los valores obtenidos de la entrada analógica obtenidos del sensor en un rango de 0 a 1023 llevado a un rango de 0 a 100 donde 100 representa el valor más alto de luminosidad en porcentaje, valor que nos permitirá determinar el grado de luminosidad en un día y que tendremos en cuenta para la realización de las pruebas del prototipo.

2.3.3 Recolección de datos y almacenamiento de información: modulo Slot, modulo RTC DS1307, modulo ACS712, modulo FZ0430

Para el proyecto es necesario la recolección de la información registrada por los sensores adaptados a la tarjeta del microcontrolador, información referente a los parámetros eléctricos del panel solar datos provenientes del módulo ACS712 y FZ0430 que nos permiten evidenciar la eficacia del seguidor con respecto a los paneles solares dispuestos en una única orientación, y los datos de intensidad luminosa información complementaria registrada por el sensor de luz ambiente TEMT6000.

De esta manera se dispuso del uso de un módulo para conexión de SD para almacenar los datos en forma de un archivo que pueda ser guardado para ser posteriormente analizados en el cualquier ordenador, la interfaz de comunicación entre el microcontrolador y el módulo para tarjeta SD se logra mediante el bus de interfaz periférica SPI de arduino, este bus de comunicación se utiliza para conectar uno o más dispositivos periféricos (esclavos) a un microcontrolador (maestro). Para la recolección de información es necesario la utilización de un Modulo RTC DS1307 como complemento al módulo slot y asociar los datos obtenidos por los sensores en un tiempo específico constituyéndose en un registrador de datos (datalogger), para observar algunos de los archivos guardados en la memoria SD podemos revisar el anexo E (DATALOGGER PRUEBAS DE RENDIMIENTO (11-05-2020)-(12-05-2020)-(09-05-2020)-(10-05-2020)) donde se encuentran disponibles algunos archivos en formato (.txt) extraídos de la SD en la etapa de pruebas del seguidor.

La forma de conexión del módulo slot, el modulo RTC DS1307, el modulo ACS712, el modulo FZ0430, se encuentran disponibles en el anexo F (DISTRIBUCION ELECTRICA DE COMPONENTES EN EL SISTEMA) y las características dentro del anexo D de fichas técnicas, de la misma manera dentro de la programación del microcontrolador anexo C se encuentra especificado la programación de estos módulos.

2.3.4 Programación del microcontrolador

Teniendo en cuenta los requerimientos para el funcionamiento del seguidor es necesario precisar una serie de instrucciones ordenadas las cuales son definidas por medio de la plataforma integrada de desarrollo que brinda arduino en la cual se desarrolló la programación para ser cargada al microcontrolador, Inicialmente lo que se pretende con la programación es cumplir con el objetivo fundamental de dar movimiento al seguidor solar con los actuadores, sin embargo es necesario acondicionar la programación para algunos sensores adicionales y el almacenamiento de información. En la tabla 2-2, se especifica de forma general la programación del microcontrolador para el funcionamiento del seguidor.

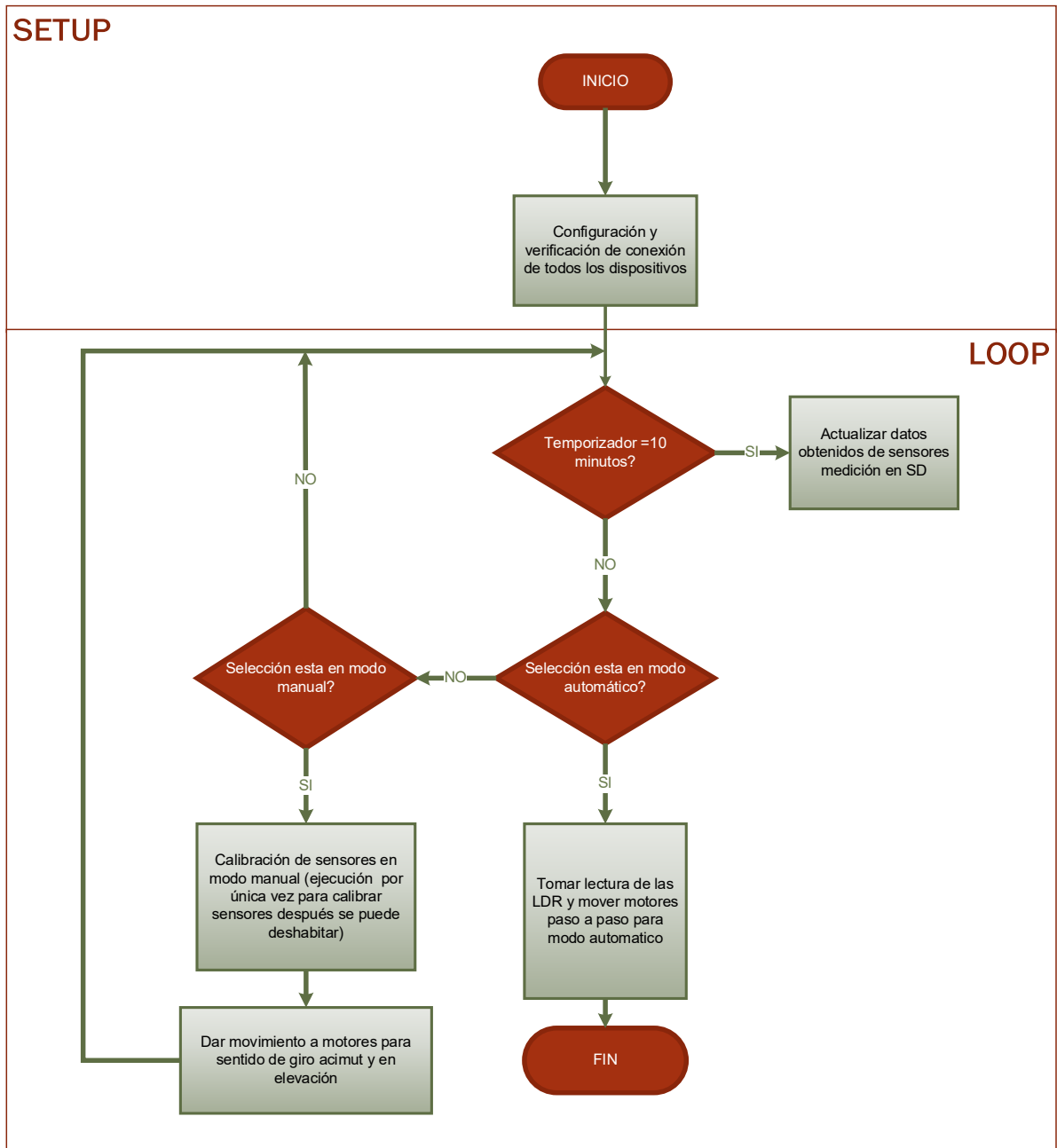
Tabla 2-2: Estructura de programación de microcontrolador para seguidor solar fotovoltaico

ESTRUCTURA	ESPECIFICACIÓN
Definición de librerías (declaración)	Librería Transmisión de datos – comunicación de dispositivos, librería modulo SD, librería de tiempo – RTC DS1307
Asignación de pines conectados al microcontrolador (declaración)	Motores paso a paso (NEMA 17, NEMA 23), LDR (4 en posiciones definidas), sensor de luz ambiente TEMT6000, sensor ACS712, Sensor FZ0430, control manual, indicadores luminosos (leds)
Parámetros de inicialización del sistema (inicialización)	Motores NEMA 17, NEMA 23, sensores
Ejecución en el momento de arranque del sistema	<ul style="list-style-type: none"> • Definición de salidas y entradas al microcontrolador • Velocidad de los motores paso a paso (NEMA 17, NEMA 23) • Configuración de drivers DRV8825, TB6560, RTC DS1307, sensor de luminosidad TEMT6000, sensor ACS712, sensor FZ0430, modulo SD
Ejecución continua en microcontrolador	<ul style="list-style-type: none"> • Programación y funcionamiento de LDR para movimiento de actuadores configuración manual y automática • Abrir y escribir datos en modulo SD

Fuente: Autor

La figura 2-6 representa el diagrama de flujo general de la programación del microcontrolador, en el anexo C se encuentra la programación detallada del microcontrolador, en el anexo F se encuentra disponible un diagrama ilustrativo de dependencias y un diagrama de la programación para las fotorresistencias LDR fundamentales en el funcionamiento del seguidor.

Figura 2-6: Diagrama de flujo general de la programación del microcontrolador




Fuente: Autor diagrama Microsoft Viso

2.3.5 Motores paso a paso

Para dar movimiento al seguidor se dispusieron de motores paso a paso bipolares ya que tienen un torque más elevado con respecto a los motores unipolares, aunque su circuitería

es más compleja, los dos motores usados son de 200 pasos por revolución lo que representa un movimiento en el eje de 1,8 grados por paso, por la disposición en el proyecto y el peso que tienen que movilizar tanto para el movimiento inferior azimut como para el movimiento cenital, son los más adecuados, cabe resaltar que la secuencia de excitación de las bobinas está determinada por patrones que modifican el ángulo eléctrico del motor, que desplaza los dientes del rotor para que de esta manera se alineen los dientes del estator, creando un desplazamiento angular el cual se denomina paso, para el desarrollo del proyecto se toman pasos completos de esta manera las 2 bobinas siempre están activas en un momento determinado lo cual aumenta el flujo de corriente, por tanto el par de salida es mucho más alto presentado un valor alto velocidad aunque el consumo eléctrico es más alto, sin embargo para el torque requerido y por el peso a mover es el adecuado. A continuación, en la tabla 2-3 se presentan las principales características de los motores paso a paso seleccionados.

Tabla 2-3: Características motor paso a paso NEMA 17 movimiento cenital (elevación) del seguidor

MOTOR PASO A PASO 17HS8401 (NEMA 17)	
Tipo de motor: Bipolar	
Angulo de paso: 1,8°	
Pasos por revolución: 200	
Cables de conexión: 4	
Corriente de operación: 1,7 A	
Tensión de operación: 1 – 4 V	
Holding Torque (torque de anclaje): 52 N.cm (4.6 lb.in) (5,3 kgf cm)	
Detent Torque (torque de retención): 2.6 N.cm (0.23 lb.in)	
Peso: 350g	

Fuente: Autor de ficha técnica motor NEMA 17

Tabla 2-4: Características motor paso a paso NEMA 23 movimiento en acimut del seguidor

MOTOR PASO A PASO 103G770-6041(NEMA 23)	
Tipo de motor: Bipolar	
Angulo de paso: 1,8°	
Cables de conexión: 4	
Corriente de operación: 2,8 A	
Tensión nominal: 2,1 V	
Holding Torque (torque de anclaje): 78,5 N.cm (6.944 lb.in) (8 kgf cm)	
Peso: 517g	

Fuente: Características principales de motor NEMA 23 online [24]

Cabe aclarar que el nombre de NEMA 17 y NEMA 23 hace referencia a un motor paso a paso con un encapsulado de 1.7 x 1.7 pulgadas de área transversal y 2.3 x 2.3 pulgadas respectivamente, el número 17 o 23 viene de esa área de motor la cual esta estandarizada por la Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos (NEMA) ya que es donde se suelen atornillar los motores [25].

Para efectos de cálculos tendremos en cuenta el torque de anclaje que es la cantidad de par necesario para mover el motor un paso completo cuando los devanados están energizados pero el rotor está parado, una de las ventajas de usar motores paso a paso es el par de anclaje con respecto a los servomotores ya que en nuestro caso las cargas deben mantenerse en su lugar tanto para el movimiento azimutal como cenital [26].

