



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

PROPUESTA TECNOLÓGICA

“IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA PARA CONTROL DE POSICIONAMIENTO ANGULAR DE 1 EJE EN UNA ESTACIÓN FOTOVOLTAICA DE 1 KW”

Propuesta tecnológica presentada previo a la obtención del Título de Ingenieros Electromecánicos.

Autores:

Simbaña Caiza Jhonatan Steven

Supe Bombon Luis Washington

Tutor Académico:

Ing. Luis Rolando Cruz Panchi M.Sc.

Latacunga – Ecuador

Marzo – 2023



DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, Simbaña Caiza Jhonatan Steven y Supe Bombon Luis Washington en calidad de estudiantes de la Universidad Técnica de Cotopaxi, declaramos ser autores de la presente propuesta tecnológica: **“IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA PARA CONTROL DE POSICIONAMIENTO ANGULAR DE 1 EJE EN UNA ESTACIÓN FOTOVOLTAICA DE 1 KW”**, siendo el Ing. Luis Rolando Cruz Panchi M.Sc.; tutor del presente trabajo y eximimos expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certificamos que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de nuestra exclusiva responsabilidad.

Latacunga, marzo 2023

.....
Simbaña Caiza Jhonatan Steven
C.C. 172724438-4

.....
Supe Bombon Luis Washington
C.C. 180512506-7



AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE TITULACIÓN

En calidad de Tutor del Trabajo Tecnológico sobre el título:

“IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA PARA CONTROL DE POSICIONAMIENTO ANGULAR DE 1 EJE EN UNA ESTACIÓN FOTOVOLTAICA DE 1 KW”, de Simbaña Caiza Jhonatan Steven y Supe Bombon Luis Washington, de la Carrera de Ingeniería Electromecánica, considero que dicho documento cumple con los requerimientos metodológicos y aportes Científicos-Técnicos suficientes para ser sometidos a evaluación del Tribunal de Validación del proyecto que el Consejo Directivo de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, marzo 2023

.....
Tutor Académico

Ing. Luis Rolando Cruz Panchi M.Sc.

CC: 050259517-6



APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad del Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe Tecnológico de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS; por cuanto, los postulantes: Simbaña Caiza Jhonatan Steven y Supe Bombon Luis Washington, con el Título de Proyecto de Titulación: **“IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA PARA CONTROL DE POSICIONAMIENTO ANGULAR DE 1 EJE EN UNA ESTACIÓN FOTOVOLTAICA DE 1 KW”**, han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúnen los méritos suficientes para ser sometidos al acto de Sustentación del Proyecto.

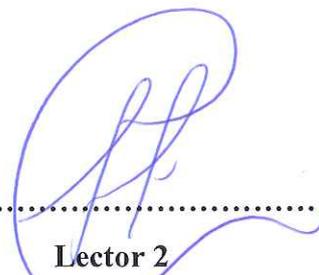
Por lo antes expuesto, se autoriza realizar los empastados correspondientes, según la normativa institucional.

Latacunga, marzo del 2023

Para constancia firman:


.....
Lector 1 (Presidente)

Ing. Segundo Ángel Cevallos Betún M.Sc.
CC: 050178243-7


.....
Lector 2

Ing. Carlos Francisco Pacheco Mena M.Sc.
CC: 050307290-2


.....
Lector 3

Ing. Edwin Homero Moreano Martínez M.Sc.
CC: 050260750-0



AVAL DE IMPLEMENTACIÓN

Con el presente documento, se pone en constancia que los estudiantes; Simbaña Caiza Jonathan Steven y Supe Bombon Luis Washington, de la Carrera de Ingeniería Electromecánica de la Universidad Técnica de Cotopaxi, han desarrollado el proyecto tecnológico **“IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA PARA CONTROL DE POSICIONAMIENTO ANGULAR DE 1 EJE EN UNA ESTACIÓN FOTOVOLTAICA DE 1 KW”**, y realizaron la entrega del sistema de control para laboratorio de energías renovables cumpliendo así los objetivos propuestos al inicio del desarrollo del proyecto.

Sin otro particular autorizo para que usen el presente documento para cualquier fin legal pertinente de la Universidad.

Latacunga, marzo 2023

**DIRECTOR DE LA CARRERA
INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

Ing. Cristian Fabian Gallardo Molina M.Sc.

C.C: 050284769-2

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por la vida, a mis padres por el apoyo incondicional en estos años de esfuerzo, a mi querida Universidad Técnica de Cotopaxi por brindarme la oportunidad de haber sido parte de este sueño que se ha plasmado en realidad y hoy culmino mi carrera la cual siempre añore día tras día; también hago llegar mi agradecimiento efusivo a cada uno de mis maestros quienes compartieron sus conocimientos en este proceso y etapa de mi vida estudiantil, guiándome con principios y valores con el fin de ser un profesional capaz, transparente y humanitario con la sociedad, enseñanzas que siempre las llevare presente, a mis compañeros por ese apoyo incondicional en cada reto presentado, y a todas las personas que son parte de mi diario vivir y han estado apoyándome para cumplir con en el presente trabajo investigativo.

Jhonatan Steven Simbaña Caiza

AGRADECIMIENTO

Primeramente, agradezco a Dios, a mis padres, hermanos y a mi esposa por ser el principal motor que me empuja a seguir adelante inspirado y con ganas de romper obstáculos en el camino.

Agradezco a la Universidad Técnica de Cotopaxi por brindarme la oportunidad de formarme profesionalmente con unas gratas experiencias, por permitirme conocer nuevas personas y amigos, como lo son Ingenieros, Paúl Corrales, Jefferson Porras, y Stiven Simbaña compañero de Tesis. Gracias a cada docente que hizo parte de este proceso de formación.

Quiero agradecer al Ingeniero Cristian Gallardo que me brindó sus consejos y las pautas para poder finalizar mi proceso profesional.

Luis Washington Supe Bombon

DEDICATORIA

El presente trabajo lo dedico en primer lugar a mi madre por darme la vida y por ser un ejemplo de sacrificio, esfuerzo y perseverancia; a mi padre siendo esa fortaleza y espejo para seguir y que un hombre necesita para llegar lejos, también agradezco a la vida por poner en mi camino un ángel que día a día está pendiente de que no nos falte un plato de comida en la mesa y echa sus bendiciones sobre mi familia para que nos vaya bien en nuestro diario vivir.

Jhonatan Steven Simbaña Caiza

DEDICATORIA

Esta tesis va dedicada principalmente a mi familia, especialmente a mis padres, a mi esposa y a mi hijo quienes estuvieron en todo el proceso de mi formación profesional agradecerles por el apoyo moral y económico cuando más lo necesite, también a mis hermanos que siempre estuvieron para darme esa mano para terminar mis estudios universitarios.

También a Dios ya que gracias a la fuerza y salud que me brindo cada día, he logrado permanecer junto a mi familia.

Luis Washington Supe Bombon

ÍNDICE GENERAL

DECLARACIÓN DE AUTORÍA	ii
AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE TITULACIÓN	iii
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN.....	iv
AVAL DE IMPLEMENTACIÓN.....	v
AGRADECIMIENTO	vi
DEDICATORIA.....	viii
ÍNDICE GENERAL	x
ÍNDICE DE TABLAS.....	xv
ÍNDICE DE FIGURAS	xvi
INDÍCE DE ECUACIONES	xviii
RESUMEN	xix
ABSTRACT	xx
AVAL DE TRADUCCIÓN.....	xxi
1. INFORMACIÓN GENERAL	22
2. INTRODUCCIÓN.....	24
2.1. PROBLEMA	24
2.1.1 Situación problemática.....	24
2.1.2. Diagrama Ishikawa.....	25
2.1.3. Formulación del problema:	25
2.2. OBJETIVO Y CAMPO DE ACCIÓN	25
2.2.1. Objeto de estudio.....	25
2.2.2. Campo de acción	26
2.3. BENEFICIARIOS	26
2.3.1. Beneficiarios Directos.	26
2.3.2. Beneficiarios Indirectos.....	26

2.4.	JUSTIFICACIÓN.....	26
2.5.	HIPÓTESIS.....	27
2.6.	OBJETIVOS.....	27
2.6.1.	Objetivo general.....	27
2.6.2.	Objetivos específicos.....	27
2.7.	SISTEMA DE TAREAS.....	27
3.	FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	29
3.1.	ANTECEDENTES.....	29
3.2.	ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	32
3.2.1.	Efecto fotoeléctrico.....	32
3.3.	PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS.....	33
3.3.1.	Monocristalinos.....	33
3.3.2.	Policristalinos.....	34
3.3.3.	De capa fina (Amorfos).....	34
3.4.	ANÁLISIS SOLAR DEL ECUADOR.....	34
3.4.1.	El recurso solar en el ecuador.....	34
3.4.2.	Trayectoria orientada al sol.....	35
3.4.3.	Posicionamiento Terrestre.....	37
3.4.4.	Movimientos de la Tierra.....	37
3.4.5.	Zona Geoastronómica de la Tierra.....	38
3.4.6.	Coordenadas Celestes.....	38
3.4.7.	Tablas de Valores de Posición de la Tierra.....	39
3.5.	RADIACIÓN SOLAR.....	40
3.5.1.	Radiación solar en el Ecuador (Cotopaxi-Latacunga).....	41
3.5.2.	Tipos de radiación solar.....	42
3.6.	SEGUIDORES SOLARES.....	42

3.6.1.	Función de los Seguidores Solares	43
3.6.2.	Modelos de Seguidores Solares	43
3.6.3.	Tipos de seguidores	44
3.6.4.	Tipos de Seguimiento Solar	45
3.6.5.	Mecanismos según el grado de libertad	46
3.6.6.	Seguidores Solares Disponibles en la Industria	47
3.6.7.	Elementos que Conforman un Sistema de Seguidor Fotovoltaico	48
3.7.	FACTORES QUE AFECTA AL SISTEMA FOTOVOLTAICO	49
3.8.	GRADOS DE LIBERTAD	50
3.9.	MECANISMO Y MOVIMIENTO	50
3.9.1.	Actuador Lineal Eléctrico	50
3.9.2.	Seguidor solar según el tipo de algoritmo de seguimiento.....	51
3.9.3.	Estudio de sistemas de seguimiento solar en el Ecuador	52
4.	MATERIALES Y MÉTODOS.	55
4.1.	METODOLOGÍA	55
4.2.	TIPOS DE INVESTIGACIÓN	55
4.3.	MÉTODOS.....	55
4.3.1.	Método deductivo.....	55
4.3.2.	Método científico	56
4.4.	DECLARACIONES DE VARIABLES	56
4.4.1.	Operacionalización de las variables	56
4.4.2.	Métodos, técnicas e instrumentos.....	56
4.5.	DESCRIPCIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL ...	57
4.5.1.	Inclinaciones máximas y mínimas del sistema.....	58
4.5.2.	Desarrollo del algoritmo matemático de seguimiento astronómico.....	58
4.6.	DISEÑO DEL MECANISMO	61

4.6.1.	Diagrama Cinemático del mecanismo.....	61
4.6.2.	Determinación de los grados de libertad por el método de Kutzbach Grubler	61
4.7.	ANÁLISIS DEL SOPORTE MECÁNICO.....	62
4.7.1.	Cálculo de Fuerzas Aplicadas en el Eje	62
4.7.2.	Fuerzas en el Eje por la Carga del Viento	62
4.8.	PARÁMETROS DEL CONTROLADOR	62
4.8.1.	Diagrama de flujo del sistema	63
4.9.	INCLINACIÓN Y ORIENTACIÓN PARA PANELES FIJOS	64
4.9.1.	Orientación	64
4.9.2.	Inclinación	64
4.10.	DISEÑO DEL EXPERIMENTO PRÁCTICO.....	64
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	66
5.1.	TIPO DE SEGUIDOR SOLAR IMPLEMENTADO	66
5.2.	TIPO DE SEGUIMIENTO PARA EL SISTEMA CONTROL.....	66
5.3.	DETERMINACIÓN DE ÁNGULOS DE ELEVACIÓN PARA LOS PANELES SOLARES	68
5.4.	GRADOS DE LIBERTAD DEL MECANISMO	70
5.5.	ANÁLISIS PARA LA SELECCIÓN DEL ACTUADOR LINEAL	70
5.5.1.	Peso de los paneles y estructura	70
5.5.2.	Fuerza de la velocidad del viento	70
5.5.3.	Momento para mover la estructura.....	71
5.6.	PASO Y VELOCIDAD DEL ACTUADOR LINEAL ELÉCTRICO	74
5.7.	DISEÑO ESTRUCTURAL DEL SOPORTE PARA EL ACTUADOR	74
5.7.1.	Selección de materiales	75
5.7.2.	Deformación equivalente	75
5.7.3.	Factor de seguridad	76
5.8.	CARACTERÍSTICAS DEL CONTROLADOR SOLAR DE POSICIONAMIENTO	

ANGULAR	77
5.9. INSTALACION DEL CONTROLADOR	77
5.10. INSTALACIÓN DEL SENSOR SOLAR.....	78
5.11. PRUEBA DEL CONTROLADOR:	79
5.12. CONSTRUCCIÓN DEL SOPORTE PARA EL ACTUADOR.....	79
5.13. MONTAJE DEL ACTUADOR LINEAL ELÉCTRICO	80
5.14. ANÁLISIS DE TENSIÓN DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO FIJO Y MÓVIL....	81
5.14.1. Análisis de tensión del sistema fotovoltaico fijo.....	82
5.14.2. Análisis de tensión del sistema fotovoltaico móvil.....	82
5.15. PRESUPUESTO	83
5.15.1. Presupuesto global del proyecto.....	84
5.15.2. Gastos directos totales	84
5.15.3. Gastos indirectos	85
5.15.4. Gastos indirectos totales.....	85
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	86
6.1. CONCLUSIONES.....	86
6.2. RECOMENDACIONES	86
7. BIBLIOGRAFÍA.....	87
8. ANEXOS.....	90