El valor de torque de anclaje del motor NEMA 17 de 5,3 kgf cm, es el adecuado para mover la carga en el sentido cenital la cual no supera los 5 Kg considerando el peso del panel solar, el eje de aluminio y los pequeños elementos de unión, ahora bien para el motor NEMA 23 que debe realizar el movimiento en acimut el torque de 8 kgf cm también es el adecuado ya que el peso del soporte del panel, el panel solar, el motor NEMA 17, la caja reductora del NEMA 17 y los demás accesorios no superan los 7 kg.

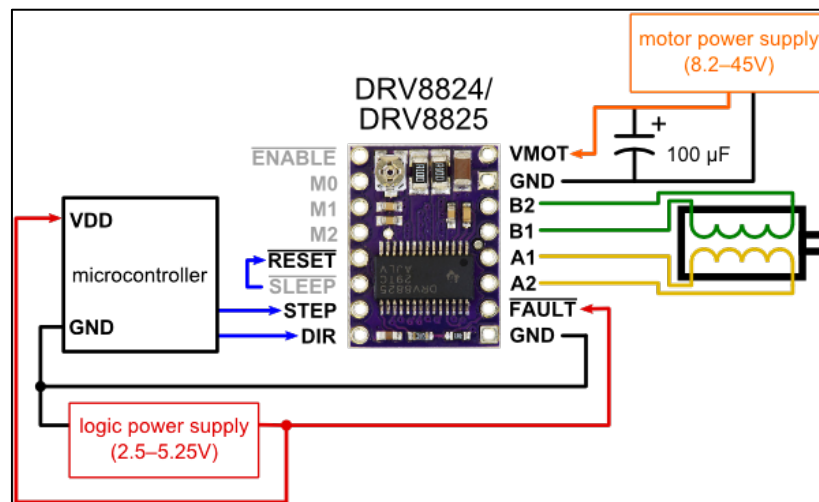
Es de resaltar que los motores paso a paso usados necesitan más electricidad que no puede aportar la placa arduino MEGA, por tanto, es necesario que tengan una fuente externa de alimentación que en nuestro caso sería la batería FL12280 (12V – 28Ah/20HR), la conexión a realizar sería de acuerdo anexo F (DISTRIBUCION ELECTRICA DE COMPONENTES EN EL SISTEMA)

2.3.6 Controladores motores pasos a paso

Para el desarrollo del proyecto fue necesario disponer de dos controladores para cada eje de movimiento los cuales toman la señal de control de baja corriente y luego la convierten en una señal de corriente más alta que pueda conducir al motor de acuerdo a una secuencia establecida y con un control de corrientes adecuado en las bobinas. estos fueron:

- **Driver para motor paso a paso DRV8825:** permite controlar motores paso a paso bipolares entre 8,2 y 45 V con micro pasos entre 1 y 1/32 pasos en seis velocidades diferentes, tiene un potenciómetro que le permite ajustar el consumo de corriente para evitar daño en el motor y tener un movimiento más suave y continuo del mismo. Este controlador es el recomendado para motores paso a paso NEMA 17 [27]. En la figura 2-6 podemos ver el diagrama de conexión general para controlador DRV8825

Figura 2-7: Diagrama de conexión general driver DRV8825 para motor paso a paso NEMA 17



Fuente: Dynamoelectronics [28]

Es importante destacar que para el controlador DRV8825 utilizaremos pasos completos, por tanto, según la tabla de formato de pasos que establece la ficha técnica del controlador en el anexo D (FICHA TECNICA DRIVER DRV8825 (NEMA 17)) no usaremos las salidas M0, M1, M2. De la misma manera tenemos que determinar la corriente que necesita el motor NEMA 17, según la tabla 2-3 la corriente de operación es de 1,7 A, con este valor podemos realizar la calibración del voltaje de referencia utilizando la fórmula de la ficha técnica del controlador, la regulación de corriente es la siguiente: Ver ecuación 2.2

$$I_{max} = \frac{V_{REF}}{5 * R_{SENSE}} \quad (2.2)$$

I_{max} = corriente de salida del motor NEMA 17 = 1,7 A

V_{REF} = voltaje a determinar para calibrar el controlador para obtener una corriente 1,7 A

R_{SENSE} = resistencia de sensibilidad R100 es decir 0.1 Ω

Cabe resaltar que como estamos trabajando con pasos completos el valor del voltaje de referencia lo tenemos que limitar a un 70 % según la tabla del formato de pasos de la ficha técnica del controlador DRV8825. Ahora se despeja el voltaje de referencia de la ecuación y obtenemos:

$$V_{REF} = (I_{max}) * (5 * R_{SENSE})$$

$$V_{REF} = (1,7 A) * (5 * 0.1 \Omega)$$

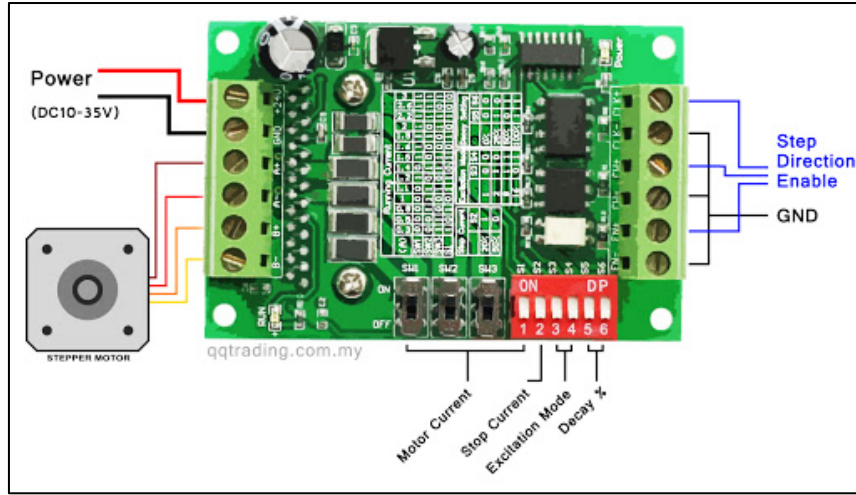
$$V_{REF} = 0,85 V$$

$$V_{REF} = 0,85 V * 0,7 = 0,595 V$$

Con un voltaje de referencia de 0,595 V tendríamos que ajustar el driver para el funcionamiento del motor paso a paso NEMA 17 a pasos completos (Full – step).

- **Driver motor paso a paso TB6560:** es un controlador ajustable/regulable que permite garantizar que no haya pérdidas en el control de pasos que el motor proporciona, trae consigo un disipador de calor que permite que el módulo funcione de manera adecuada bajo un voltaje entre 10 V y 35 V y una corriente de funcionamiento de 3 A con un chip TB6560. Este controlador es el recomendado para motores paso a paso NEMA 23 [29]. En la figura 2-7 podemos ver el diagrama de conexión de forma general.

Figura 2-8: Diagrama de conexión general driver TB6560 para motor paso a paso NEMA 23



Fuente: QQ Online Trading [30]

Es de destacar que el controlador TB6560 es un controlador analógico, por tanto, tenemos que configurar los interruptores de los cuales dispone según las especificaciones de la ficha técnica del disponible en el anexo D (FICHA TECNICA DRIVER TB6560 (NEMA 23)). Ahora bien, teniendo en cuenta la corriente de operación del motor NEMA 23 de 2,8 A y ya que vamos a trabajar pasos completos (full – step) la configuración de los interruptores será la siguiente:

Tabla 2-5: Control de operación driver motor paso a paso TB6560 para NEMA 23

INTERRUPTOR	ORDEN	DESCRIPCIÓN
SW1 – SW2 – SW3 – S1 (Motor current)	ON – ON – OFF – OFF Configuración para una corriente de 2,6 A	Realizan el control de la corriente de salida la cual se recomienda por debajo de la corriente de operación del motor en nuestro caso la corriente de operación es de 2,8 A de esta forma se selecciona la corriente más cercana inferior de 2,6 según la tabla de corrientes de trabajo de ficha técnica
S2 (stop current)	ON Configuración de parada en un 20% mínima	Representa la corriente utilizada para mantener el motor en posición de paro, se deja en esta posición de paro mínima al 20% para minimizar el calentamiento del motor

S3 – S4 (Excitation mode)	OFF – OFF modo de excitación de las bobinas	En nuestro caso trabajaremos pasos completos (1 paso)
S5 – S6 (Decay %)	OFF – OFF	Decaimiento de la corriente, recomendado al 0%, el cual depende del motor, para el motor NEMA 23 esta configuración es la adecuada

Fuente: Ficha técnica driver TB6560 disponible en Anexo D

2.4 Sistema eléctrico

2.4.1 Panel solar

Para el desarrollo del proyecto partimos de un panel de 50 W, bajo el cual dimensionamos toda la estructura, específicamente en lo que se refiere al peso, característica que influye directamente en la selección de los motores paso a paso y además en la potencia requerida para el funcionamiento de todo el sistema. En la tabla 2-6 que se presenta a continuación mostramos las principales características del panel solar utilizado en el proyecto, sin embargo, dentro del anexo D (FICHA TECNICA PANEL SOLAR) se encuentra especificada toda la información del panel utilizado en el proyecto.

Tabla 2-6: Características principales panel solar usado en el proyecto

PANEL SOLAR POWEST	
Tipo de modulo	Poli- cristalino
Potencia máxima	50 W
Voltaje de circuito abierto	20.2 V
Corriente de cortocircuito	2.86 A
Tensión máxima de alimentación	16,8 V
Corriente máxima	2.16 A
Eficiencia	17.8 %
Peso	4,3 kg
Dimensiones (altura x ancho x profundidad)	45 cm x 51 cm x2,5 cm)

Fuente: Ficha técnica paneles POWEST, Anexo D fichas técnicas principales

2.4.2 Regulador de carga

Para garantizar el correcto funcionamiento del sistema eléctrico del seguidor solar es necesario la instalación de un regulador de carga el cual estará ubicado entre el panel solar y la batería de esta forma garantizamos una carga suficiente al acumulador y evitamos sobrecargas. Para calcular el regulador es necesario conocer cuál será la corriente máxima que proporciona el panel solar que en nuestro caso es de 2,86 A, la cual suele sobredimensionarse un 20%, para efectos prácticos y comerciales este no es un problema de esta manera tendremos garantizada la seguridad de operación de la instalación. La intensidad del regulador será: Ver relación 2.3.

$$I_R > 1,2 * N_p * I_{SC} \quad (2.3)$$

$$I_R > 1,2 * 1 * 2,86 A$$

$$20 A > 3,4 A$$

$$I_R = \text{intensidad el regulador} = 20 A$$


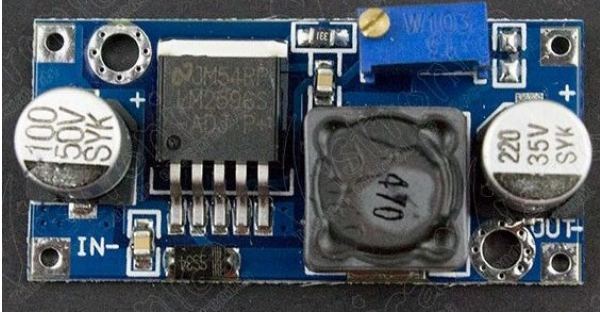
$$N_p = \text{número de ramas en paralelo de generador fotovoltaico} = 1$$

$$I_{SC} = \text{intensidad de cortocircuito en uno de los módulos} = 2,86 A$$

Por efectos económicos y prácticos se usó un regulador de carga PWM (VizGiz BSV20A) el cual limita la corriente de entrada a la batería dependiendo de cómo se encuentre su carga, de esta manera la corriente se va introduciendo poco a poco hasta que la batería se llena de manera óptima y estable.