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Descripción de objetivos y tareas.....	27
Tabla 3.1: Captación media anual de sistema FV fijo y con seguimiento.....	31
Tabla 3.2: Porcentaje de aumento de voltaje para los algoritmos de seguimiento.....	32
Tabla 3.3: Datos del 20 de marzo del 2022	39
Tabla 3.4: Datos del 23 de septiembre del 2022.....	39
Tabla 3.5: Rendimiento solar y capacidad de giro	43
Tabla 3.6: Seguidores disponibles en el mercado.....	47
Tabla 3.7: Ventajas y desventajas según el algoritmo de seguimiento	52
Tabla 3.8: Captación anual media de sistema FV fijo y con seguimiento.....	53
Tabla 3.9: Resultados con sistema solar fijo	53
Tabla 3.10: Resultados con sistema de seguimiento solar.....	54
Tabla 4.1: Variable independiente.....	56
Tabla 4.2: Variable dependiente	56
Tabla 4.3: Métodos, Técnicas e Instrumentos	56
Tabla 4.4: Inclinación para sistemas fijos	64
Tabla 5.1: Descripción del control de posición ON.OFF.....	67
Tabla 5.2: Ángulos de geometría solar en SunEarthTools.	69
Tabla 5.3: Característica del actuador lineal.	73
Tabla 5.4: Datos de tensión medidos del panel fijo.....	81
Tabla 5.5: Datos de tensión medidos del panel móvil.....	81
Tabla 5.6: Presupuesto global del proyecto.....	84
Tabla 5.7: Gastos directos totales	84
Tabla 5.8: Gastos indirectos totales.....	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Diagrama Ishikawa	25
Figura 3.1: Adición de capacidad de generación fotovoltaica 2008-2018, en GW.....	30
Figura 3.2: Carga de una célula fotovoltaica.....	33
Figura 3.3: Panel monocristalino, policristalino y de capa fina	34
Figura 3.4: Radiación solar global horizontal del ARCONEL.....	35
Figura 3.5: Coordenadas celestes horarias	36
Figura 3.6: Ángulos de posición.....	37
Figura 3.7: Zona geoastronómica de la tierra	38
Figura 3.8: Espectro electromagnético de la radiación solar.....	41
Figura 3.9: Trayectoria de los rayos solares	42
Figura 3.10: Clasificación de los seguidores solares.....	44
Figura 3.11: Clasificación de los seguidores de un solo eje.....	45
Figura 3.12: Clasificación de seguidores de dos ejes	45
Figura 3.13: Mecanismo giroscopios.....	46
Figura 3.14: Mecanismo heliostato	47
Figura 3.15: Perfil de obstáculos	50
Figura 3.16: Actuador lineal eléctrico 500 kg.....	51
Figura 3.17: Resultados de la carga en la batería con los dos sistemas.....	54
Figura 4.1: Metodología y pasos para construcción del sistema de control.....	57
Figura 4.2: Inclinación Este-Oeste	58
Figura 4.3: Trayectoria solar en la Universidad Técnica de Cotopaxi	61
Figura 4.4: Diagrama cinemático del mecanismo	61
Figura 4.5: Diagrama de flujo del controlador por programación astronómica	63
Figura 4.6: Conexión para adquirir tensiones del panel móvil.....	65
Figura 4.7: Conexión para adquirir tensiones del panel fijo.....	65

Figura 5.1: Controlador solar.....	67
Figura 5.2: Ángulo crítico actuador abierto.....	72
Figura 5.3: Ángulo crítico actuador cerrado.....	73
Figura 5.4: Soporte mecánico para el actuador.	75
Figura 5.5: Catalogo de tubos estructurales.....	75
Figura 5.6: Deformación equivalente.	76
Figura 5.7: Factor de seguridad.	76
Figura 5.8: Cableado del controlador	78
Figura 5.9: Instalación del sensor de posición.....	78
Figura 5.10: Soporte del actuador.....	80
Figura 5.11: Actuador lineal anclado.	80
Figura 5.12: Tensión del sistema fotovoltaico fijo.	82
Figura 5.13: Tensión del sistema fotovoltaico móvil.	82
Figura 5.14: Tensión del sistema fotovoltaico fijo vs el móvil.	83

INDÍCE DE ECUACIONES

Ecuación (4.1): Declinación (δ)	59
Ecuación (4.2): Tiempo estándar del meridiano de Greenwich ($LSTM$)	59
Ecuación (4.3): Corrección del tiempo por la excentricidad terrestre (EoT).....	59
Ecuación (4.4): Corrección de ángulo de inclinación B.....	59
Ecuación (4.5): Factor de corrección del tiempo (TC)	59
Ecuación (4.6): Tiempo solar de la localidad (LST)	59
Ecuación (4.7): Ángulo de Elevación de los paneles (α)	59
Ecuación (4.8): Elevación solar (β)	60
Ecuación (4.9): Elevación máxima (β_{max}).....	60
Ecuación (4.10): Azimut (Az)	60
Ecuación (4.11): Determinación de los grados de libertad.....	61
Ecuación (4.12): Fuerzas estáticas que soporta el eje	62
Ecuación (4.13): Fuerza del viento.....	62
Ecuación (5.1): Fuerza que ejerce el viento sobre la estructura	71
Ecuación (5.2): Fuerza total en el eje.	71
Ecuación (5.3): Fuerza en los extremos de los paneles	71
Ecuación (5.4): Momento en el eje.....	71
Ecuación (5.5): Fuerza necesaria para el actuador lineal	72
Ecuación (5.6): Paso del actuador lineal.	74



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

TÍTULO: “IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA POSICIONAMIENTO ANGULAR DE 1 EJE EN UNA ESTACIÓN FOTOVOLTAICA DE 1 KW”

Autores:

Simbaña Caiza Jhonatan Steven

Supe Bombon Luis Washington

RESUMEN

El propósito del presente proyecto es implementar un sistema para control de posicionamiento angular de un eje, el cual permitirá incrementar el aprovechamiento de la irradiancia solar en una estación fotovoltaica de 1 kW, debido a que actualmente el desaprovechamiento de la energía solar captada por sistemas fotovoltaicos fijos es deficiente. En primer lugar, se realizó la investigación en fuentes bibliográficas, donde se estudió los ángulos de inclinación solar, tipologías de sistemas de seguimiento y algoritmos de alcance. Acto seguido, se dimensionó las características principales del sistema para efectuar el control en base a ecuaciones de geometría solar y parámetros ambientales. Indudablemente, trascendental para la selección de los materiales óptimos para la parte mecánica del soporte. Por otro lado, mediante cálculos se estableció las características necesarias del actuador, el mismo que permitió realizar el movimiento de este a oeste del sistema. El algoritmo de seguimiento astronómico fue desarrollado mediante ecuaciones de geometría solar, las cuales permitieron determinar la posición exacta del sol en tiempo real haciendo uso de una base de datos como fecha, hora y ubicación geográfica. Por consiguiente, se seleccionó el tipo de sistema de control de dos posiciones (ON- OFF) en base al funcionamiento lineal del actuador eléctrico, permitiendo así controlar el encendido y apagado del motor de 12V DC del actuador. Finalmente se empleó la investigación empírica con la finalidad de verificar el funcionamiento del sistema mediante pruebas de operación en campo, donde se comprobó el incremento del aprovechamiento de la irradiación solar de un sistema con control de posicionamiento angular móvil frente a un sistema de posición fija, en los dos casos de estudio se midió la tensión máxima que pueden generar los paneles solares en diferentes horas del día, las dos configuraciones fueron cotejadas tanto en días soleados como en días nublados, obteniendo como resultado un incremento en el aprovechamiento de la captación de irradiancia solar de un 12 % en el sistema fotovoltaico móvil.

Palabras clave: Irradiancia, trayectoria solar, seguimiento astronómico.



TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI

FACULTY OF ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES

TITLE: “IMPLEMENTATION OF A 1-AXIS ANGULAR POSITIONING CONTROL SYSTEM IN A 1 KW PHOTOVOLTAIC STATION”

Authors:

Simbaña Caiza Jhonatan Steven

Supe Bombon Luis Washington

ABSTRACT

The purpose of this project is to implement a system for angular positioning control of an axis, which will increase the use of solar irradiance in a photovoltaic station of 1 kW, because currently the waste of solar energy captured by fixed photovoltaic systems is deficient. First of all, research was carried out in bibliographic sources, where solar tilt angles, tracking system typologies and ranging algorithms were studied. Then, the main characteristics of the system were dimensioned to carry out the control based on solar geometry equations and environmental parameters. Undoubtedly, transcendental for the selection of the optimal materials for the mechanical part of the support. On the other hand, by means of calculations, the necessary characteristics of the actuator were established, which allowed the east-west movement of the system. The astronomical tracking algorithm was developed by means of solar geometry equations, which allowed determining the exact position of the sun in real time using a database such as date, time and geographical location. Consequently, the type of two-position control system (ON- OFF) was selected based on the linear operation of the electric actuator, thus allowing to control the switching on and off, of the 12V DC motor of the actuator. Finally, empirical research was used in order to verify the performance of the system by means of field operation tests, where the increase of the solar irradiation utilization of a system with mobile angular positioning control versus a fixed position system was verified, In the two case studies, the maximum voltage that the solar panels can generate at different times of the day was measured, the two configurations were compared both on sunny and cloudy days, resulting in an increase in the solar irradiance capture of 12% in the mobile photovoltaic system.

Keywords: Irradiance, solar trajectory, astronomical monitoring.



AVAL DE TRADUCCIÓN

En calidad de Docente del Idioma Inglés del Centro de Idiomas de la Universidad Técnica de Cotopaxi; en forma legal **CERTIFICO** que:

La traducción del resumen del proyecto de investigación al Idioma Inglés presentado por los estudiantes, SIMBAÑA CAIZA JHONATAN STEVEN y SUPE BOMBON LUIS WASHINGTON de la **CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA** del **CAMPUS LA MATRIZ**, cuyo título versa **“IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA PARA CONTROL DE POSICIONAMIENTO ANGULAR DE 1 EJE EN UNA ESTACIÓN FOTOVOLTAICA DE 1 KW”**, lo realizaron bajo mi supervisión y cumple con una correcta estructura gramatical del idioma.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad y autorizo a los peticionarios hacer uso del presente certificado de la manera ética que estimaren conveniente.

Latacunga, febrero del 2023

Atentamente,



CENTRO
DE IDIOMAS

MSc. Diana Karina Taipe Vergara.

C.C. 1720080934

1. INFORMACIÓN GENERAL

Título:

“Implementación de un sistema de control para posicionamiento angular de 1 eje en una estación fotovoltaica de 1 KW”

Fecha de inicio:

Octubre 2022

Fecha de finalización:

Marzo 2023

Lugar de ejecución:

Región: Zona 3

Provincia: Cotopaxi

Cantón: Latacunga

Lugar: Universidad Técnica de Cotopaxi

Facultad que auspicia:

Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicada

Carrera que auspicia:

Ingeniería Electromecánica

Proyecto de investigación vinculado:

Energías Renovables

Equipo de Trabajo:

Tutor de la propuesta tecnológica, Asesor Técnico

Nombres: Luis Rolando

Apellidos: Cruz Panchi

Cédula de identidad: 050259517-6

Correo electrónico: luis.cruz@utc.edu.ec

Coordinador 1:

Nombres: Jonathan Steven
Apellidos: Simbaña Caiza
Cédula de identidad: 1727244384
Correo electrónico: jhonatan.simbana4384@utc.edu.ec

Coordinador 2:

Nombres: Luis Washington
Apellidos: Supe Bombon
Cédula de identidad: 1805125067
Correo electrónico: luis.supe5067@utc.edu.ec

Área de Conocimiento: Ciencias Tecnológicas

Tomando como referencia la norma CINE - UNESCO las áreas de conocimiento del proyecto se detallan a continuación:

- 3300. Ciencias tecnológicas
 - 3306. Ingeniería y Tecnología Eléctricas
 - 3306.02 Aplicaciones Eléctricas
 - 3306.03 Motores Eléctricos
 - 3311. Tecnología de la Instrumentación
 - 3311.05 Equipos eléctricos de Control
 - 3311.06 Instrumentos Eléctricos
 - 3322. Tecnología Energética
 - 3322.01 Distribución de la Energía
 - 3322.02 Generación de Energía
 - 3322.03 Generadores de Energía

Línea de investigación:

Energías alternativas y renovables, eficiencia energética y protección ambiental.

Sublíneas de investigación de la Carrera:

Eficiencia energética en sistemas electromecánicos y uso de fuentes renovables de energía.

2. INTRODUCCIÓN

Actualmente el sector de la energía renovable tiene un gran impacto debido a los beneficios que ofrece a la humanidad y su entorno, la mayor desventaja es el agotamiento de los recursos no renovables ya que son limitados y su nivel de abundancia se ha reducido en las últimas décadas comprometiendo al medio ambiente elevando el calentamiento global, es por ello que surge la necesidad de producir energía eléctrica de una manera más limpia y amigable con el medio ambiente [1].