De la misma manera se dispuso de un convertidor DC - DC LM2596 reductor de voltaje entre la batería y la tarjeta Arduino MEGA 2560, por medio del convertidor DC – DC con el cual ajustaremos la alimentación de la tarjeta lo que nos permitirá protegerla al tener una tensión de alimentación regulada y filtrada. En la tabla 2-7 que se presenta a continuación se encuentran las principales características de los reguladores de voltaje utilizados.

Tabla 2-7: Características reguladores de carga

CONTROLADOR DE CARGA VIZGIZ BSV20A	
<ul style="list-style-type: none"> • Voltaje: 12 V/24 V CC. • Autoconsumo: 10 mA. • Corriente de carga nominal: 20 A. • Protección: 14,4 V/28,8 V. (Sobre carga) • Protección: 10,8 V/21,6 V. Sobre descarga: • Voltaje máximo de circuito abierto del panel solar: 25 V/36 V. 	
CONVERTIDOR DC - DC LM2596	
<ul style="list-style-type: none"> • Voltaje de entrada: 4.5V~35V • Voltaje de salida (ajustable): 1.25V~30V • Corriente de entrada: 5A Max • Corriente de salida: 2.5A nominal - 3A Max • Corriente sin carga: 15mA (típico) • Potencia de salida: 25W (nominal) • Eficiencia: ~92% • Rizado de salida: 0.07mV • Frecuencia de conmutación: 150KHz • Regulación de carga: $\pm 0.5\%$ • Tasa de regulación de voltaje: $\pm 0.5\%$ 	

Fuente: Controladores de energía Amazon [31] / Catálogo de productos Vistronica [32]

2.4.3 Almacenamiento de energía

Para el desarrollo del proyecto es necesaria la utilización de una batería que permita al sistema tener disponibilidad de energía en momentos donde la radiación solar es insuficiente para mantener el sistema en funcionamiento (autonomía), adicionalmente para la operación del seguidor solar la batería es fundamental para mantener una potencia instantánea elevada y fijar una tensión de trabajo estable para el sistema de control y maniobra.

Para el dimensionamiento de la batería a utilizar es necesario determinar los consumos energéticos de los elementos que componen el sistema basándonos en las fichas técnicas disponibles en el anexo D, datos que se presentan a continuación:

- Motores paso a paso

NEMA 17

$V_{REF} = 0.595 \text{ V}$ (según controlador DRV8825 para pasos completos)

$I = 1.7 \text{ A}$ (corriente de operación)

$P = 1,012 \text{ W}$

Para los dos motores se toma como referencia un tiempo de trabajo de trabajo de 3 horas en tiempos distribuidos a lo largo de un día normal en un intervalo entre las 6:30 AM y 6:30 PM, cabe resaltar que este es un valor de referencia teniendo en cuenta que el movimiento de los motores no es continuo, es decir estos solamente se mueven cuando se cumplen las condiciones establecidas en la programación y según la señal recibida por las LDR.

NEMA 23

$V_{REF} = 3 \text{ A}$ (según controlador TB6560 para pasos completos)

$I = 1.7 \text{ A}$ (corriente de operación)

$P = 5,1 \text{ W}$

- Sistema electrónico

Tabla 2-8: Consumo sistema electrónico

Componente	Voltaje de operación (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
Arduino MEGA 2560	9	0,093	0,837
Fotorresistores LDR	N/A	N/A	0,1
Modulo RTC DS 1307	3	$<5 \times 10^{-4} \approx 5 \times 10^{-4}$	1.5×10^{-3}
Sensor de luz ambiente TEMENT6000	5	1×10^{-3}	5×10^{-3}
Modulo micro SD	5	2×10^{-4}	1×10^{-3}
		TOTAL	0,9445

Fuente: Autor según fichas técnicas anexo D

- Reguladores de voltaje

Tabla 2-9: Consumo reguladores de voltaje

Componente	Voltaje de operación (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
CONTROLADOR DE CARGA VIZGIZ BSV20A	12	0,01	0,12
CONVERTIDOR DC - DC LM2596	12	8×10^{-5}	$9,6 \times 10^{-4}$
		TOTAL	0,121

Fuente: Autor según fichas técnicas anexo D

Tabla 2-10: Consumos energético general seguidor solar

Descripción de la carga	Potencia eléctrica (W)	Consumo diario(h)	Energía consumida/día (Wh/día)	Observaciones
Motores paso a paso	6,112	3	18,336	Motor paso a paso NEMA 17 REF 17HS8401 – NEMA 23 REF 103G770 -6041
Sistema electrónico	0,9445	24	22,66	Tarjeta Arduino MEGA 2560, fotorresistores, modulo RTC, sensor de luz ambiente TEMENT6000, modulo micro SD
Reguladores de voltaje	0,121	24	2,9	CONTROLADOR DE CARGA VIZGIZ BSV20A, CONVERTIDOR DC - DC LM2596
Energía total consumida			43,9 Wh/dia	
Potencia total consumida			7.18 W	

Fuente: Fichas técnicas componentes sistema de control eléctrico y electrónico disponible en anexo D.

Cabe aclarar que para efectos prácticos y económicos del proyecto la capacidad de la batería usada para probar la eficiencia del seguidor es una batería FL12280 (12V – 28Ah/20HR) la cual puede ser reemplazada por una batería de mejor calidad y con mayor capacidad para lograr mayor tiempo autonomía del seguidor. Partiendo de la capacidad de la batería de 28 Ah con voltaje nominal de 12 V y tenido en cuenta la potencia total consumida por todo sistema podemos determinar el régimen de descarga de la batería así [9, p. 22]: Ver ecuación 2.4

$$P = I * V \quad (2.4)$$

$$I = \frac{P}{V} = \frac{7,18 \text{ W}}{12 \text{ V}} = 0,6 \text{ A}$$

Por tanto, la corriente descarga será de 0,6 A. Ver ecuación 2.5

$$t = \frac{C}{I} = \frac{28 \text{ Ah}}{0,6 \text{ A}} = 46,8 \text{ horas} = 1,95 \text{ dias} \quad (2.5)$$

El tiempo que tarda en descargarse la batería sería de 46,8 horas, este tiempo determinado sería si esa potencia requerida se estuviera extrayendo de la batería todo el tiempo sin embargo para determinar el tiempo de autonomía real, tendríamos que tener en cuenta el consumo real de la instalación que determinamos de 43,9 Wh/dia, la profundidad de descarga de la batería la cual asumiremos en un 50% (valor recomendado para aumentar

la vida útil de la batería) y teniendo en cuenta la gráfica del ciclo de vida de servicio de la batería de la figura 2-8, el cual nos daría 400 ciclos de carga y descarga, también tendríamos que tener en cuenta la auto descarga de la batería de 3 % por mes a 25° C promedio tomado como referencia 6 meses lo que representaría una capacidad restante del 82 % y una reducción del 18% en su capacidad, también tenemos que considerar la temperatura de operación y el ambiente al cual va a estar expuesta la batería el cual no superaría los 25° C con lo cual la capacidad de la batería se mantendría en un 100% según lo especificado en el anexo D (FICHA TECNICA BATERIA FL12280). Ahora teniendo en cuenta estas consideraciones podemos determinar el tiempo de autonomía real de la batería así [8, p. 104]: Ver ecuación 2.6

$$C_{sis} = \frac{E * N}{V_{CC} * P_d} \quad (2.6)$$

$$C_{sis} = \text{capacidad de la batería} = 28 \text{ Ah}$$

$$V_{CC} = \text{tensión de suministro de corriente continua} = 12 \text{ V}$$

$$P_d = \text{Profundidad de descarga} = 50\% = 0,5$$

$$E = \text{consumo real} = 43,9 \text{ Wh/día}$$

$$N = \text{Número de días de autonomía} = \text{dato a determinar}$$

Despejamos el número de días de autonomía y tenemos, Ver ecuación 2.7.

$$N = \frac{V_{CC} * P_d * C_{sis}}{E} = \frac{(12 \text{ V}) * (0,5) * (28 \text{ Ah})}{43,9 \text{ Wh/día}} = 3,83 \text{ días} \quad (2.7)$$

Considerando el porcentaje de auto descarga de la batería del 3% por mes (25°C) durante 6 meses representaría una capacidad restante del 82% (C_R) lo que sería una disminución del 18% en su capacidad, y teniendo en cuenta que la capacidad se mantiene en un 100% con una temperatura 25°C (C_T) tendríamos que el número de días de autonomía real de la batería es de (Ver ecuación 2.8):

$$N = \frac{V_{CC} * P_d * C_{sis} * C_R * C_T}{E} = \frac{(12 \text{ V}) * (0,5) * (28 \text{ Ah}) * 0,82 * 1}{43,9 \text{ Wh/día}} = 3,138 \text{ días} \quad (2.8)$$

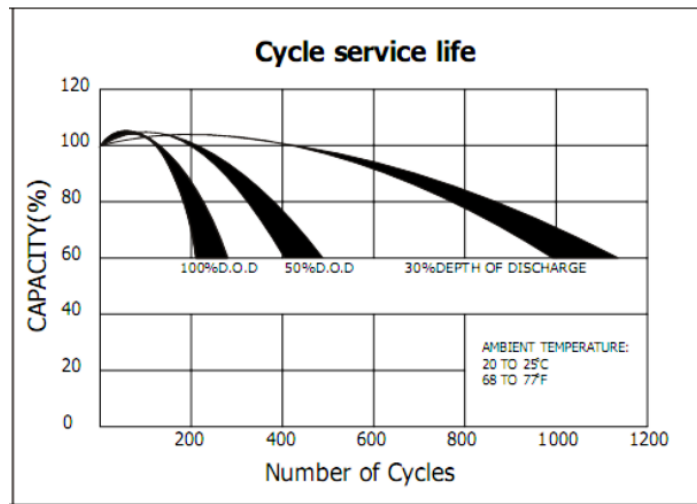
De la misma manera podemos determinar la energía real disponible de la batería teniendo en cuenta las pérdidas consideradas del 18% en su capacidad (0.18) por auto descarga

durante 6 meses y la capacidad se mantiene en un 100% (1) con una temperatura de operación de 25°C así (Ver ecuación 2.9):

$$\begin{aligned}
 \text{Energía disponible sin pérdidas} &= 28 \text{ Ah} * 12 \text{ v} = 336 \text{ Wh} \\
 \text{Energía real disponible con pérdidas} &= ((28 \text{ Ah} * 12 \text{ v}) - (0.18 * (28\text{Ah} * 12 \text{ v}))) * 1 \quad (2.9) \\
 \text{Energía real disponible con pérdidas} &= 275.52 \text{ Wh}
 \end{aligned}$$

Según los datos obtenidos el tiempo real de autonomía del sistema considerando las pérdidas en la batería es de 3,13 días, con una energía real disponible con pérdidas de 275.52 Wh, la autonomía puede aumentar en la medida que se aumente la profundidad de descarga sin embargo disminuiríamos el número de ciclos de carga y descarga de la batería y por tanto su vida útil según la figura 2-9.