En la actualidad el Ecuador cuenta con un marco óptimo para implementar el desarrollo energético sostenible, adquirida a través del aprovechamiento de la radiación electromagnética procedente del Sol y ésta se convierte en electricidad mediante sistemas fotovoltaicos, para receptar la radiación solar haciendo uso de concentradores solares, teniendo como desventaja la variación de la potencia y orientación de este sistema para cada día del año, la hora, las condiciones atmosféricas y la altitud del sitio donde se encuentra ubicado el concentrador solar [2].

Es por ello que se plantea la implementación de un sistema de control cuya función permita maniobrar la posición de un conjunto de paneles solares en una estación fotovoltaica, con el fin de incrementar la producción de energía mediante la utilización de actuadores y sistemas electrónicos, que acorde a los ángulos de incidencia del sol siguen la trayectoria del mismo, permitiendo la captura máxima de radiación solar durante el día.

2.1. PROBLEMA

2.1.1 Situación problemática

Ecuador debido a su ubicación geográfica dispone con 12 horas de luz solar continuas durante el día y 12 horas de oscuridad en la noche, cumpliendo una trayectoria de 180° durante esas 12 horas, por esta razón las tecnologías empleadas en sistemas de captación solar como seguidores fijos, donde su posición estática provoca un desaprovechamiento del recurso energético, hace necesario implementar un mecanismo de control capaz de solventar esta falta de movimiento en el sistema haciéndolo más factible a la hora de generar energía [2].

Los sistemas fotovoltaicos tradicionales utilizan los paneles fotovoltaicos de manera fija, pero el sistema al ser rígido no presenta su máximo rendimiento de captación solar desperdiciando potencial energético, que en base a estudios las pérdidas por sistema de captación estáticos son de alrededor del 30% que en sistemas con inversiones elevadas como lo son las centrales

fotovoltaicas, representan un gran perjuicio económico [3].

Por consiguiente, surge la necesidad de implementar un sistema de control de un eje para un sistema fotovoltaico el cual funcione con un mecanismo mecánico y electrónico para el funcionamiento óptimo de la estación solar, que se encuentra ubicada en la Universidad Técnica de Cotopaxi procurando que tenga sus dos grados de libertad siguiendo la trayectoria del sol, captando la máxima radiación solar incidente

2.1.2. Diagrama Ishikawa

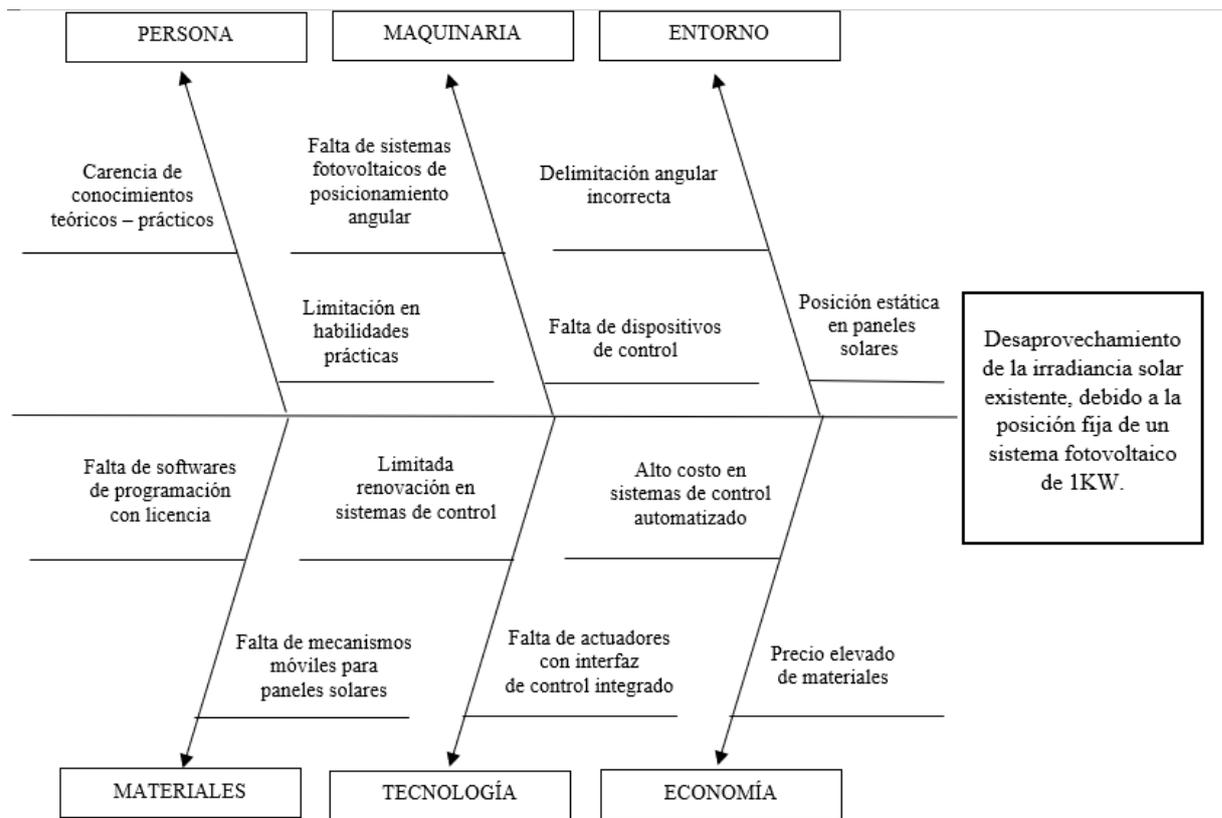


Figura 2.1: Diagrama Ishikawa

2.1.3. Formulación del problema:

Desaprovechamiento de la irradiancia solar incidente, debido a la posición fija de paneles solares en un sistema fotovoltaico de 1KW.

2.2. OBJETIVO Y CAMPO DE ACCIÓN

2.2.1. Objeto de estudio

Mecanismo de control para posicionamiento angular de 1 eje con respecto al sol.

2.2.2. Campo de acción

Los sistemas fotovoltaicos y mecanismo de control se encuentran en el campo de las Ciencias Tecnológicas donde sus principales áreas de desarrollo son: Ingeniería y Tecnología Eléctricas / Tecnología Energética.

2.3. BENEFICIARIOS

2.3.1. Beneficiarios Directos.

Se considera como beneficiarios directos de este proyecto a los usuarios, es decir:

- Universidad Técnica de Cotopaxi (Docentes - estudiantes)

2.3.2. Beneficiarios Indirectos

Investigadores a nivel nacional e internacional.

- Comunidad científica.

2.4. JUSTIFICACIÓN

La potencia de las células fotovoltaicas se puede mejorar con un seguidor solar que fuerza a la irradiancia solar a incidir perpendicularmente a la celda fotovoltaica en todo momento, se ha demostrado que se puede producir hasta un 40 % más de potencia por año utilizando un seguidor solar de elevación variable [4].

Por lo tanto, es necesario desarrollar un sistema electromecánico automatizado para optimizar el funcionamiento del sistema fotovoltaico. La movilidad del sistema se logra con un grado de libertad en respuesta al movimiento del sol sobre un área más amplia en el Este y el Oeste, captando de este modo la máxima radiación solar.

Existen sistemas de recolección de energía solar donde las celdas o paneles solares son fijas por lo que no se obtiene el máximo de energía, es decir, se pierde una parte de la energía debido al movimiento del sol respecto al planeta donde se ve afectado la irradiancia y ángulo de incidencia de la radiación solar.

Una ventaja que se tiene es la ubicación del seguidor solar como es el caso de la terraza del bloque B de la universidad Técnica de Cotopaxi sede la Matriz, ya que esta zona no cuenta con objetos que obstruyan la recepción de energía fotovoltaica como: edificios, árboles u otros objetos, además de que Ecuador por su ubicación geográfica los niveles de radiación solar son altos y este recurso solar es casi constante a lo largo del año.

2.5. HIPÓTESIS

La implementación de un sistema para control de posicionamiento angular de un eje permitirá mejorar la energía generada en el sistema fotovoltaico de 1kW.

2.6. OBJETIVOS

2.6.1. Objetivo general

Implementar un sistema de control mediante un mecanismo de seguimiento solar de un eje para mejorar la captación de la irradiancia solar en una estación fotovoltaica de 1 KW.

2.6.2. Objetivos específicos

- Investigar en fuentes bibliográficas información sobre los diferentes tipos de sistemas mecánicos y de control para el movimiento de paneles fotovoltaicos.
- Dimensionar el controlador y actuador eléctrico para el control de posicionamiento angular y establecer los requerimientos óptimos del proyecto.
- Implementar el sistema de control capaz de realizar el seguimiento solar de un eje para el sistema fotovoltaico en la Universidad Técnica de Cotopaxi.
- Realizar pruebas de funcionamiento, para verificar el aprovechamiento del sistema de control implementado.

2.7. SISTEMA DE TAREAS

Tabla 2.1: Descripción de objetivos y tareas

Objetivos específicos	Actividades	Resultados esperados	Técnicas, Medios e Instrumentos
Investigar en fuentes bibliográficas información sobre los diferentes tipos de sistemas mecánicos y de control para el movimiento de paneles fotovoltaicos.	1.- Recopilación de información acerca de los tipos de seguidores solares y sistemas de control para posicionamiento angular.	1.-Identificación de los sistemas de seguimiento solar implementados.	Artículos científicos, Tesis, Documentos, web, Libros y Biblioteca.

	2.- Reconocimiento y comparación de los tipos de seguidores solares y sistemas de control.	2.- Elección del sistema de control para la estación fotovoltaica.	
	3.- Buscar información acerca de los ángulos de elevación y azimut en la zona de implementación.	3.- Determinar los ángulos óptimos para mejorar el aprovechamiento de la irradiación solar.	
Dimensionar el controlador y actuador eléctrico para el control de posicionamiento angular y establecer los requerimientos óptimos del proyecto.	1.- Diseño y simulación de los elementos de control	1.- Planos mecánicos y eléctricos del sistema de seguimiento solar.	PC, Software Inventor Cotizaciones de proveedores
	2.- Dimensionamiento de elementos electromecánicos para el mecanismo de movimiento.	2.- Selección de los elementos para el sistema mecánico y eléctrico.	
	3.- Cotización de los materiales y equipos.	3.- Adquisición del controlador solar de un eje y actuador lineal eléctrico.	
Implementar el sistema de control capaz de realizar el seguimiento solar de un eje para el sistema fotovoltaico	1.- Montaje del actuador lineal eléctrico en la estructura mecánica del seguidor solar.	1.- Actuador lineal ensamblado en la estructura.	Fichas técnicas de los equipos Multímetro, PC Software Planos eléctricos

	2.- Conexión eléctrica de los elementos de control.	2.- Equipos eléctricos instalados acorde a los diagramas eléctricos.	y mecánicos
Realizar pruebas de funcionamiento, para verificar el aprovechamiento del sistema de control implementado.	1.- Puesta en marcha del sistema de control para posicionamiento angular.	1.- Posicionamiento angular del seguidor conforme a la carta solar de la Universidad Técnica de Cotopaxi.	Diagrama de recorrido solar software PVsyst Transportador
	2.- Registro y procesamiento de datos para la obtención de curvas de producción.	2.- Verificación de mayor producción de energía eléctrica del sistema móvil comparado con un sistema fijo	

3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

3.1. ANTECEDENTES

La tecnología de generación fotovoltaica ha llegado a un punto de desarrollo que la posiciona dentro de las fuentes eléctricas con mayor crecimiento a nivel mundial, representando un 55% de la adición total en el año 2017. La principal razón de esta tendencia se centra en las políticas gubernamentales que promueven la utilización de recursos renovables para satisfacer la creciente demanda [6].

En 2018 el mercado mundial anual de energía solar fotovoltaica aumentó ligeramente, superando los 100 GW (incluida la capacidad dentro y fuera de la red) por primera vez. La capacidad acumulada aumentó aproximadamente un 25 % hasta al menos 505 [GW]; esta se compara con un total mundial de alrededor de 15 [GW] solo una década antes. Con mayor demanda en los mercados emergentes y en Europa, debido en gran parte a las reducciones de precios en curso [7].

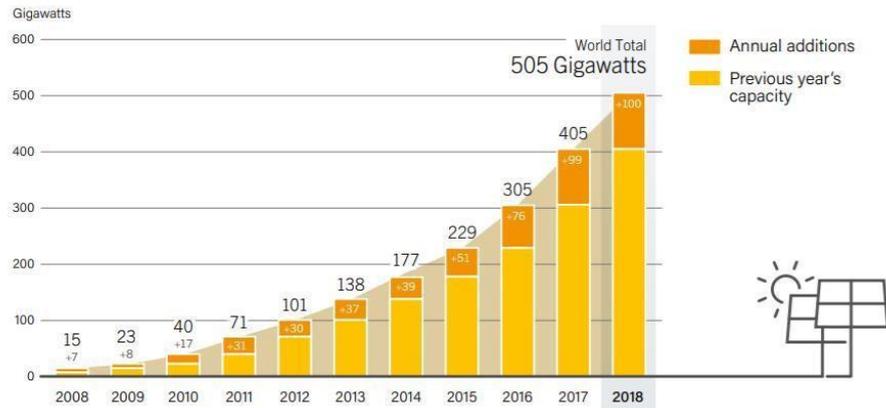


Figura 3.1: Adición de capacidad de generación fotovoltaica 2008-2018, en GW [7].

China es un claro ejemplo en el desarrollo de tecnología fotovoltaica, donde en el año 2018 instaló sistemas con capacidad de generación, de un total de 176,1 [GW], superando su meta establecida de 105 [GW] para 2020. promoviendo la disminución de los costos de manufactura, tanto por el volumen y la competitividad del mercado que centra la fabricación de paneles en Asia, los responsables del 90 % de la producción mundial. En la Figura 3.1 se puede apreciar la adición anual de capacidad instalada en paneles fotovoltaicos a nivel mundial y su evolución desde el año 2008 [7].

La tendencia en Ecuador sigue la misma línea que lo presentado a nivel global con un crecimiento notorio de las instalaciones de paneles para la generación eléctrica. La empresa de análisis de datos GlobalData trazó un escenario favorable para el crecimiento de generación solar de 15 % a lo largo de la década, lo que llevaría la generación fotovoltaica del país de sólo 26,7 MW en 2019 a 450 MW en 2030, o más de 4 gigavatios [GW] si la tasa global de crecimiento de generación solar sigue aumentando [8].

Se han puesto en marcha una serie de mecanismos para poder obtener el máximo aprovechamiento de la energía solar. El mecanismo más utilizado es mediante seguimiento solar, que optimiza la transferencia de energía del Sol a un panel solar girando el panel según la posición del Sol a comparación de un mecanismo fijo. Varios son los sistemas de seguimiento solar y estos difieren en su costo, funcionalidad y complejidad. Los dispositivos de seguimiento activos son de un solo eje y de doble eje, La diferencia principalmente de un sistema de seguimiento de doble eje es que mide tanto el eje horizontal como el eje vertical, mientras que el seguidor de un eje solo mide uno de estos [8].

En un estudio realizado en Taiwán se menciona, que la energía eléctrica de un módulo fotovoltaico se calculó teóricamente a diferentes azimuts y ángulos de inclinación en Taiwán. La ganancia del módulo montado en un panel de seguimiento de un solo eje relativa a un panel

fijo tradicional. Para simular diferentes entornos operativos, ambos tipos de la radiación se consideraron además de la radiación observada, es decir, la radiación extraterrestre y la radiación global predicha por un modelo empírico. Los resultados muestran que el ángulo de inclinación óptimo obtenido de los datos observados es más plano que los de otros dos tipos de radiación y se vuelve más plano mientras el panel se desvía del sur [9].

- **Estudios de sistemas de seguimiento solar en el Ecuador.**

Estudios llevados a cabo en Ecuador de sistemas de seguimiento solar afirman que un sistema de seguimiento solar de doble eje genera aumento en la ganancia máxima de captación media anual de un 33% y con sistema de seguimiento de un eje horizontal se obtienen una ganancia de un 28%, teniendo en cuenta que este análisis se hecho con respecto a la máxima captación de un panel fijo ubicado en cualquier zona de Ecuador [10].

Los resultados mostrados a continuación de sistemas de seguimiento analizados con software (censol 5.0) para una altitud entre 0° y -3°, que es donde se encuentra territorio ecuatoriano.

La energía solar fotovoltaica registra el mayor crecimiento de las energías renovables en el mundo, con una tasa promedio anual de crecimiento mayor al 37% (1990-2016). Para aprovechar el potencial de esta fuente inagotable de energía, los países han implementado diversos programas de fomento a la inversión privada en este tipo de proyectos.

Tabla 3.1: Captación media anual de sistema FV fijo y con seguimiento [10].

Sistema	Captación anual media
Panel solar fijo 13° de inclinación	98%
Seguimiento	
Dos ejes	133%
Eje horizontal e inclinado	128%
Eje vertical	100,01%

Se puede apreciar que el uso de sistemas de seguimiento de uno y sobre todo el de dos ejes produce un mejor aprovechamiento energético respecto a un panel fijo.

- **Sistemas de control existentes**

El objetivo es mejorar el aprovechamiento de la energía solar en paneles fotovoltaicos, mediante un seguidor solar. En [11] afirma “Como premisa de trabajo, se implementó tres seguidores, el primero con un sistema de control activo, que se retroalimenta de sensores LDR, el segundo con un sistema de control cronológico y el tercero un sistema de control híbrido, es decir, poseía

el control activo y cronológico, como uno de sus resultados se logró obtener el porcentaje de ganancia energética con respecto a un sistema fotovoltaico no móvil”, como se muestra a continuación.

Tabla 3.2: Porcentaje de aumento de voltaje para los algoritmos de seguimiento [11]

Algoritmo de seguimiento solar	Porcentaje de aumento de voltaje comparado con un panel solar de montaje fijo	
	Días soleados	Días nublados
Activo	10,0 %	7,5 %
Cronológico	8,5 %	9,0 %
Híbrido	13 %	14 %

En la tabla anterior se muestra el porcentaje de ganancia de los tres sistemas de control evaluados, donde el seguidor solar híbrido aprovecha la energía solar de forma óptima en todas las condiciones antes expuestas.

3.2. ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

La transformación de forma directa de la radiación del sol en electricidad se la conoce como energía solar fotovoltaica, esta forma de transformación se origina en unos dispositivos electrónicos denominados paneles fotovoltaicos, en los cuales su principio de funcionamiento empieza al momento en que la radiación solar excita los electrones de un dispositivo semiconductor el cual genera una mínima una diferencia de potencial [12].

Las instalaciones fotovoltaicas se caracterizan por:

- Facilidad de instalación.
- Costos accesibles.
- Vida útil superior a los 30 años.
- Energía respetuosa con el medio ambiente.
- Tienen un funcionamiento sin contaminación acústica.

3.2.1. Efecto fotoeléctrico

El efecto fotoeléctrico o también denominado efecto fotovoltaico es aquel que permite producir una corriente eléctrica entre dos piezas de materiales distintos los cuales se encuentran en contacto y expuestas a una radiación electromagnética. El efecto fotoeléctrico tiene inicio en el

momento en el que un fotón golpea un electrón de la capa final de la órbita de un átomo. Si la energía adquirida por el electrón supera la fuerza de atracción del núcleo del átomo (silicio), este se desprende de la órbita y queda en total libertad. Al quedar libre, el electrón es capaz de viajar a través del material semiconductor por medio de un circuito externo formando una corriente continua como se observa en la figura 3.2 [13].

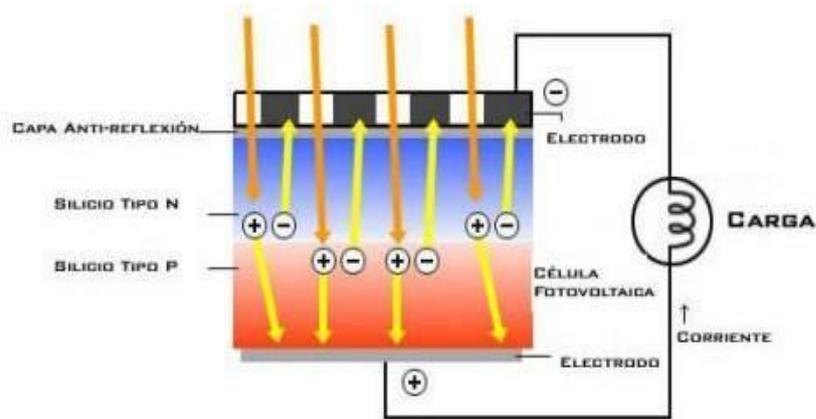


Figura 3.2: Carga de una célula fotovoltaica [13]

Las ventajas de utilizar energía solar fotovoltaica se enlistan a continuación:

- Son simples, fáciles de instalar, versátiles y su implementación se puede realizar en cualquier tamaño y situar en cualquier lugar.
- La potencia de instalación se puede aumentar o disminuir fácilmente según sea la necesidad y al mismo tiempo adquiere un costo de energía nulo.
- Bajo riesgo de falla y de mantenimiento, esta es una tecnología en rápida evolución y que tiende a reducir costos y mejorar el rendimiento [13].

3.3. PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS

Los paneles solares o también denominados módulos solares son dispositivos formados por un conjunto de celdas solares interconectadas en serie que tienen la finalidad de convertir la energía del sol en electricidad [14].

Los paneles solares fotovoltaicos se clasifican según sus tipos de células de la siguiente manera:

3.3.1. Monocristalinos

Tienen una eficiencia mayor que los policristalinos. Su rendimiento de laboratorio es cercano al 24%, y su rendimiento comercial oscila entre 17 y 20%. Este es un factor importante cuando no disponemos de mucha superficie para instalar paneles, ya que así podemos conseguir mayor potencia con el mismo espacio [14].

3.3.2. Policristalinos

Tienen un rendimiento de laboratorio cercano al 19%, y su rendimiento comercial oscila entre 13 y 15%. A pesar de tener un rendimiento menor. Los paneles policristalinos tienen un menor precio que los monocristalinos y un mejor comportamiento a altas temperaturas, con lo que bajo estas condiciones pueden generar más energía que el resto de los paneles [14].

3.3.3. De capa fina (Amorfos)

Tienen un rendimiento de laboratorio cercano al 13%, y su rendimiento comercial oscila entre el 7 y el 9%. Una de sus principales ventajas, es que a pesar de necesitar mayor espacio para generar la misma energía que los paneles policristalinos y monocristalinos, su precio es mucho menor. Además, tienen un buen comportamiento a temperaturas altas [14].

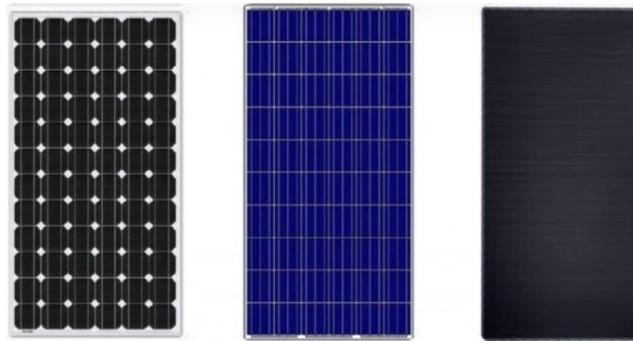


Figura 3.3: Panel monocristalino, policristalino y de capa fina [14].

3.4. ANÁLISIS SOLAR DEL ECUADOR

Ubicado en la mitad del mundo, Ecuador tiene un gran potencial de energía solar disponible. Su uso constante en la actualidad ayudaría a conseguir la independencia energética a largo plazo, por tal motivo es necesario que el país haya contado previamente con un mapa solar con cuantificación de este recurso, previo a proponer un proyecto de inversión e investigación que beneficie al país [15].

3.4.1. El recurso solar en el ecuador

La energía solar es producida por el proceso de fusión nuclear que tiene lugar bajo el sol. Esta energía es el principal motor que mueve nuestro medio ambiente, siendo la energía solar la que llega a la superficie de la tierra 10.000 veces mayor a la total consumida por la humanidad. La radiación es la transferencia de energía por ondas electromagnéticas, la cual se genera directamente desde la fuente hacia el exterior en todas las direcciones. Estas ondas no requieren de un medio material para expandirse cuando se difunden, pueden atravesar el espacio interplanetario y llegar a la Tierra desde el Sol. La longitud de onda y la frecuencia de las ondas

electromagnéticas se propagan en el vacío a una velocidad de 299.792 km/s. El conjunto de longitudes de onda emitidas por el sol se denomina espectro solar [16].

La radiación emitida de forma directa por el sol puede ser medida mediante un pirheliómetro. En el empleo de obturadores, solo se mide la radiación que proviene del sol y de una región anular del cielo muy cercana al astro. Este último cubre un ancho medio de 2.5° en los equipos modernos tomando como punto de partida el centro del sol.

La energía emitida por el sol se puede convertir en dos formas principales de energía disponible. La energía térmica (calor) y energía eléctrica. Cuando la radiación solar se convierte en energía térmica, se usa comúnmente para obtener agua caliente por lo general en edificios y residencias, para lograr aquel objetivo se necesita de un dispositivo denominado colector, elemento electrónico el cual permite absorber la radiación solar y transferirla a un fluido en cuyo proceso de circulación se utilizan bombas y ventiladores, los colectores más comunes son los de placa plana que se han utilizado durante más de 100 años y sirve para alcanzar una temperatura de hasta los 90° [16].

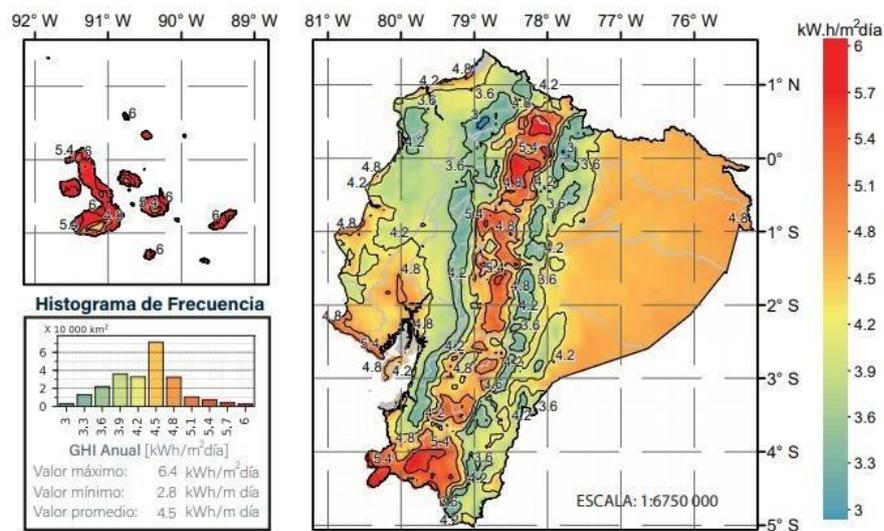


Figura 3.4: Radiación solar global horizontal del ARCONEL[16]

3.4.2. Trayectoria orientada al sol

La posición del Sol o de su órbita con respecto a una determinada latitud en el espacio y el tiempo es la distancia entre cualquier punto y el ecuador, medida sobre el meridiano que pasa por ese punto. Al momento de delimitar la posición del sol se necesita conocer las siguientes magnitudes [17]:

- **Orientación (α)**

Es el ángulo entre la superficie y la línea que marca el sur geográfico. Conocido como Azimut.