Figura 2-9: Curva de profundidad de descarga de batería FL12280 (12V – 28Ah/20HR)



Fuente: Ficha técnica batería FL12280 (12V – 28Ah/20HR) disponible anexo D

A continuación, se presentan los valores de las pérdidas en la batería FL12280 considerando algunos parámetros adicionales a los que probablemente presentaría la batería y que se encuentra disponibles en el anexo D (FICHA TECNICA BATERIA FL12280) , en la tabla 2- 11 se resalta la temperatura promedio de operación de 25 °C y en la tabla 2-12 el tiempo estimado de auto descarga de 6 meses con el cual se realizaron

los cálculos anteriormente presentados, valores de referencia y resaltados en la tabla 2 – 13 y 2 – 14 para un análisis de perdidas en la batería FL12280 más profundo.

Parámetros iniciales

- Días de autonomía sin perdidas 3,83 días
- Energía disponible sin perdidas: 336 Wh
- Voltaje nominal: 12 V
- Capacidad: 28 Ah
- Consumo real seguidor: 43,9 Wh/día
- Potencia consumo seguidor: 7,18 W

Tabla 2-11: Porcentaje de capacidad afectado en la batería FL12280 según temperatura de operación

Temperatura promedio de operación °C	capacidad afectada por la temperatura
40	102%
25	100%
0	85%
-15	65%

Fuente: Autor según fichas técnicas anexo D (FICHA TECNICA BATERIA FL12280)

Tabla 2-12: Auto descarga de la batería FL12280 por tiempo de uso

Auto descarga 3% de la capacidad por mes		
Tiempo estimado	porcentaje de reducción de la capacidad	porcentaje restante de capacidad
1 mes	3%	97%
3 meses	9%	91%
6 meses	18%	82%
12 meses	36%	64%

Fuente: Autor según fichas técnicas anexo D (FICHA TECNICA BATERIA FL12280)

Tabla 2-13: Energía disponible (Wh) por pérdidas de auto descarga de la batería FL12280 por promedio de temperatura de operación

Temperatura promedio de operación °C	Energía disponible (Wh) por pérdidas de auto descarga (tiempo 1 mes)	Energía disponible (Wh) por pérdidas de auto descarga (tiempo 3 meses)	Energía disponible (Wh) por pérdidas de auto descarga (tiempo 6 meses)	Energía disponible (Wh) por pérdidas de auto descarga (tiempo 12 meses)
40	332,4384	311,8752	281,0304	219,3408
25	325,92	305,76	275,52	215,04
0	277,032	259,896	234,192	182,784
-15	211,848	198,744	179,088	139,776

Fuente: Autor según fichas técnicas anexo D (FICHA TECNICA BATERIA FL12280)

Tabla 2-14: Días de autonomía con pérdidas por auto descarga la batería FL12280 por promedio de temperatura de operación

Temperatura promedio de operación °C	Días de autonomía con pérdidas por (auto descarga de 1 mes)	Días de autonomía con pérdidas por (auto descarga de 3 meses)	Días de autonomía con pérdidas por (auto descarga de 6 meses)	Días de autonomía con pérdidas por (auto descarga de 12 meses)
40	3,786	3,552	3,201	2,498
25	3,712	3,482	3,138	2,449
0	3,155	2,960	2,667	2,082
-15	2,413	2,264	2,040	1,592

Fuente: Autor según fichas técnicas anexo D (FICHA TECNICA BATERIA FL12280)

Los resultados de las tablas 2-13 y 2-14 se realizan de la misma forma como se obtuvieron los datos mostrados en las ecuaciones 2.8 y 2.9, cambiando los valores de pérdidas de acuerdo a los porcentajes por auto descarga según el tiempo y por la temperatura de operación, relacionados en las tablas 2.11 y 2.12.

2.5 Ensamble del prototipo

Teniendo en cuenta el diseño preliminar y los cálculos previos se realiza el ensamble del prototipo de seguidor solar fotovoltaico por medio de procesos como corte, soldadura, taladrado y doblado de acuerdo a la siguiente secuencia:

- A partir de la adquisición de materiales el proceso de ensamble comienza por el soporte superior móvil que contiene al panel solar al cual se le realiza una perforación por la cual pasará un eje de 8 mm de acero el cual dará soporte al movimiento cenital del panel, el eje estará fijo usando acoples rígidos de 15 mm (diámetro externo) con tornillo Allen punta plana M6 para fijar el eje, el acople rígido estará fijo a una lámina de aluminio por medio de soldadura autógena (aporte de aluminio de 1/16) la cual también se aplicara para unir esta lamina al panel, las dimensiones y formas de unión se encontraran especificadas a detalle dentro de los planos adjuntos anexo B (PLANO 4).

Figura 2-10: (a) Ensamble de soporte superior móvil soldadura de componentes, (b) posicionamiento de panel solar en ensamble superior móvil



(a)

(b)

Fuente: Autor

- Se cortan los ángulos de aluminio de 25 x 25 x 3 mm de acuerdo a las dimensiones establecidas y las láminas de aluminio como refuerzo al marco, después se realizan cada una de las perforaciones para cada uno de los elementos de unión con los demás componentes, con soldadura autógena (aporte de aluminio de 1/16) se unen

las bases del marco junto con las láminas de refuerzo, las dimensiones, perforaciones y formas de unión se encuentran especificadas a detalle dentro de los planos adjuntos al documento anexo B (PLANO 3).

Figura 2-11: (a) Organización para soldado de partes soporte base inferior, (b) Ensamble de base soporte inferior



(a)

(b)

Fuente: Autor

- Se realiza la unión del motor paso a paso NEMA 17 con la caja reductora por medio de un acople rígido de 14 mm (diámetro externo), a su vez el motor se une a la caja reductora con una carcasa impresa en PLA creada en impresora 3D por medio de 2 tornillos de cabeza redonda M4 x16 P 1,5 y con el motor con 4 tornillos de cabeza redonda M3 x10 P 1,5. La salida de la caja reductora (corona) se une al eje principal del panel por medio de un acople rígido de 15 mm (diámetro externo), el conjunto de caja reductora y motor NEMA 17 se fija al marco que contiene el panel por medio de dos tornillos de cabeza hexagonal M6 x 35 P1 con su conjunto respectivo tuerca arandela.

Figura 2-12: (a) Conexión de caja reductora con motor paso a paso NEMA 17 usando carcaza en PLA, (b) vista de conexión de caja reductora con motor paso NEMA 17 usando acople cilíndrico



(a)



(b)

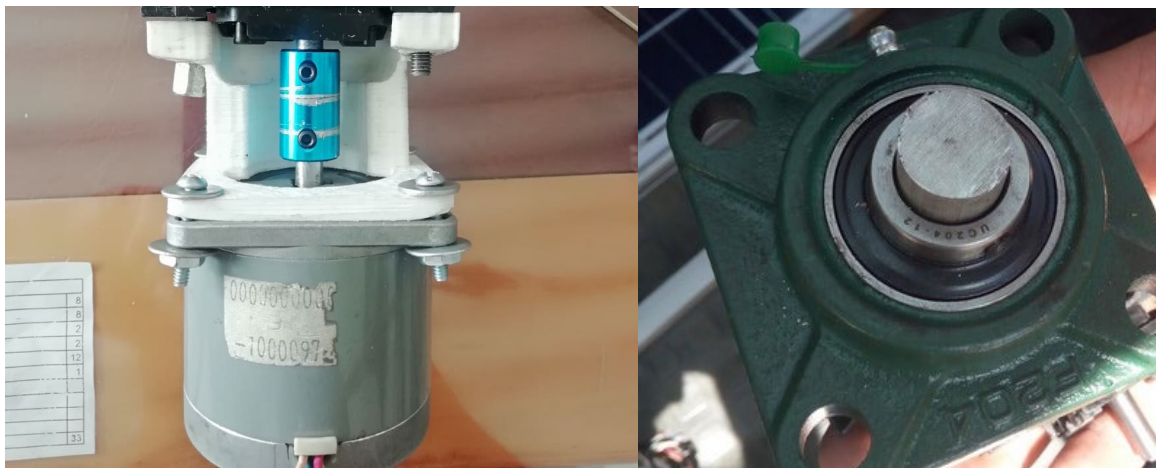
Fuente: Autor

- Para minimizar la fricción del movimiento del eje que atraviesa el panel solar se deben acondicionar dos rodamientos de 8 mm fijados al marco del panel solar con 2 tornillos de cabeza hexagonal M4 x 16 P0,7.
- Una vez armada la parte móvil superior del panel se procede a armar la base del seguidor la cual está formada por perfil tubular (acero) ASTM A-500 25 x 25 x 2 mm y laminas en acero estructural A36 en espesores de 1/16" y 1/8", los cuales son cortados de acuerdo a las especificaciones de diseño, los perfiles y secciones de lámina se unen son soldadura con electrodo revestido (aceros al carbono AWS A5.1 – E6013 WEST ARCO). es necesario tener 4 puntos de anclaje para empotrar el seguidor y darle firmeza en caso de ser necesario dichos puntos se disponen en

los extremos de la base según disposición del plano y usando pernos de expansión (HILTI HSA M10x68) en total para realizar este anclaje a una superficie serian 8 pernos de expansión.

- En la base es necesario adaptar una entrada por la cual se apoyará el conjunto de caja reductora y motor paso a paso NEMA 23, la cual estará unida con un acople rígido de 14 mm (diámetro externo) y a su vez el motor se une a la caja reductora con una carcasa impresa en PLA creada en impresora 3D por medio de 4 tornillos de cabeza redonda M4 x 16 mm P0,7, el conjunto caja reductora motor se une a la estructura de la base por medio 2 tornillos de cabeza redonda M4 x 20 mm P0,7, la comunicación entre la caja reductora y la estructura superior móvil se realiza con un eje acople de dimensiones según diseño y bloqueado con pines seeger.

Figura 2-13: (a) Conexión de caja reductora con motor paso a paso NEMA 23 usando carcasa en PLA, (b) Rodamiento FY 3/4" TF - SKF para conexión entre base de soporte inferior y soporte superior móvil.



(a)

(b)

Fuente: Autor

- Para minimizar la fricción del movimiento del eje de acople se instala un rodamiento FY 3/4" TF (SKF) el cual está unido a la base del seguidor con 4 tornillos de cabeza hexagonal M10 x 35 mm P1,5 con su conjunto respectivo tuerca arandela.
- Una vez están ensamblados todos los componentes estructurales incluidos los motores se comienza a realizar el ensamble eléctrico y electrónico, realizando

inicialmente la programación del microcontrolador de acuerdo a lo establecido en el documento y al anexo C, de la misma manera que teniendo en cuenta el diagrama de distribución eléctrica de componentes en el sistema dentro del anexo F de diagramas adicionales, una vez realizada todas las conexiones los componentes son almacenados en una caja de distribución SLB261 (ficha técnica disponible en anexo de fichas técnicas ANEXO D) que permita contener los dispositivos y mantenerlos protegidos de la intemperie.

Es válido nuevamente resaltar que para el correcto ensamblaje del prototipo son fundamentales los planos de detalle (ANEXO B) y del diagrama de distribución eléctrica (ANEXO F) anexos al presente documento, de la misma manera que las fichas técnicas de los componentes disponibles en el (ANEXO F)

Figura 2-14: Registro fotográfico ensamble del prototipo



Fuente: Autor

3. Capítulo: Pruebas y resultados

3.1 Pruebas y resultados preliminares de funcionamiento

En la fase final del proyecto se dispusieron de dos días para realizar las pruebas de funcionamiento del dispositivo, sin embargo, antes de realizar dichas pruebas se realizaron mediciones en dos rangos de tiempo con el fin de probar el sistema de adquisición de datos en la memoria SD, el registro de datos datalogger almacenado en la SD correspondería a la fecha de la toma del dato, la hora, la intensidad lumínica medida en porcentaje, la tensión de salida (tensión de salida con carga) y la corriente instantánea con carga, cabe aclarar que las mediciones de rendimiento del sistema se realizan con todo el sistema conectado no en circuito abierto.