- **Inclinación (β)**

Ángulo entre la superficie de interés y la horizontal.

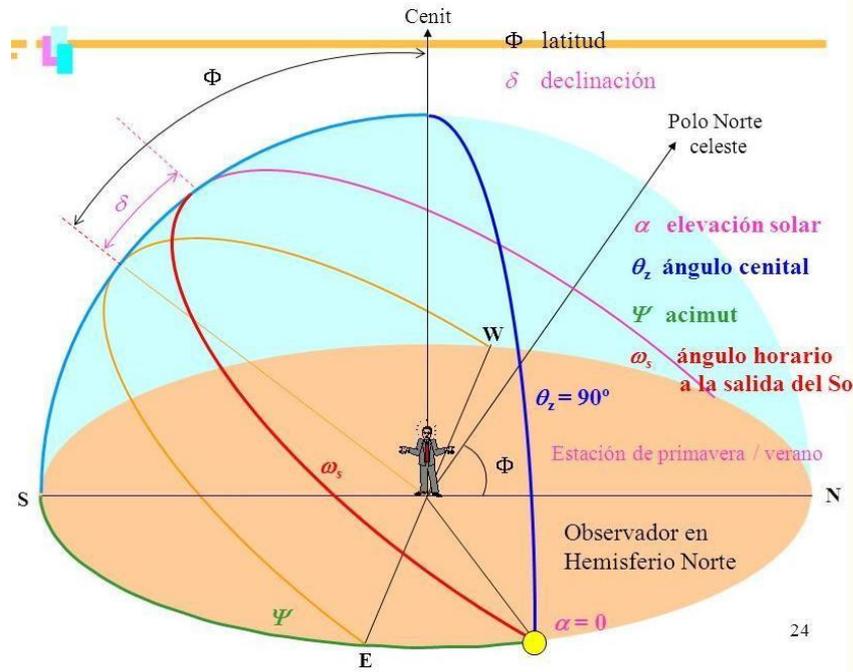


Figura 3.5: Coordenadas celestes horarias [17].

- **Declinación solar (δ_S)**

Posición angular del Sol al mediodía solar con respecto al plano del Ecuador terrestre.

Latitud (ϕ)

Ángulo entre el punto en cual se colocará la placa y el Ecuador.

- **Ángulo horario solar (WS)**

Desplazamiento angular del sol sobre el plano de la trayectoria solar, tomando como origen de este ángulo horario el mediodía solar y valores crecientes en el sentido del movimiento del sol, donde cada hora equivale a 15° [17].

- **Altura solar (hS)**

Es el ángulo que se forma entre la radiación directa y el plano del horizonte, y donde el complementario de este ángulo se llama ángulo cenital solar.

- **Altura solar (aS)**

Es aquel ángulo que forma la radiación directa y el meridiano del observador en sentido horario observando el norte desde el sur del lugar (en el hemisferio norte) [17].

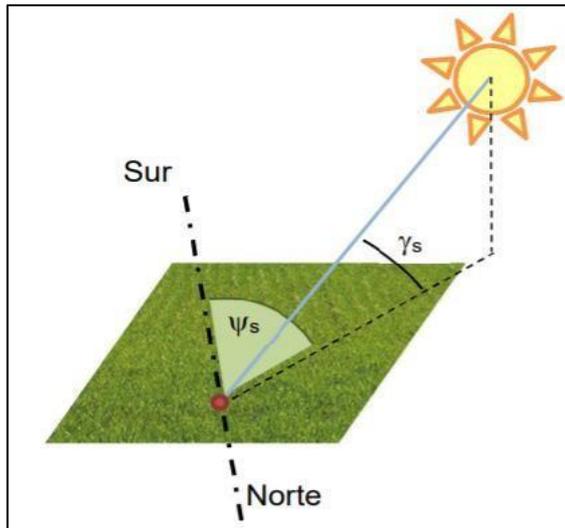


Figura 3.6: Ángulos de posición [17].

- **Altitud Solar (γ_s)**

Representa la elevación del Sol visualizada desde el punto de la instalación.

- **Azimut Solar o Azimut (ψ_s)**

Es el ángulo entre la línea que une el punto de instalación con el Sol y el Sur geográfico.

3.4.3. Posicionamiento Terrestre

- **Longitud**

La longitud es la distancia entre un punto cualquiera y el meridiano de Greenwich, estimada a lo largo de una línea igual que pasa por ese punto [18].

- **Latitud**

Se denomina alcance a la distancia en grados, minutos y segundos, que partiendo de la línea del ecuador (0°), se puede encontrar al norte y al sur [18].

3.4.4. Movimientos de la Tierra

En la tierra se conocen dos movimientos principales a los que está expuesta la tierra y son los siguientes:

- **Rotación**

Este desarrollo se produce sobre el propio eje de la Tierra, esto demuestra que la Tierra está pivotando alrededor de su eje por lo que girará en dirección oeste-este en un curso contrario a las agujas del reloj en una temporada determinada de 24 horas (como un reloj de 56 minutos) [19].

- **Traslación**

Este desarrollo se produce alrededor del Sol, creado por el campo gravitatorio producido por el

propio Sol, este desarrollo se termina en unos 365 días, 5 horas y 57 minutos, comparable a 365,2422 días, es el tiempo terrestre.

Nuestro planeta sigue una dirección curva, por lo que la Tierra, en general, se acercará o alejará del Sol en determinadas estaciones, dando lugar a las estaciones que definitivamente conocemos [19].

3.4.5. Zona Geoastronómica de la Tierra

La zona geoastronómica o zona latitudinal alude a toda área que compone la capa exterior de la Tierra, contingente a su alcance, como se muestra en la figura 3.7. que muestra ocasiones y peculiaridades físicas y orgánicas en todos los locales galácticos de la tierra [20].

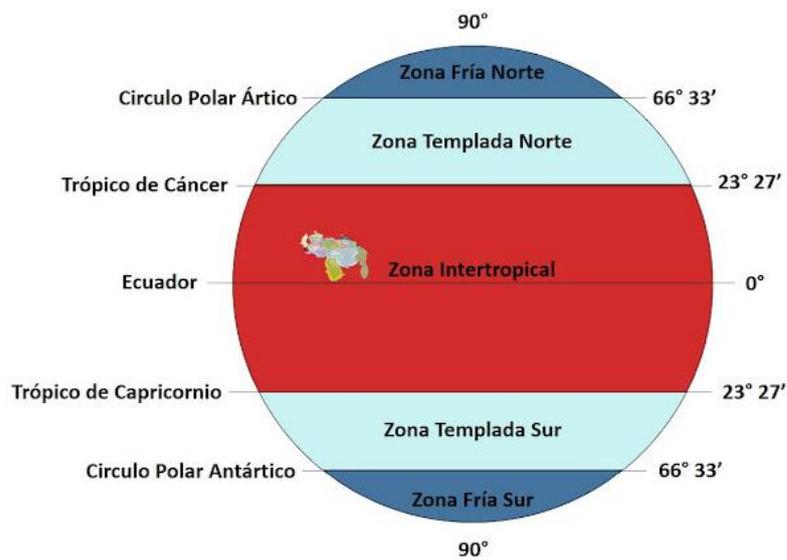


Figura 3.7: Zona geoastronómica de la tierra [20].

Dado que el Ecuador está situado en la latitud 0, es decir, está situado en el ecuador de la tierra, la radiación solar obtenida es mucho mayor que en el norte y el sur, ya que la tierra tiene un punto de tendencia por lo que la radiación orientada al sol es un similar en el tiempo, permitiendo altas convergencias de la radiación basada en el sol en el distrito tropical [20].

3.4.6. Coordenadas Celestes

Los lugares singulares del arco celeste o mitad del globo serán el punto más alto o pico más notable (el nadir sería el punto contrario) y el plano de la línea del horizonte con las rúbricas clave (Norte, Sur, Este y Oeste).

Las coordenadas celestes permiten encontrar cualquier punto en el lado del ecuador, fijando esencialmente en su elevación h sobre el plano de la línea del horizonte y su desplazamiento azimutal Z o azimutal relativo al este o al oeste frente al sur [21].

La figura 3.6 muestra los focos extraordinarios en la mitad celeste del globo correspondiente al

plano junto a sus lugares principales [21].

3.4.7. Tablas de Valores de Posición de la Tierra

En la tabla 3.3. Se muestran los datos obtenidos en el mes del 20 de marzo del 2022 en donde encontramos las horas desde las 6:18 am hasta las 18:25 pm mostrándonos los datos de la altitud y los ángulos acimutales, donde existe poca variación en el ángulo azimutal.

Tabla 3.3: Datos del 20 de marzo del 2022 [24].

Fecha:	20/03/2022 GMT-5	
coordinar:	-0.9174265, -78.6331631	
ubicación:	-0.91742650,-78.63316310	
hora	Elevación	Azimut
06:18:41	-0.833°	90.08°
7:00:00	9.49°	89.9°
8:00:00	24.49°	89.62°
9:00:00	39.49°	89.27°
10:00:00	54.49°	88.72°
11:00:00	69.49°	87.51°
12:00:00	84.43°	80.25°
13:00:00	80.44°	275.73°
14:00:00	65.47°	272.16°
15:00:00	50.47°	271.23°
16:00:00	35.47°	270.77°
17:00:00	20.47°	270.46°
18:00:00	5.47°	270.22°
18:25:12	-0.833°	270.12°

En la tabla 3.4. Se muestran los datos obtenidos en el mes del 23 de septiembre del 2022 en donde se identifican las horas desde las 6:03 am hasta las 18:10 pm mostrándonos los datos de la altitud y los ángulos acimutales.

Tabla 3.4: Datos del 23 de septiembre del 2022 [24]

Fecha:	23/09/2022 GMT-5	
coordinar:	-0.9174265, -78.6331631	
ubicación:	-0.91742650,-78.63316310	
hora	Elevación	Azimut
06:03:35	-0.833°	90.18°
7:00:00	13.27°	89.97°
8:00:00	28.27°	89.73°
9:00:00	43.27°	89.43°
10:00:00	58.27°	88.95°
11:00:00	73.27°	87.8°
12:00:00	88.17°	69.06°
13:00:00	76.69°	272.67°
14:00:00	61.7°	271.08°
15:00:00	46.7°	270.52°
16:00:00	31.7°	270.18°
17:00:00	16.7°	269.92°
18:00:00	1.7°	269.67°
18:10:07	-0.833°	269.62°

3.5. RADIACIÓN SOLAR

La radiación solar es la energía emitida por el sol, que se propaga mediante ondas electromagnéticas en todas las direcciones del espacio. Esta energía es el motor que determina la dinámica de los procesos de la atmósfera y el clima. La energía solar es radiación electromagnética generada por reacciones de hidrógeno en el núcleo del Sol por fusión nuclear y emitida desde la superficie del Sol. [25].

La energía solar viene en forma de radiación electromagnética o luz. La radiación electromagnética es una onda producida por la oscilación o aceleración de una carga eléctrica. Las ondas electromagnéticas no necesitan un medio material para propagarse, por lo que estas ondas pueden viajar a través del espacio interplanetario e interestelar y llegar a la Tierra desde el Sol y las estrellas como se observa en la siguiente figura 3.8

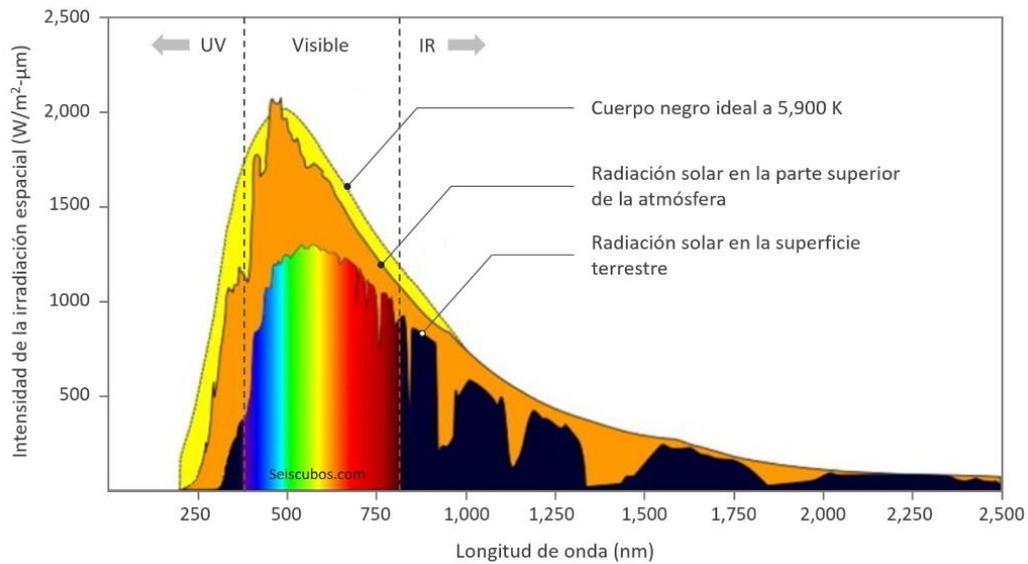


Figura 3.8: Espectro electromagnético de la radiación solar [25].