Inicialmente se realizaron dos mediciones preliminares los días 9 y 10 de mayo del año 2020 en dos rangos diferentes de tiempo, mediciones que permitieron revisar el funcionamiento del seguidor en movimiento y estático de la misma manera que el sistema de adquisición de datos, el cual se extrae de la tarjeta SD en un archivo (.txt) por tanto es necesario ordenar los datos para que sean analizados, labor que puede realizarse en Microsoft Excel.

A continuación, se presenta el resumen de los datos obtenidos de esta primera prueba preliminar, los datos originales extraídos de la SD (archivos .txt) que se encuentran disponibles en el anexo E resultados y cálculos complementarios (DATALOGGER PRUEBAS PREMILINARES (09-05-2020) - (10-05-2020)), de la misma manera que la tabla de datos organizados (PRUEBAS PRELIMINARES DATOS ORGANIZADOS ((09-05-2020) - (10-05-2020))).

Tabla 3-1: Parámetros de prueba preliminar de seguidor en posición fija

POSICION FIJA DEL SEGUIDOR SOLAR FOTOVOLTAICO (9/05/2020)		
RANGO DE TIEMPO	04:03 p. m.	05:04 p. m.
POTENCIA PROMEDIO	16,7983908	W
TENSION PROMEDIO	13,13563218	V
CORRIENTE PROMEDIO	1,253333333	A

Fuente: Autor resultados obtenidos de Datalogger disponible en anexo E

Tabla 3-2: Estadística descriptiva de los datos obtenidos de potencia para el rango de tiempo definido (prueba preliminar de seguidor en posición fija)

POTENCIA		
Media	16,7983908 W	Promedio de potencia
Error típico	0,282850614	Oscilaciones de la media muestral
Mediana	15,4 W	Valor al cual llega el 50% de los datos de potencia
Moda	11 W	Dato de potencia que más se repite
Desviación estándar	5,899317283 W	Que tan dispersos están los datos de potencia con respecto a la media
Coficiente Curtosis	-0,245803102	Grado de concentración que presentan los valores en la región central de la distribución normal Planitocurtica (baja concentración de datos en la región central).
Coficiente de asimetría	0,994747814	Asimetría positiva media > mediana
Rango	22 W	Diferencia entre valor máximo y valor mínimo de potencia
Mínimo	11 W	Valor mínimo de potencia
Máximo	33 W	Valor máximo de potencia
Cuenta	435	Cantidad de datos de potencia tomados cada 10 segundos

Fuente: Autor resultados obtenidos de Datalogger disponible en anexo E

Tabla 3-3: Parámetros de prueba preliminar de seguidor en movimiento

SEGUIDOR SOLAR FOTOVOLTAICO EN MOVIMIENTO (10/05/2020)		
RANGO DE TIEMPO	012:33 p. m.	01:16 p. m.
PROMEDIO POTENCIA RANGO	39.73	W
TENSION PROMEDIO	18.03	V
CORRIENTE PROMEDIO	2.21	A

Fuente: Autor resultados obtenidos de Datalogger disponible en anexo E

Tabla 3-4: Estadística descriptiva de los datos obtenidos de potencia para el rango de tiempo definido (prueba preliminar de seguidor en movimiento)

POTENCIA		
Media	39,73 W	Promedio de potencia
Error típico	0,137132067	Oscilaciones de la media muestral
Mediana	40,66 W	Valor al cual llega el 50% de los datos de potencia
Moda	36,72 W	Dato de potencia que más se repite
Desviación estándar	2,155199612 W	Que tan dispersos están los datos de potencia con respecto a la media
Coefficiente Curtosis	-1,322149653	Grado de concentración que presentan los valores en la región central de la distribución normal Planitocurtica (baja concentración de datos en la región central).
Coefficiente de asimetría	-0,354395414	Asimetría negativa mediana > media
Rango	6,08 W	Diferencia entre valor máximo y valor mínimo de potencia
Mínimo	36,72 W	Valor mínimo de potencia
Máximo	42,8 W	Valor máximo de potencia
Cuenta	247	Cantidad de datos de potencia tomados cada 10 segundos

Con respecto a los datos obtenidos y mostrados anteriormente la potencia promedio del sistema usando el seguidor es mayor comparada con el sistema en estado estacionario, sin embargo, aunque esta prueba preliminar se realiza en condiciones climatológicas

similares (cielo despejado) es necesario realizar una prueba en un mismo intervalo de tiempo y bajo condiciones climatológicas estables de cielo despejado, condiciones que se definieron para los resultados y pruebas definitivas de funcionamiento del prototipo y que se muestran a continuación.

3.2 Pruebas y resultados finales del prototipo

Para la realización de las pruebas finales del prototipo se dispusieron los días 11 y 12 de mayo del año 2020 en un rango de tiempo de 7 de la mañana a 5 de la tarde con toma de datos para ser cargados a la memoria SD cada 10 minutos, para el día (12/05/2020) las medidas se realizaron con el seguidor fijo en una única posición como lo sería una instalación fotovoltaica tradicional aislada, orientando el panel hacia el sur para una ubicación del sitio en el hemisferio norte y con un grado de inclinación de 16° (inclinación ideal aproximada para un sitio ubicado en Sogamoso, Paipa, Tunja donde la latitud oscila entre 5° y 6°) y teniendo en cuenta que 15° es la inclinación mínima recomendada para que en caso de lluvia el panel no acumule humedad generando el efecto lupa del agua sobre el panel que genera daños en el mismo.

Para el día (11/05/2020) las medidas se realizaron con el seguidor en movimiento bajo condiciones climatológicas similares a las del día (12/05/2020). A continuación, se presenta el resumen de los datos obtenidos de las pruebas realizadas para la evaluación del rendimiento del seguidor solar fotovoltaico en movimiento y en posición estática, los datos originales extraídos de la SD se encuentran disponibles en el anexo E resultados y cálculos complementarios (DATALOGGER PRUEBAS DE RENDIMIENTO (11-05-2020) - (12-05-2020)) de la misma manera que la tabla de datos organizados.

Tabla 3-5: Parámetros para prueba de rendimiento de seguidor en posición fija

POSICION FIJA DEL SEGUIDOR SOLAR FOTOVOLTAICO (12/05/2020)		
RANGO DE TIEMPO	07:08:41 a, m	04:57:02 p, m
PROMEDIO POTENCIA RANGO	15,89	W
TENSION PROMEDIO	11,96	V
CORRIENTE PROMEDIO	1,30	A
LUMINOSIDAD PROMEDIO	93,02	%

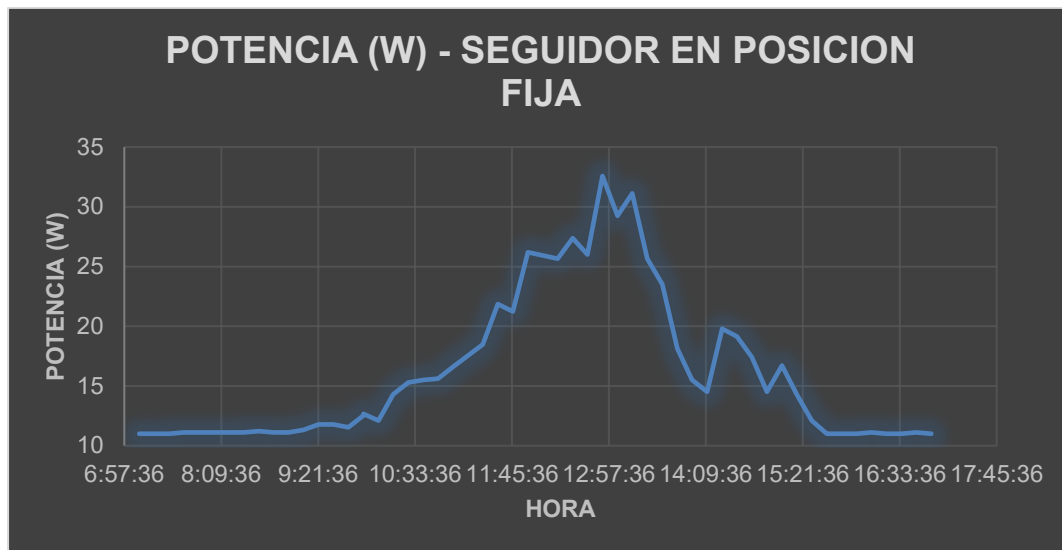
Fuente: Autor resultados obtenidos de Datalogger disponible en anexo E

Tabla 3-6: Estadística descriptiva de los datos obtenidos de potencia para el rango de tiempo definido (prueba de rendimiento de seguidor en posición fija)

POTENCIA		
Media	15,8915094 W	Promedio de potencia
Error típico	0,84299024	Oscilaciones de la media muestral
Mediana	12,65 W	Valor al cual llega el 50% de los datos de potencia
Moda	11 W	Dato de potencia que más se repite
Desviación estándar	6,13706156 W	Que tan dispersos están los datos de potencia con respecto a la media
Coefficiente Curtosis	0,44592625	Grado de concentración que presentan los valores en la región central de la distribución normal leptocúrtica (alta concentración de datos en la región central).
Coefficiente de asimetría	1,23906362	Asimetría positiva media > mediana
Rango	21,58 W	Diferencia entre valor máximo y valor mínimo de potencia
Mínimo	11 W	Valor mínimo de potencia
Máximo	32,58 W	Valor máximo de potencia
Cuenta	53	Cantidad de datos de potencia tomados cada 10,06 minutos

Fuente: Autor resultados obtenidos de Datalogger disponible en anexo E

Figura 3-1: Comportamiento de la potencia (W) obtenida por seguidor solar fotovoltaico en estado estacionario



Fuente: Autor

Tabla 3-7: Parámetros de prueba de rendimiento de seguidor solar en movimiento

SEGUIDOR SOLAR FOTOVOLTAICO EN MOVIMIENTO (11/05/2020)		
RANGO DE TIEMPO	07:05:11 a. m.	04:56:47 p. m.
PROMEDIO POTENCIA RANGO	29.26	W
TENSION PROMEDIO	15.12	V
CORRIENTE PROMEDIO	1.91	A
LUMINOSIDAD PROMEDIO	93,81	%

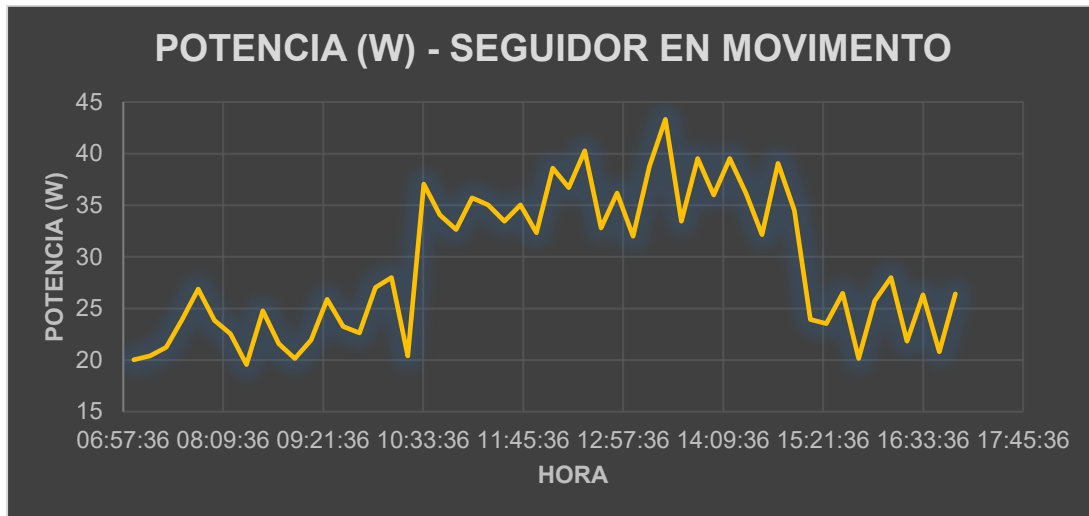
Fuente: Autor resultados obtenidos de Datalogger disponible en anexo E

Tabla 3-8: Estadística descriptiva de los datos obtenidos de potencia para el rango de tiempo definido (prueba de rendimiento de seguidor en movimiento)

POTENCIA		
Media	29,2615385 W	Promedio de potencia
Error típico	0,95824502	Oscilaciones de la media muestral
Mediana	27,51 W	Valor al cual llega el 50% de los datos de potencia
Moda	23,94 W	Dato de potencia que más se repite
Desviación estándar	6,91000309 W	Que tan dispersos están los datos de potencia con respecto a la media
Coficiente Curtosis	-1,33476371	Grado de concentración que presentan los valores en la región central de la distribución normal Planitocurtica (baja concentración de datos en la región central).
Coficiente de asimetría	0,2002927	Asimetría positiva media > mediana
Rango	23,76 W	Diferencia entre valor máximo y valor mínimo de potencia
Mínimo	19,56 W	Valor mínimo de potencia
Máximo	43,32 W	Valor máximo de potencia
Cuenta	52	Cantidad de datos de potencia tomados cada 10,6 minutos

Fuente: Autor resultados obtenidos de Datalogger disponible en anexo E

Figura 3-2: Comportamiento de la potencia (W) obtenida por seguidor solar fotovoltaico en movimiento



Fuente: Autor

Con respecto a los resultados obtenidos encontramos que la potencia promedio suministrada por el seguidor en el rango de tiempo definido es superior comparada con la potencia suministrada por el seguidor en una posición estacionaria y teniendo en cuenta un promedio de luminosidad similar para los dos días de prueba, ahora teniendo en cuenta la potencia pico del panel de 50W (condiciones ideales del fabricante a 1000 W/m^2 y 25° de temperatura del panel) tenemos que:

- La potencia promedio de generación del seguidor fotovoltaico en movimiento es de 29.26 W lo que representa un 58.52 % de la potencia pico bajo condiciones estándar de medida del fabricante.
- La potencia promedio de generación del seguidor fotovoltaico en posición estacionaria es de 15.89 W lo que representa un 31.78 % de la potencia pico bajo condiciones estándar de medida de fabricante.

Teniendo en cuenta los valores obtenidos con respecto al valor de potencia pico del panel encontramos que el uso del seguidor fotovoltaico mejora en un 26.74% la potencia obtenida con respecto al seguidor en una posición estacionaria (fija), sin embargo, teniendo en cuenta la potencia consumida del seguidor fotovoltaico de 7.18 W tomado de la tabla 2 -10 tenemos que:

- La potencia promedio de generación del seguidor fotovoltaico en movimiento es de 29.26 W, al restar la potencia consumida del sistema de movimiento tendríamos 22.08 W (44.52% de la potencia pico del panel bajo condiciones estándar de medida de fabricante) potencia disponible para ser usada en alguna carga.

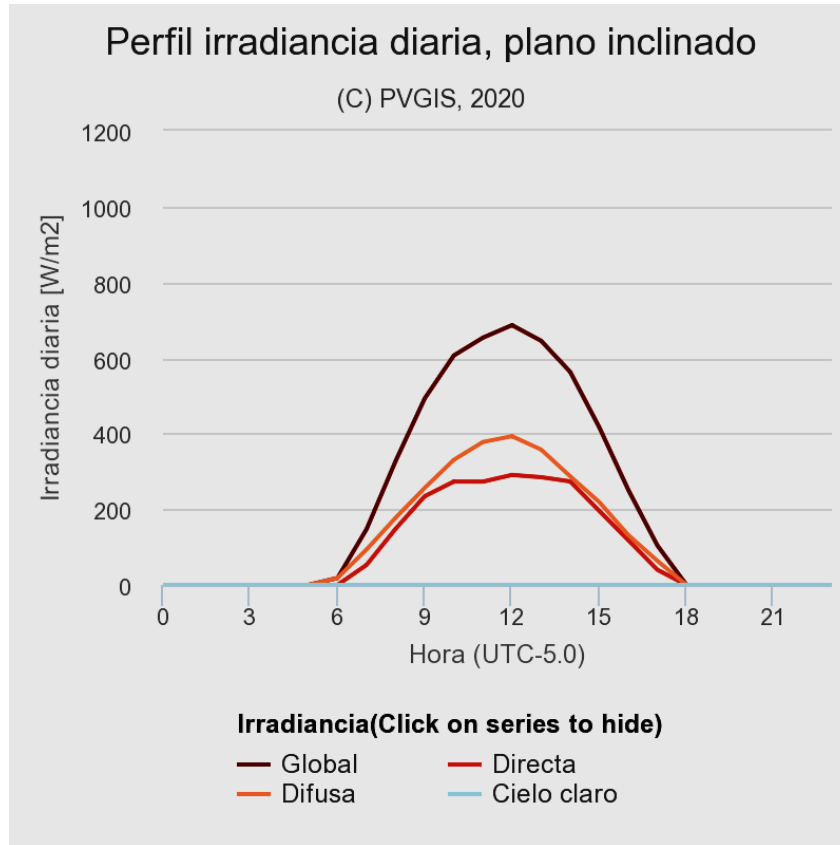
Considerando las anteriores apreciaciones con respecto a la potencia promedio extraída encontramos que el uso del seguidor solar fotovoltaico mejora en un 12.74% la potencia obtenida con respecto al seguidor en una posición estacionaria (fija).

El principal beneficio de los seguidores solares fotovoltaicos es poder mantener un valor de potencia promedio estable durante un mismo intervalo de tiempo esto lo podemos observar en la figura 3-2, una ventaja con respecto a los sistemas tradicionales de paneles fijos, si observamos la figura 3-1 donde, los valores máximos de potencia están concentrados al medio día, sin embargo en horas de la mañana y la tarde los valores de potencia disminuyen drásticamente, esto debido a que por la inclinación y disposición del panel no les permite alcanzar la perpendicularidad de los rayos solares lo que si puede realizar el seguidor, dentro del Anexo E - Resultados y cálculos complementarios, se encuentra disponible la carta solar referenciada al sitio¹ de realización de las pruebas, este documento define la trayectoria del sol en elevación y en azimut, y de este documento podemos constatar que el seguidor en una posición estacionaria no es posible obtener el máximo rendimiento con respecto a la trayectoria del sol.

Adicional a los anteriores resultados se realizó una simulación por medio de la plataforma web del sistema de información geográfica fotovoltaica (PVGIS) de la Unión Europea para obtener los datos promedio de irradiancia diarios tomando como ubicación de referencia el mismo sitio donde se realizaron las pruebas del seguidor, en el mes de mayo y bajo la misma inclinación del panel de 16° orientado al sur, información de simulación completa disponible en el Anexo E - Resultados y cálculos complementarios (SIMULACION DE RADIACION SOLAR DE SEGUIDOR SOLAR PVGIS). De acuerdo a la información señalada se obtuvieron los siguientes resultados:

¹ Carta solar extraída del portal web SunEarthtools.com

Figura 3-3: (a) Perfil de irradiancia diaria (plano inclinado), (b) Resultados irradiancia diaria (plano inclinado)



(a)

Irradiancia media diaria sobre plano fijo

Hora	00:45	01:45	02:45	03:45	04:45	05:45	06:45	07:45	08:45	09:45	10:45	11:45	12:45	13:45	14:45	15:45	16:45	17:45	18:45	19:45	20:45	21:45	22:45	23:45
G(i)	0	0	0	0	0	0	18	148	328	493	606	653	686	645	563	417	251	104	0	0	0	0	0	0
Gb(i)	0	0	0	0	0	0	0	53	149	234	273	273	291	285	274	196	118	40	0	0	0	0	0	0
Gd(i)	0	0	0	0	0	0	18	94	178	256	331	378	393	358	287	219	132	64	0	0	0	0	0	0
Gcs(i)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

G(i): Irradiancia global sobre plano fijo [W/m2].
 Gb(i): Irradiancia directa sobre plano fijo [W/m2].
 Gd(i): Irradiancia difusa sobre plano fijo [W/m2].
 Gcs(i): Irradiancia global cielo claro sobre plano fijo [W/m2].

(b)

Fuente: Autor, simulación en plataforma web del sistema de información geográfica fotovoltaica (PVGIS), anexo E (SIMULACION DE RADIACION SOLAR DE SEGUIDOR SOLAR PVGIS)

Teniendo en cuenta la curva de irradiación media diaria realizamos el promedio de la irradiancia media global ($G(i)_{promedio}$) en el rango de tiempo ajustado en el cual se realizaron

las pruebas con el seguidor solar tanto en posición fija como en movimiento así (Ver ecuación 3.1):

$$G(i)_{promedio} = \frac{148+328+328+493+606+653+686+645+563+417+251}{10} \quad (3.1)$$

$$G(i)_{promedio} = 479 \text{ W/m}^2$$

Con este valor de irradiancia global podemos determinar la potencia del panel con un rendimiento del 100% teniendo en cuenta el área del panel de dimensiones 0.67 m x 0.54 m lo que equivale a un área de 0.3618 m², de la misma manera podemos determinar la energía que podría suministrar en un intervalo de 10 horas con un rendimiento del 100% así (Ver ecuación 3.2 – 3.3):

$$P_{100\%} = G(i)_{promedio} * Area \quad (3.2)$$

$$P_{100\%} = 479 \frac{W}{m^2} * 0.3618 m^2 = 173.3 W$$

$$E_{100\%} = 173.3 W * 10 h = 1733 Wh \quad (3.3)$$

Los valores de potencia y energía son valores idealizados bajo un 100 % de rendimiento, valores que podrían darse si el panel pudiera capturar toda la radiación y transformarla en energía eléctrica lo cual es utópico, pero si nos sirve de referencia para saber el rendimiento del seguidor en posición estacionaria y en movimiento de acuerdo a los parámetros de prueba y resultados obtenidos previamente.

Teniendo en cuenta la potencia promedio del seguidor en posición estacionaria de acuerdo a los parámetros de prueba de la tabla 3-5 y con los resultados de la tabla 3-6, obtenemos una potencia promedio de 15,89 W, llevándola a 10 horas para realizar la comparación con la energía bajo rendimiento del 100% tendríamos una energía de 158.9 Wh, el rendimiento del seguidor en estado estacionario se muestra a continuación (Ver ecuación 3.4):

$$EFICIENCIA \text{ SEGUIDOR ESTADO ESTACIONARIO} = \frac{158.9 Wh}{1733 Wh} * 100\% = 9,16 \% \quad (3.4)$$

Ahora teniendo en cuenta la potencia promedio del seguidor en movimiento de acuerdo a los parámetros de prueba de la tabla 3-7 y con los resultados de la tabla 3-8, obtenemos una potencia promedio de 29,26 W, llevándola a 10 horas para realizar la comparación con la energía bajo rendimiento del 100% tendríamos una energía de 292.6 Wh, sin embargo

de este valor tenemos que restar el consumo energético del seguidor de 43.9 Wh de acuerdo a la tabla 2-10, lo cual representaría un valor energía neta de 248,7 Wh, el rendimiento del seguidor en movimiento se muestra a continuación (Ver ecuación 3.5):

$$EFICIENCIA\ SEGUIDOR\ EN\ MOVIMIENTO = \frac{248.7\ Wh}{1733\ Wh} * 100\% = 14.35\ \% \quad (3.5)$$

Teniendo en cuenta los valores de eficiencia del seguidor en movimiento con respecto al seguidor en estado estacionario hay aumento en la eficiencia del 5.19 % considerando la energía generada en Wh y teniendo esta vez como referencia el perfil de irradiancia diaria en el lugar de realización de las pruebas para el prototipo, basado en la simulación de la plataforma web del sistema de información geográfica fotovoltaica (PVGIS) de la Unión Europea, y usando la base de datos NSRDB del laboratorio nacional de energías renovables NREL (USA).