3.5.1. Radiación solar en el Ecuador (Cotopaxi-Latacunga)

Ecuador tiene un alto nivel de radiación solar, pero su participación en la satisfacción de las necesidades energéticas nacionales es muy poca, por lo que el país pierde la oportunidad de convertir la energía solar en una tercera fuente de energía, después del petróleo y la hidroeléctrica. Ecuador está ubicado en la mitad del mundo y tiene un enorme potencial para explotar la energía solar; Su uso puede conducir incluso a la independencia energética a largo plazo, por lo que el país necesita tener un mapa solar con una cuantificación de este recurso, antes de proponer un proyecto de investigación e inversión beneficioso para el país [26].

Por lo tanto, la radiación solar es un grupo de ondas electromagnéticas emitidas por el sol hacia el espacio. Analizando el espectro electromagnético, la radiación solar incluye la reducción entre ondas ultravioletas e infrarrojos. Para entender más fácilmente este tema, es necesario enfatizar los conceptos, principios básicos y unidades de medida [26]:

- **Irradiancia solar:** Es la energía incidente por unidad de tiempo (potencia) por unidad de área.
- **Radiación solar:** También conocida como radiación, es la energía incidente por unidad de superficie.

Si la radiación solar se combina durante un período de tiempo, puede expresarse como:

- **Insolación:** Es la cantidad total de radiación solar (directa y reflejada) recibida en un punto dado del planeta, en la superficie 1, para un ángulo de inclinación dado, entre la superficie receptora y el cuadrado horizontal.

En general, es concebible que la distribución global de la irradiación en la Tierra no es uniforme,

siendo de mayor intensidad en la zona Ecuatorial [26].

3.5.2. Tipos de radiación solar

- **Radiación directa:** Se generan cuando una serie de rayos atraviesan la atmósfera y llegan a la superficie terrestre de una manera directa sin ningún tipo de obstrucción. La radiación solar directa se mide con un pirheliómetro. "Usando los obturadores, solo se mide la radiación del sol y la región anular del cielo muy cerca de la estrella. En los instrumentos modernos, esta última cubre un medio ángulo de aproximadamente 2,5 grados desde el centro del sol" [27].
- **Radiación difusa:** Atraviesa la atmósfera, se refleja en nubes de partículas de polvo atmosférico y puede ser absorbido por las nubes y cambiar su órbita. El instrumento necesario para medir la radiación solar difusa y global es el piranómetro. Para medir el componente de radiación solar generalizado, el componente directo está cubierto por una pantalla o sistema sombreado [27].
- **Radiación reflejada:** Se presenta al momento que parte de los rayos emitidos por el sol que atraviesa la atmósfera terrestre, se refleja en las nubes, montañas entre otros se conoce como la suma de las tres [27].

Como se aprecia en la figura 3.9 la radiación que se recibe en los paneles se clasifica en diferentes tipos que se necesitan para la transformación eléctrica.

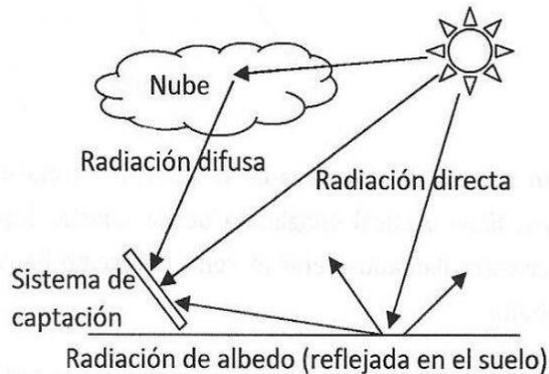


Figura 3.9: Trayectoria de los rayos solares [27].

3.6. SEGUIDORES SOLARES

Son mecanismos que siguen el camino del sol durante todo el año en un ciclo diario desde el amanecer hasta el atardecer. Este sistema de seguimiento solar aumenta la potencia de salida de una instalación solar fotovoltaica moviendo los paneles solares en la trayectoria del sol durante el día, mejorando el ángulo en el que los paneles reciben la radiación solar. Los

seguidores solares aumentan considerablemente la recolección de energía. Existen dos tipos en el mercado, dependiendo de su grado de libertad. En general, los grados de libertad del mecanismo corresponden al número de parámetros de entrada que deben controlarse de forma independiente. También llamado par giratorio [28].

3.6.1. Función de los Seguidores Solares

Los seguidores solares son dispositivos mecánicos cuya función principal es la de posicionar los paneles solares de manera que alcancen siempre la máxima perpendicularidad, siguiendo al sol de este a oeste [29].

3.6.2. Modelos de Seguidores Solares

Dependiendo del tipo de planta de luz solar que se introduzca, fluctúa en los puntos de vista que se muestran en la tabla 3.5 [30].

- **Azimutal:** Para un seguidor de cubo solitario con inclinación este-oeste montado en un poste solitario, donde los cargadores de luz solar se mueven con menos de 180° de revolución.
- **Polar:** También se utiliza en un cubo similar cuando el establecimiento está en un ámbito similar al sitio del establecimiento y apuntando hacia el sur con un punto de giro de menos de 180°.
- **Horizontal:** Seguidor mono pivotante orientado al sol con un marco de tablero este-oeste en el que se montan los cargadores alimentados por el sol.
- **Monoposte:** Compuesto por dos ejes, el mono pivote está enfocado y tiene un giro de 360°.
- **Carrusel:** Formado por dos ejes y unos soportes a lo largo de una superficie redonda, tiene un punto de giro de 360° [30].

Tabla 3.5: Rendimiento solar y capacidad de giro [30].

Modelos de Seguidores	Aumento del Rendimiento	Capacidad de Giro
Polar	De 10 a 20 %	Menos de 180°
Azimutal	Hasta el 25 %	Menos de 180°
Horizontal	De 10 a 20 %	Menos de 180°
Monoposte	De 30 a 45 %	Total de 360°
Carrusel	De 30 a 45 %	Total de 360°

3.6.3. Tipos de seguidores

Un seguidor solar es un dispositivo equipado sobre el cual se anclan los paneles solares registran el seguimiento del sol y, por lo tanto, se intenta maximizar la conversión del recurso energético solar en energía fotovoltaica. Existen varios tipos los cuales se detallan en la siguiente figura [31]:

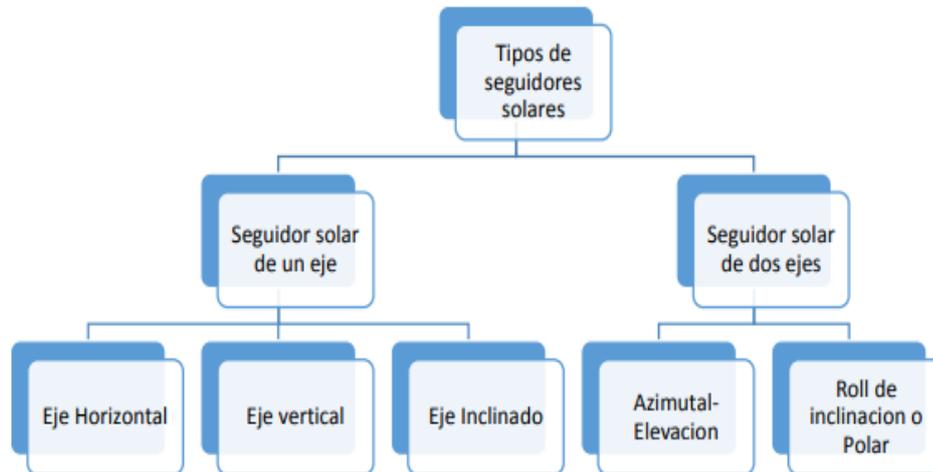


Figura 3.10: Clasificación de los seguidores solares [31].

- **Seguidor solar de un eje**

El seguidor solar de un solo eje tiene eje horizontal o vertical. El tipo horizontal se usa en los trópicos donde el sol se pone al mediodía, pero los días son cortos. El tipo vertical se usa en latitudes altas (Reino Unido) donde el sol no brilla muy alto, pero los días de verano pueden ser muy largos. Tienen un ángulo de inclinación ajustable manualmente de 0 a 45 grados y seguimiento automático del sol de este a oeste. Utilizan el propio módulo fotovoltaico como sensor de luz para evitar movimientos innecesarios en el seguimiento y garantizar la fiabilidad. Por la noche, los seguidores ocupan una posición horizontal. Este tipo de rastreador funciona mejor en latitudes tropicales, donde el sol está más alto o bajo al mediodía. Debido al movimiento anual de la tierra, el sol también se mueve hacia el sur dependiendo de la estación y debido a este sentido, la eficiencia del eje norte se reduce, ya que el seguidor de un solo eje solo controla el movimiento del Sol de este a oeste. En días nublados, la eficiencia de un seguidor de un solo eje es casi tan buena como la de un panel fijo como se observa en la figura 3.11 [31].

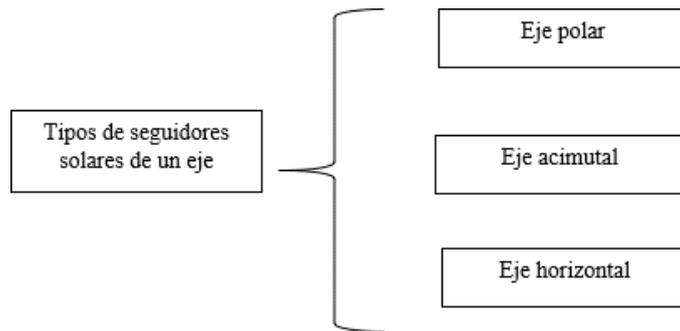


Figura 3.11: Clasificación de los seguidores de un solo eje [31].

- **Seguidor de doble eje**

En un sistema de seguimiento de dos ejes, los rayos del sol se capturan al máximo siguiendo el movimiento del sol en cuatro direcciones diferentes. Un seguidor solar de doble eje rastrea la posición angular del sol en el cielo, así como su movimiento este-oeste. El seguidor solar de doble eje tiene ejes horizontales y verticales y, por lo tanto, puede seguir el movimiento aparente del Sol precisamente en cualquier parte del mundo. Este tipo de sistema se usa para controlar telescopios astronómicos, por lo tanto, hay muchos programas disponibles para predecir y controlar automáticamente el movimiento del Sol en el cielo. A medida que el sol se mueve hacia el norte, el rastreador debe seguir la trayectoria del sol en sentido contrario a las agujas del reloj a lo largo del eje horizontal (de este a oeste). Si el sol se mueve hacia el sur, el rastreador debe seguir la trayectoria del sol en el sentido de las agujas del reloj, el seguidor solar de doble eje rastrea el sol en ambas direcciones, es decir, este, oeste, norte y sur para la producción de energía adicional (40% de aumento) y comodidad [31].

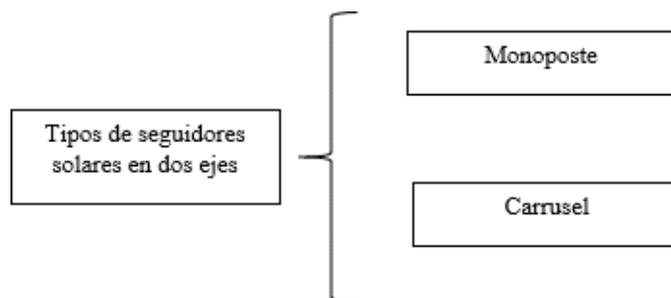


Figura 3.12: Clasificación de seguidores de dos ejes [31].

3.6.4. Tipos de Seguimiento Solar

El seguimiento solar se puede realizar por tres métodos que se mencionan a continuación:

- **Seguimiento por Reloj Solar**

Este tipo de monitoreo incluye una unidad de tiempo de 24 horas, por lo que puede realizar un seguimiento más efectivo durante 12 horas, lo que significa que cambia de posición de acuerdo con el movimiento del tiempo en el reloj [32].

- **Seguimiento por Sensor de Luz**

Este tipo de monitoreo se basa principalmente en la cantidad de luz que ingresa al sensor, el cual cambia el valor de la resistencia para que cambie de posición durante el día hasta encontrar un ángulo de incidencia perpendicular a la superficie [32]

- **Seguimiento Mediante Coordenadas Calculadas**

Este seguimiento se realiza examinando previamente el círculo solar y realizando estimaciones de la dirección cósmica sin radiación solar ni obstrucción de nubes, ya que el cálculo garantiza que se mueve según la información predefinida, obteniendo así una dirección establecida [32].

3.6.5. Mecanismos según el grado de libertad

Hay diferentes combinaciones de mecanismos con dos grados de libertad que permite, mantener una superficie alineada en todo momento con el Sol. Dentro de los mecanismos para seguidores solares, hay dos tipos predominantes [33].

- **Tipo giroscopio**

Donde el centro de gravedad de las placas permanece inmóvil. Su movimiento es equivalente a una rótula de dos ejes perpendiculares.