De la misma manera utilizando la misma plataforma PVGIS se realiza una simulación con el fin de determinar cuál es la producción anual fotovoltaica de un sistema con un panel de 50W, movimiento en dos ejes, ubicación definida en el sitio de realización de pruebas y perdidas del sistema del 14%, para el cual los resultados arrojaron una producción anual fotovoltaica de 102.99 kWh y una irradiación anual de 2629.63 kWh/m². Información que se encuentra disponible en el Anexo E - Resultados y cálculos complementarios (SIMULACION DE RENDIMIENTO DE SEGUIDOR SOLAR PVGIS).

3.3 Simulación de comportamiento del prototipo en condiciones ambientales principales

Como complemento a los resultados de funcionamiento del prototipo presentados anteriormente se realizó una simulación dinámica por medio del análisis de elementos físicos usando el aplicativo de Autodesk CFD a algunas de las condiciones ambientales que podrían presentarse en el seguidor solar fotovoltaico como son el viento, la temperatura y la humedad.

Inicialmente se realizó un análisis FEM bajo tres condiciones que son: una velocidad del viento que podría presentarse de 3.25 m/s, temperatura de 8 °C y una humedad del 40% definiendo las condiciones de simulación Autodesk CFD en 183306 nodos y 789797 elementos, estas condiciones de simulación están limitadas al computador bajo el cual se

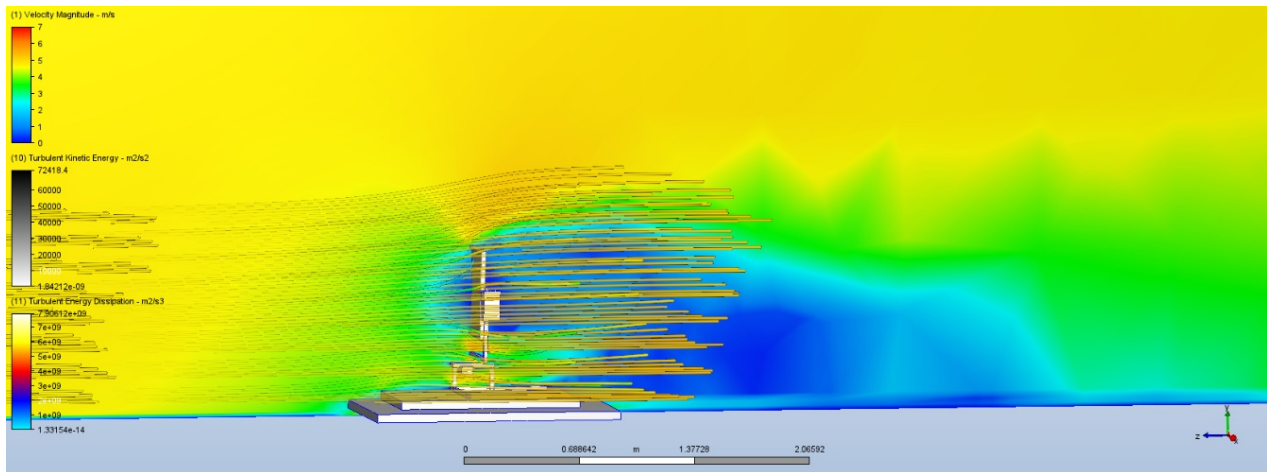
realiza la simulación ya que el análisis por elementos finitos consume gran cantidad de recursos del equipo lo que aumenta el tiempo de ejecución de la simulación, sin embargo de los resultados del análisis realizado se extrajeron las fuerzas presión y de corte que podrían actuar sobre la estructura en los distintos ejes de coordenadas y fueron los siguientes:

Tabla 3-9: Fuerzas ejercidas sobre las paredes del seguidor solar fotovoltaico bajo condiciones de análisis FEM (velocidad de viento 3.25 m/s, temperatura 8° C, humedad 40%)

Press x	-0.91817 Newtons
Press y	0.19913 Newtons
Press z	-12.914 Newtons
Shear x	-0.028555 Newtons
Shear y	-0.025778 Newtons
Shear z	-20.795 Newtons

Fuente: Autor CFD Autodesk

Figura 3-4: Comportamiento del seguidor bajo condiciones de análisis FEM (velocidad de viento 3.25 m/s, temperatura 8° C, humedad 40%)



Fuente: Autor CFD Autodesk

De la misma manera se realiza una segunda simulación analizando el comportamiento del seguidor bajo las condiciones de velocidad del viento tomadas de la plataforma de la NASA para la predicción de recursos energéticos (power.larc) para una velocidad del viento de 4.62 m/s (analizada en anexo E), temperatura de 8°, humedad del 50% y las condiciones

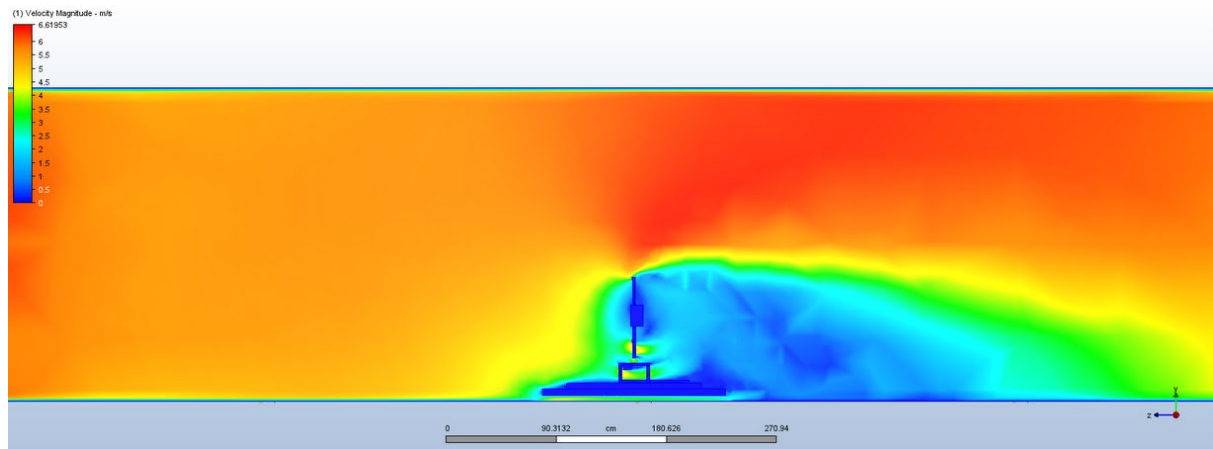
de simulación para la simulación en Autodesk CFD fueron (283627 nodos – 1212828 elementos), de los resultados del análisis realizado se extrajeron las fuerzas presión y de corte que podrían actuar sobre la estructura en los distintos ejes de coordenadas y fueron los siguientes:

Tabla 3-10: Fuerzas ejercidas sobre las paredes del seguidor solar fotovoltaico bajo condiciones de análisis FEM (velocidad de viento 4.62 m/s, temperatura 8° C, humedad 50%)

Press x	-0.69259 Newtons
Press y	14.004 Newtons
Press z	-16.298 Newtons
Shear x	0.00036439 Newtons
Shear y	-0.022603 Newtons
Shear z	-21.328 Newtons

Fuente: Autor CFD Autodesk

Tabla 3-11: Comportamiento del seguidor bajo condiciones de análisis FEM (velocidad de viento 4.62 m/s, temperatura 8° C, humedad 50%)



Fuente: Autor CFD Autodesk

Como complemento adicional a lo presentado anteriormente dentro del anexo E se encuentran dos videos ilustrativos de las simulaciones realizadas (SIMULACION FEM CFD 1, SIMULACION FEM CFD 2) para revisar el comportamiento del seguidor solar bajo distintas condiciones ambientales por medio del análisis FEM usando de Autodesk CFD.

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

- El prototipo de seguidor solar fotovoltaico en movimiento mejora en un 12.14% la potencia obtenida con respecto al prototipo en posición estacionaria aun considerando el 24.53% que el sistema en modo de seguimiento extrae de la potencia promedio de generación.
- El prototipo de seguidor solar fotovoltaico en modo de seguimiento mejora en un 5.19 % la eficiencia en generación de energía con respecto al seguidor en posición estacionaria, teniendo en cuenta la radiación global recibida en la ubicación de la realización de las pruebas del prototipo y bajo parámetros de simulación reales de experimentación.
- Con respecto a los resultados obtenidos en el desarrollo del proyecto se puede concluir que el seguidor solar fotovoltaico en modo de movimiento presenta un rendimiento superior a los sistemas tradicionales de paneles fijos en cuanto al promedio de potencia generada y en la generación de energía.
- Considerando los demás sistemas comerciales de seguimiento el prototipo desarrollado se encuentra por debajo del rendimiento dado por varias empresas del sector teniendo en cuenta el tiempo, el capital y la tecnología invertida; sin embargo, el desarrollo del prototipo es un avance para que este siga siendo estudiando y mejorado por parte de la comunidad estudiantil y de profesores de la Universidad Antonio Nariño.

- De acuerdo con los resultados de diseño y simulación el dispositivo no representa riesgo de averías en sus componentes debido a condiciones ambientales normales y cargas a las cuales este sometido, sin embargo, se deben seguir las recomendaciones presentadas en el manual de usuario del dispositivo para que este tenga un correcto funcionamiento.
- El prototipo del seguidor solar fotovoltaico cuenta con componentes y materiales que permitirán realizar un mantenimiento preventivo y correctivo gracias a la versatilidad de su diseño y facilidad de adquisición comercial de sus componentes.
- Todos los componentes que interactúan con el microcontrolador de la placa arduino MEGA 2560 son componentes compatibles, lo cual permite un alto grado de confiabilidad y estabilidad del sistema de control de seguimiento del prototipo.
- El diseño preliminar y los cálculos establecidos con anterioridad permitieron un ensamble seguro y preciso lo cual fue fundamental para el correcto funcionamiento del prototipo y la realización de las pruebas respectivas.
- El diseño del seguidor solar fotovoltaico se constituye como una alternativa a los sistemas tradicionales de paneles fijos, además de puede ser llevado a mayores dimensiones considerando los cálculos y resultados del presente proyecto.

4.2 Recomendaciones

- Es posible adaptar sensores adicionales al microcontrolador del seguidor solar, los cuales le permitirán identificar diferentes condiciones ambientales y desactivar el mecanismo del seguidor en caso de presentarse condiciones desfavorables que perjudiquen su correcto funcionamiento.
- Es posible modificar la programación del microcontrolador de tal manera que el posicionamiento del seguidor se realice en función de ecuaciones que predigan la ubicación del sol en todo momento, este sistema es conocido como posicionamiento astronómico, aunque requiere de investigación y pruebas funcionales por parte de las personas que quieran retomar el proyecto.
- De acuerdo con la programación del microcontrolador es posible modificarla de tal manera que el movimiento de los motores paso a paso y que permiten funcionar al seguidor sea determinado en función de una posición geográfica específica, esto con base en la carta solar la cual determina la ubicación del sol tanto en azimut como en elevación a lo largo del día, sin embargo la programación tendría que ajustarse exclusivamente al sitio donde se va a ubicar el seguidor, pero se podrían enlazar varios seguidores con la misma programación y secuencia de posicionamiento.
- Es viable el cambio de las fotorresistencias LDR, por sensores individuales de luz con mayores rangos de sensibilidad o por sensores de radiación, sin embargo, es necesario realizar pruebas funcionales y verificar el sistema de posicionamiento para comprobar su eficiencia, aunque esta mejora implicaría costos adicionales que tendrían que ser evaluados en función de su relación costo/beneficio.
- Para ampliar el alcance de funcionamiento del seguidor solar fotovoltaico y controlar su movimiento sin estar en el sitio, es posible modificar la programación del microcontrolador para que la secuencia de movimiento pueda ser manejada de forma remota por medio de un módulo wifi adicional. En caso de necesitar una posición específica o apagar el sistema al percibir condiciones climatológicas desfavorables, sin embargo, la conexión a internet tendría que ser continua y se debería evaluar el consumo energético bajo dichas condiciones de operación.
- Es necesario hacer mayor cantidad de pruebas al prototipo desarrollado, las cuales podrían realizarse en distintas ubicaciones geográficas, en un mayor lapso de

tiempo y bajo distintas condiciones ambientales, los resultados obtenidos permitirán realizar mejoras al prototipo y aumentar su rendimiento.

- Las condiciones climatológicas y constructivas con que se realizaron las pruebas al prototipo, permitieron evaluar el objetivo general del proyecto, bajo las restricciones surgidas por la pandemia del COVID – 19 durante el desarrollo del mismo, sin embargo, para condiciones climatológicas extremas este debe ser sometido a nuevas pruebas y bajo un análisis más profundo por medio de simulación (análisis de elementos finitos) lo cual requerirá mayor cantidad de tiempo, capacidad computacional y mayor complejidad en el análisis realizado de por parte de las personas que quieran retomar el proyecto.
- Para aumentar la información recolectada sobre el comportamiento del panel es posible acondicionar un sensor de radiación solar o realizar mediciones con un piranómetro, sin embargo, se tendría que analizar el costo que representa, el tiempo para realizar las mediciones y la funcionalidad para el seguidor solar fotovoltaico.

Bibliografía

- [1] CELSIA, «CELSIA,» 3 Julio 2018. [En línea]. Available: <https://blog.celsia.com/beneficios-de-la-energia-solar>.
- [2] J. Cepeda y A. Sierra, «Aspectos que afectan la eficiencia en los paneles fotovoltaicos y sus potenciales soluciones,» *Repositorio Institucional de la Universidad Santo Tomás*, 2017.
- [3] E. D. L. Cruz, «FACTORES QUE INFLUYEN EN LA EFICIENCIA DEL MÓDULO SOLAR,» 1 03 2018. [En línea]. Available: <https://globalsolare.com/2018/03/01/factores-que-influyen-en-la-eficiencia-del-modulo-solar-2-2-2-2/>.
- [4] LBA Industrial, «Seguidor solar. ¿Qué es? ¿Para que sirve? Tipos de seguidores solares.,» 03 Junio 2018. [En línea]. Available: <https://www.lbaindustrial.com.mx/seguidor-solar/>.
- [5] E. A. Mejía , H. M. Londoño y J. C. Osorio, «DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SEGUIDOR SOLAR PARA LA OPTIMIZACIÓN,» *Scientia et Technica Año XVI, No 44*, vol. XVI, nº 44, p. 245, 2010.
- [6] J. F. Díaz, «EFICIENCIA ENERGÉTICA Y UTOPIA,» 7 Abril 2015. [En línea]. Available: <https://juanfrancisco207.wordpress.com/2015/04/07/mecanismos-de-seguimiento-solar/>.
- [7] UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Atlas de Radiación Solar de Colombia, Bogota DC: UPME, IMEAM, 2005.
- [8] J. Cantos Serrano, Configuraciones de instalaciones solares fotovoltaicas, Madrid, ESPAÑA: Paraninfo SA, 2016.
- [9] T. Díaz Corcobado y G. Carmona Rubio, INSTALACIONES SOLARES FOTOVOLTAICOS, España: McGraw-Hill, 2010.

- [10] UPME, IDEAM, Fundación Universitaria Los Libertadores, ATLAS DE RADIACION SOLAR, ULTRAVIOLETA Y OZONO DE COLOMBIA, Bogota: Imprenta Nacional de Colombia, 2017.
- [11] J. A. Carta González, R. Calero Pérez, A. Colmenar Santos y M. A. Castro Gil, Centrales de energías renovables: generación eléctrica con energías renovables, Madrid: PEARSON EDUCACIÓN, 2009.
- [12] J. J. Garcia Badell, CALCULO DE LA ENERGIA SOLAR, Madrid: Neografis, 1983.
- [13] R. G. Cordero, «¿Cómo afecta la orientación e inclinación de las placas solares?,» SunFields Europe, 2015. [En línea]. Available: <https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/como-varia-la-captacion-de-energia-solar-en-superficies-inclinadas/>.
- [14] A. Luque y S. Hegedus, HANDBOOK OF PHOTOVOLTAIC SCIENCE AND ENGINEERING, The Atrium, Southern Gate, Chichester, England: WILEY, 2003.
- [15] O. Torrente Artero, ARDUINO Curso practico de formacion, Madrid, España: Alfaomega, 2013.
- [16] Vistronica tienda virtual de electronica , «Módulo Slot ó Adaptador de SD,» VISTRONICA S.A.S, [En línea]. Available: <https://www.vistronica.com/modulos/modulo-slot-o-adaptador-de-sd-detail.html>. [Último acceso: 16 04 2020].
- [17] L. Llamas, «RELOJ Y CALENDARIO EN ARDUINO CON LOS RTC DS1307 Y DS3231,» 18 10 2016. [En línea]. Available: <https://www.luisllamas.es/reloj-y-calendario-en-arduino-con-los-rtc-ds1307-y-ds3231/>. [Último acceso: 16 04 2020].
- [18] Tutorial sensor de corriente ACS712, «naylamp.mechatronics,» naylamp.mechatronics, [En línea]. Available: https://naylampmechatronics.com/blog/48_tutorial-sensor-de-corriente-ac712.html. [Último acceso: 09 05 2020].
- [19] V. Arrieta, «SENSOR DE VOLTAJE FZ0430 CON ARDUINO,» shopify, [En línea]. Available: <https://www.arcaelectronica.com/blogs/tutoriales/sensor-de-voltaje-fz0430-con-arduino>. [Último acceso: 30 05 2020].
- [20] R. L. Norton, DISEÑO DE MAQUINAS UN ENFOQUE INTEGRADO, Mexico: PEARSON, 2011.
- [21] J. Lozano Monge y F. J. Soria López, «XUNTA DE GALICIA,» Creative Commons, 30 Abril 2014. [En línea]. Available:

- https://www.edu.xunta.gal/espazoAbalar/sites/espazoAbalar/files/datos/1464947673/contido/52_tornillo_sinfn corona.html. [Último acceso: 08 04 2020].
- [22] Autodesk Inc., «ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS,» Autodesk, [En línea]. Available: <https://latinoamerica.autodesk.com/solutions/finite-element-analysis>. [Último acceso: 12 05 2020].
- [23] Vistronica tienda Virtual de electronica, «Módulo de Expansión Shield V2.0 para Arduino Mega,» VISTRONICA S.A.S., [En línea]. Available: <https://www.vistronica.com/board-de-desarrollo/arduino/shield/modulo-de-expansion-shield-v2-0-para-arduino-mega-detail.html>. [Último acceso: 16 04 2020].
- [24] WEBBEN2.EL, «SANYO DENKI 103G770-6041 DC 2.1V, 2.83A 1.8DEG / STEP NEMA23 MOTOR,» IdeaSoft, [En línea]. Available: <https://www.webdenikinci el.com/urun/sanyo-denki-103g770-6041-dc-2-1v-2-83a-1-8deg-step-motor>. [Último acceso: 3 05 2020].
- [25] HETPRO HERRAMIENTAS TECNOLOGICAS PROFESIONALES, «NEMA 17,» HeTPro, [En línea]. Available: <https://hetpro-store.com/nema-17/>. [Último acceso: 3 05 2020].
- [26] MecatrónicaLATAM, «MOTOR PASO A PASO,» Mecatrónica LATAM , [En línea]. Available: <https://www.mecatronicalatam.com/es/tutoriales/motor/motores-electricos/motor-de-corriente-continua/motor-paso-a-paso/>. [Último acceso: 03 5 2020].
- [27] Vistronica tienda virtual electronica, «Driver Para Motor Paso A Paso DRV8825,» VISTRONICA S.A.S, [En línea]. Available: <https://www.vistronica.com/impresora-3d-y-cnc/driver-para-motor-paso-a-paso-drv8825-detail.html>. [Último acceso: 16 04 2020].
- [28] dynamoelectronics, «DRV8825 driver motor de paso Original Pololu,» X-DYNAMO, [En línea]. Available: <https://www.dynamoelectronics.com/tienda/drv8825-driver-motor-de-paso-original-pololu/>. [Último acceso: 03 05 2020].
- [29] Vistronica tienda virtual , «Driver motores paso a paso TB6560,» VISTRONICA S.A.S, [En línea]. Available: <https://www.vistronica.com/robotica/motores/drivers-de-motores/driver-motores-paso-a-paso-tb6560-de-3a-detail.html>. [Último acceso: 16 04 2020].
- [30] QQ Online Trading, «Stepper Motor Driver - Single Axis (Peak 3A) TB6560,» QQ Online Trading, [En línea]. Available:

- http://qqtrading.com.my/index.php?route=information/information&information_id=4. [Último acceso: 03 05 2020].
- [31] Amazon, «Controladores de energía,» Amazon.com, Inc., 2020. [En línea]. Available: <https://www.amazon.com/-/es/VizGiz-BSV20A-Controlador-controlador-interruptor/dp/B07L2YZTG4>. [Último acceso: 01 05 2020].
- [32] Vistronica tienda virtual electronica, «Vistronica tienda virtual electronica,» Vistronica S.A.S., 2016. [En línea]. Available: <https://www.vistronica.com/fuente-de-voltaje/conversores-dc-dc/convertidor-dc-dc-buck-lm2596-detail.html>. [Último acceso: 1 05 2020].
- [33] M. F. Suárez, «'Pacto por Colombia', 'Pacto por la transformación energética',» *EL TIEMPO*, 29 Abril 2019.
- [34] Proyecto EnDev/GIZ, Manual de instalación de un sistema fotovoltaico domiciliario, Lima: Imaginart, 2013.
- [35] C. Veloso, «ELECTRONTTOOLS,» 19 Junio 2018. [En línea]. Available: <https://www.electrontools.com/Home/WP/2018/06/19/arduino-mega-2560-caracteristicas/>.
- [36] Arduino, «Store.arduino.cc,» Creative Commons Attribution ShareAlike 3.0., 2020. [En línea]. Available: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-usb-host-shield>. [Último acceso: 2020 04 7].