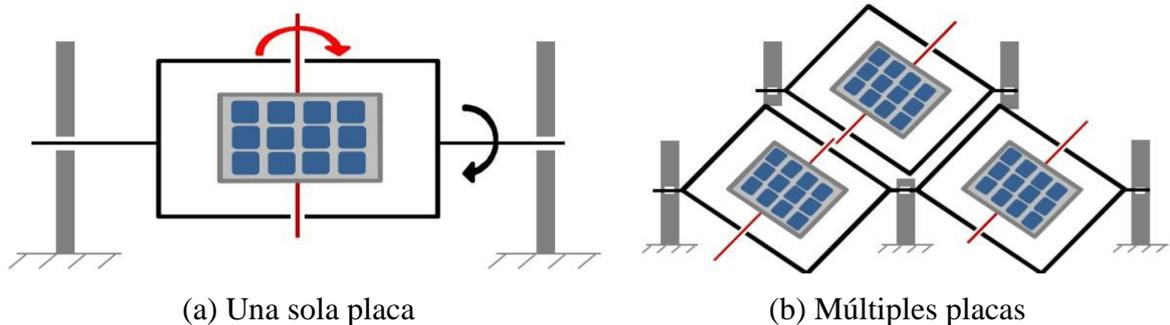


Figura 3.13: Mecanismo giroscopios [33].

Este tipo de seguidor es más fácil de controlar mediante sensores fotosensibles. Tiene la ventaja de poder girar a una disposición inicial de 45° para reducir las sombras mutuas si se llega a instalar seguidores en conjunto.

Se tiene el inconveniente de que los actuadores necesitan un aporte de energía constante para mantener la posición de la placa [33].

- **Tipo heliostato**

El conjunto de placas se monta sobre una estructura de inclinación variable. Y esta es apoyada en un poste en forma de T.

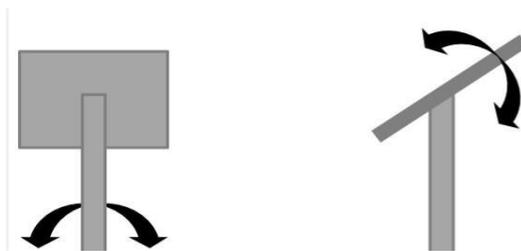


Figura 3.14: Mecanismo heliostato [33].

Las flechas señalan los grados de libertad. Este tipo de mecanismo suele requerir de anclajes mayores a los anteriores. También requieren del aporte de energía continua para mantener su posición. Pero, su control se puede realizar implementando las ecuaciones de movimiento solar, lo que lo hace más sencillo [33].

3.6.6. Seguidores Solares Disponibles en la Industria

Actualmente existen en el mercado varios marcos de control con observación basada en la luz solar, como se muestra en la tabla 3.6. Todos muestran una pauta de actividad similar, mostrando similitudes en el plan y el plan mecánico del marco de dirección (tornillos de potencia, marcos accionados por presión, tornillos sin fin, actuador entre otros), así como en el tipo de diseño utilizado (carcasa cilíndrica) [34].

Tabla 3.6: Seguidores disponibles en el mercado [34].

TIPO	DESCRIPCIÓN	CARACTERÍSTICAS
<p>WATTSUN</p> 	<p>El AZ-225 Capacidad para más de 8 módulos por seguidor. Diseño robusto Sistema de engranajes de tracción inteligente. Ofrece una ganancia de energía de más del 33% con respecto a los sistemas de inclinación fija.</p>	<p>Potencia: 4 kW Movimiento: 2 ejes (azimut), (elevación) 5° a 75° Engranajes: de tracción inteligente y actuadores lineales. Precio: \$ 6,250 USD</p>
<p>ALIBABA</p> 	<p>Seguidor solar de doble eje Precio más rentable. Alta precisión de seguimiento menor de 0,25 ° Bajo consumo de energía del sistema, Consumo de potencia menor que 0.02w diarios. Incremento de energía entre el 30 y 35 % [34].</p>	<p>Ejes de Seguimiento: 2 Horizontal: 0° a 270° Elevación: 0° a 120°. Potencia admitida: 4KW Tecnología de Seguimiento: cronometrado Precio: \$1,850 USD</p>

<p>LORENTZ ETATRACK ACTIVE 600</p> 	<p>Aumentos de rendimiento de hasta un 40 % de los módulos fotovoltaicos. Siguen al sol durante el día, Aumento del tiempo con mayores niveles de potencia útil entregada [34].</p>	<p>Ejes de Seguimiento: 1 eje único. Potencia admitida en Seguidor: Hasta 2.9 kW Segundo eje de regulación manual paso a paso: 0 - 45 ° Seguimiento de ángulo de Este - Oeste: 90 ° Tecnología de Seguimiento: Programación astronómica Precio: \$10,746 USD</p>
<p>BIO 1</p> 	<p>Seguidor solar de 2 ejes. Fácil de programar y cambiar los parámetros. Fácil manejo e instalación. Control del viento mediante un anemómetro [34].</p>	<p>Ejes de Seguimiento: 2 EJES: Horizontal y Vertical Potencia: Hasta 1.56 kW Altura: 3m Tecnología de Seguimiento: Programación astronómica Precio: \$ 11,730 USD.</p>
<p>Single-Axis horizontal</p> 	<p>Apto para todo tipo de modulo Mayor flexibilidad en el terreno Mayor fiabilidad y control Seguimiento automático [34].</p>	<p>Ejes de Seguimiento: 1 EJES: Horizontal Potencia: 2 kW A 7 kW Altura: 3m Tecnología de Seguimiento: +45°, - 45° Precio: \$ 800 USD</p>

3.6.7. Elementos que Conforman un Sistema de Seguidor Fotovoltaico

- El módulo fotovoltaico es el encargado de obtener la energía orientada al sol y convertirla en energía.
- El regulador de carga o el controlador de carga alimentado por el sol está situado entre las placas y la batería y es responsable de controlar la tensión y el ritmo de carga de la batería.
- Las baterías se encargan de almacenar la energía suministrada por los cargadores solares, cargándola y liberándola constantemente.
- El inversor es responsable de cambiar la corriente continua (DC) a corriente alterna

(AC) para la correcta actividad de los dispositivos domésticos actuales (TV, microondas, secadoras, lavadoras de ropa, etc.).

- Los marcos de posicionamiento global basados en el sol son los instrumentos responsables del uso más extremo de la energía solar, pueden ser mecánicos o a presión dependiendo de la disposición del marco [35].

3.7. FACTORES QUE AFECTA AL SISTEMA FOTOVOLTAICO

- **Luz incidente**

Dado que la luz incidente tiene diferentes longitudes de onda, alrededor del 50% de la radiación recibida no cae dentro del rango aceptable por los paneles solares comerciales, por otro lado, la corriente es proporcional a la radiación incidente y es absorbida por los paneles solares. Bajo nivel de aceptación. La energía radiada hace que la corriente baje [36].

- **Reflexión**

La reflexión ocurre cuando la luz golpea algo y luego rebota o se refleja, total o parcialmente, en ese objeto. Este tipo de atenuación se produce en la superficie del panel debido a la reflexión de los rayos incidentes, lo que nos indica que la potencia de salida del equipo es directamente proporcional al nivel de radiación solar. [36].

- **Efecto de orientación e inclinación**

La inclinación de los paneles solares es un factor clave a la hora de mejorar la captación de energía solar en una instalación fotovoltaica. Determinar el ángulo de latitud correcto donde se ubica un sistema fotovoltaico es uno de los primeros pasos que debemos tomar con cualquier diseño fotovoltaico. Los paneles solares funcionan mejor cuando se enfrentan directamente al sol, es decir, se encuentran perpendiculares al sol, en instalaciones fijas, los paneles solares no se pueden dejar perpendiculares al sol para perder los elementos. [36].

- **Pérdida por sombra**

Los paneles solares funcionan mejor cuando se enfrentan directamente al sol, es decir, se encuentran perpendiculares al sol, en instalaciones fijas, los paneles solares no se pueden dejar perpendiculares al sol para perder los elementos. Dependiendo de la unidad de inclinación y azimut, las pérdidas por sombras se determinan trazando las obstrucciones que afectan a los paneles en un mapa solar del sitio, para calcular el perfil de obstrucción que interfiere con el sol. La representación de la sección transversal del obstáculo en el gráfico solar, como se muestra en la Fig. 3.15, permite calcular la pérdida de radiación solar debido al efecto de las

sombras. Para el cálculo de estas pérdidas, la contribución de las partes parcial o totalmente oscurecidas por el sol debe tener un obstáculo adicional, en el caso de una parte parcialmente oscurecida se utilizará un factor de relleno correspondiente a una parte estimada del total. y debe estar lo más cerca posible de valores como: 0.25, 0.5, 0.75 ,1.

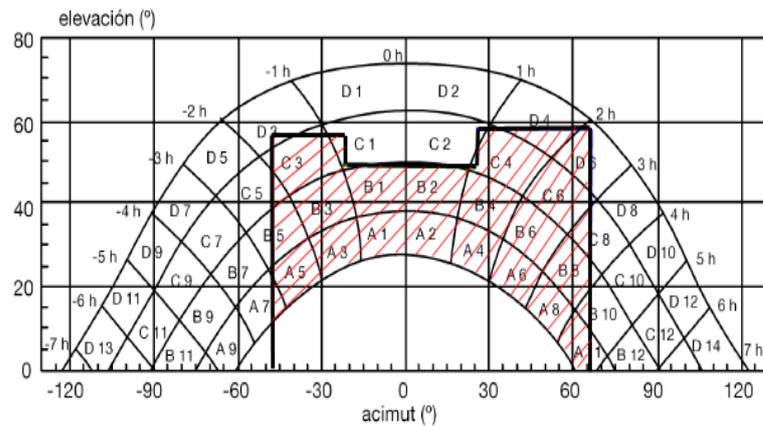


Figura 3.15: Perfil de obstáculos [36].

3.8. GRADOS DE LIBERTAD

Por grados de libertad nos referimos al número de entradas independientes necesarias para determinar la posición de todos los eslabones de la estructura en relación con la Tierra en un momento dado. En muchos casos, la movilidad del mecanismo puede conocerse a partir del número de enlaces y del número y tipo de pares que enlaza. El criterio de Grübler para mecanismos planos define la Ecuación (3.1). [37].

$$M = 3 * (L - 1) - 2(J1 - J2) \quad (3.1)$$

Donde:

M = Grados de libertad

L = Número de eslabones

$J1$ = Número de juntas

$J2$ = Número de semijuntas

3.9. MECANISMO Y MOVIMIENTO

3.9.1. Actuador Lineal Eléctrico

Un actuador lineal es un tipo de actuador que convierte el movimiento giratorio de un motor en un movimiento lineal o de empuje/tracción. Los actuadores lineales son ideales para todo tipo de aplicaciones que requieren potencia para inclinar, levantar, tirar o empujar. Los actuadores

lineales eléctricos son la solución perfecta para aplicaciones que requieren un movimiento simple, seguro y limpio con un control de movimiento extremadamente suave. Los beneficios principales de un actuador lineal eléctrico son los siguientes [38]:

- Incrementan la eficiencia
- Movimiento de precisión
- Ideal para ambientes hostiles
- Baja vibración y nivel sonoro
- Variedad de opciones de control

Los actuadores lineales eléctricos no requieren tuberías, aceite ni válvulas, no requieren mantenimiento y crean un entorno seguro para el usuario. Los actuadores eléctricos de alta calidad pasan numerosas pruebas y pruebas que les obligan a funcionar en condiciones extremas para garantizar un rendimiento óptimo en todo momento y en todas las situaciones. También está diseñado, junto con sus accesorios, para ensamblar e instalar fácilmente en muchas aplicaciones diferentes [38].



Figura 3.16: Actuador lineal eléctrico 500 kg [38].

3.9.2. Seguidor solar según el tipo de algoritmo de seguimiento

- **Según la luminosidad**

El algoritmo de este tipo de seguidor basa su funcionamiento en la señal entregada por uno o varios sensores dependiendo de dicha señal se envía un comando de control a uno o varios motores para que se posicionen en el punto más adecuado de luminosidad. Este tipo de seguimiento resulta ser de fácil implementación [39].

- **Con programación astronómica**

Este tipo de seguidor presenta una total independencia de las condiciones climáticas ya que su algoritmo no requiere de sensores que indiquen cuál es el punto más luminoso. El seguimiento en este caso depende únicamente de una serie de ecuaciones que predicen la ubicación del Sol en cualquier momento. aunque este tipo de seguidor resulta ser de gran precisión cabe mencionar que la implementación del algoritmo representa un alto grado de complejidad [39].

Tabla 3.7: Ventajas y desventajas según el algoritmo de seguimiento [39].

Según el algoritmo de seguimiento	Ventajas	Desventajas
Por punto luminoso	<ul style="list-style-type: none"> • Fácil implementación del algoritmo de seguimiento 	<ul style="list-style-type: none"> • Poca fiabilidad • En condiciones climáticas no favorables presenta errores de posicionamiento. • Mantenimiento constante de los sensores.
Con programación astronómica	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor fiabilidad. • Independencia de condiciones climáticas. • Mantenimiento menos riguroso 	<ul style="list-style-type: none"> • Implementación compleja

De los seguidores planteados anteriormente se nota que los seguidores por punto luminoso son más fáciles de implementar, pero presentan una desventaja al ser poco fiables, por otra parte, los de tipo de programación astronómica dan mayor fiabilidad a pesar de presentar dificultad para su instalación y en caso de su funcionamiento evita la posibilidad de errores al posicionarse frente a la radiación solar [39].

3.9.3. Estudio de sistemas de seguimiento solar en el Ecuador

Los estudios realizados en el Ecuador de sistemas de seguimiento solar aseguran que un buen sistema de seguimiento solar de dos ejes aumenta la ganancia máxima de captación anual media en un 33% y se obtiene una ganancia del 28% con un sistema de seguimiento en un eje horizontal, estos análisis con respecto a la máxima captación de un panel fijo en cualquier localidad del Ecuador [20].

Los resultados de los diferentes sistemas de seguimiento analizados con el software censol 5.0 para una latitud entre los 0° y -3° en el que se encuentra el territorio ecuatoriano, se presentan en la tabla 3.8.

Tabla 3.8: Captación anual media de sistema FV fijo y con seguimiento.

Sistema	Captación anual media
Panel solar fijo 13° de inclinación	98%
Seguimiento	
Dos ejes	133%
Eje horizontal e inclinado	128%
Eje vertical	100,01%

Otro estudio realizado en Ecuador en la provincia del Azuay a 10 minutos de la ciudad de Cuenca a una altura de 2764 msnm con coordenadas 2°51'51.46'' S. y 79°00'50.65'' O., en la que el autor indica que la inclinación óptima para esta latitud en instalaciones de paneles fijos es de 2.86° en dirección al norte, se realizaron pruebas durante 15 días entre los dos sistemas el fijo y con seguimiento con características similares entre los dos sistemas, la tabla 3.9 muestra los datos que el autor expone en su sistema fijo con inclinación óptima para el lugar [16].

Tabla 3.9: Resultados con sistema solar fijo [16].

DATOS OBTENIDOS DEL SISTEMA SOLAR FIJO				
# De datos	Hora [h]	Voltaje [V]	Potencia [W]	Energía [Wh]
1	7:00	11,85	27,72	13,86
2	8:00	11,89	27,82	13,91
3	9:00	12,25	28,66	14,33
4	10:00	12,58	29,43	14,71
5	11:00	12,88	30,13	15,06
6	12:00	13,22	30,93	15,46
7	13:00	13,26	31,02	15,51
8	14:00	13,21	30,91	15,45
9	15:00	13,23	30,95	15,47
10	16:00	13,21	30,91	15,45
11	17:00	13,26	31,02	15,51
12	18:00	13,23	30,95	15,47

Los datos se han tomado en los bornes de la batería y la corriente de carga que suministra el panel fotovoltaico hacia la batería. La tabla 3.10 muestra los resultados que expone el autor.

Tabla 3.10: Resultados con sistema de seguimiento solar [16].

DATOS OBTENIDOS DEL SISTEMA SOLAR MÓVIL					
# De datos	Hora [h]	Voltaje [V]	Potencia [W]	Energía [Wh]	Inclinación [°C]
1	7:00	11,9	27,84	13,92	-67,5°C
2	8:00	12,11	28,3	14,15	-60°C
3	9:00	12,46	29,15	14,57	-45°C
4	10:00	12,96	30,32	15,16	-30°C
5	11:00	13,28	31,07	15,53	-15°C
6	12:00	13,25	31	15,5	00°C
7	13:00	13,27	31,05	15,52	15°C
8	14:00	13,25	31	15,5	30°C
9	15:00	13,27	31,05	15,52	45°C
10	16:00	13,22	30,93	15,56	60°C
11	17:00	13,24	30,98	15,49	75°C
12	18:00	13,22	30,93	15,46	90°C

Finalmente, el autor expone sus resultados en la carga de la batería producto de los dos sistemas sin seguimiento y con seguimiento solar, la figura 3.17 muestra este resultado

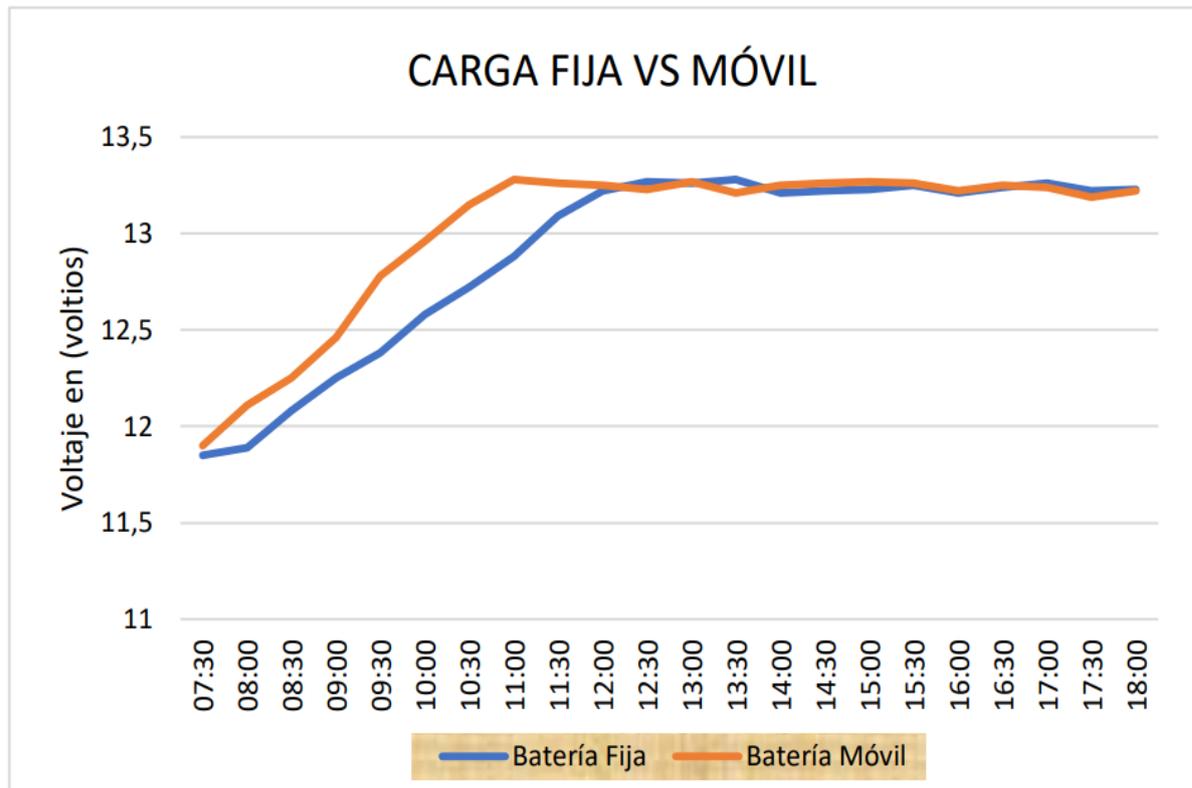


Figura 3.17: Resultados de la carga en la batería con los dos sistemas [16]

4. MATERIALES Y MÉTODOS.

4.1. METODOLOGÍA

La implementación de un sistema de control de posición angular de una estación fotovoltaica de 1 kW, permite principalmente la aplicación de aspectos teórico-prácticos justificados previo a la investigación bibliográfica realizada, enfocándose en la recopilación de información acerca de los diferentes tipos de seguimiento solar y dispositivos electrónicos que permiten un control autónomo, lo cual es necesario para posteriormente dar solución al sistema de control de la estación fotovoltaica de manera óptima.

4.2. TIPOS DE INVESTIGACIÓN

- **Investigación documental**

Se requiere una investigación documental que constituye un mecanismo enfocado a recolectar información, para adquirir conocimientos sobre seguidores solares y sistemas fotovoltaicos, basados en referencias bibliográficas como artículos, revistas, libros, tesis entre otros.

- **Investigación descriptiva**

Esta investigación describe los niveles de radiación solar existente en la Universidad Técnica de Cotopaxi en diferentes horas y estaciones del año, para lo cual se utilizará un software de análisis solar el cual permite interpretar las trayectorias diarias y anuales, así como los ángulos azimut e inclinación.

- **Investigación de campo**

La investigación de campo se utiliza para corroborar los datos arrojados por el programa de análisis solar, ya que generalmente estas trayectorias son referenciadas de puntos cercanos a la zona de estudio, por ende, es imprescindible verificar esta información mediante técnicas de observación en el sitio de implementación.

4.3. MÉTODOS

Para la implementación del sistema de control planteado se ha desarrollado la metodología detallando los pasos a seguir para su diseño de seguimiento solar de un eje, inicialmente se parte desde un estudio y el análisis de los factores y variables que influyen en el funcionamiento del sistema fotovoltaico.

4.3.1. Método deductivo

Se utilizó para especificar los elementos que se necesita para el diseño de sistema de control, la

base de datos y aplicación para la simulación mediante la indagación en las diferentes citas bibliográficas, con lo recopilado se logró tener un alto conocimiento para la ejecución del diseño.

4.3.2. Método científico

Este método permite una serie ordenada de procedimientos que hace uso la investigación para observar la extensión de nuestros conocimientos, que se puede concebir como una estructura formada por reglas a seguir, pero no se obtienen los resultados inmediatos de forma verdadera ya que existen errores, fallas y complejidad antes de su resultado final.

4.4. DECLARACIONES DE VARIABLES

- **Variable Independiente**

Posición angular

- **Variable Dependiente**

Irradiancia incidente en el panel

4.4.1. Operacionalización de las variables

Tabla 4.1: Variable independiente

Variable independiente	ítem	Indicador	Unidades	Instrumentos
Posición angular	Elevación	Ángulos	Grados	Sensor de posición

Tabla 4.2: Variable dependiente

Variable dependiente	ítem	Indicador	Unidades	Instrumentos
Irradiancia incidente en el panel	Energía	Irradiancia	kWh/m ²	Fichas de observación

4.4.2. Métodos, técnicas e instrumentos

Tabla 4.3: Métodos, Técnicas e Instrumentos

Método	Técnica	Instrumentos
Deductivo	Control	Reloj astronómico
Científico	Observación y medición	Catálogos Voltímetro

En el presente proyecto se utiliza modalidades como: la investigación bibliográfica, permite iniciar la búsqueda de antecedentes e investigaciones en textos digitales como impresos respecto al sistema de control de posición angular, la investigación práctica que se realiza en las pruebas de funcionamiento, y la investigación de campo que aporte en la toma de datos necesarios para verificar el aprovechamiento de la irradiación solar.

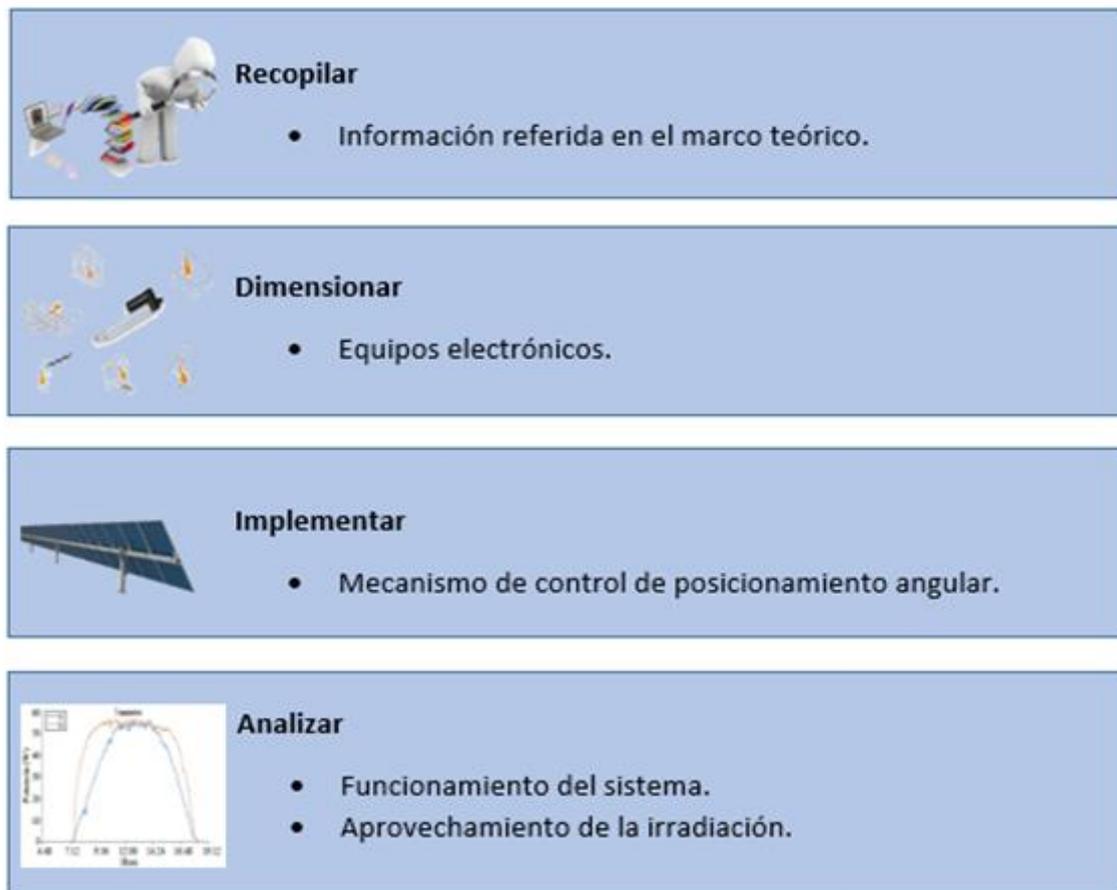


Figura 4.1: Metodología y pasos para construcción del sistema de control

La Figura 4.1. muestra a detalle el proceso a seguir para la culminación del diseño para el sistema de control, empezando principalmente desde el análisis del posicionamiento del seguidor solar de un eje, seguido del dimensionamiento del circuito de control y sus diferentes cálculos que validen su efectividad hasta llegar a las pruebas de posición angular para la observación de su comportamiento al actuar mediante una base de datos por ecuaciones astronómicas.

4.5. DESCRIPCIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

Existen tipos de seguidores solares por algoritmo de seguimiento, ya sea por punto luminoso el

cual usa un sensor que ayuda a direccionar al punto con más luz en el cielo, o bien los seguidores con programación astronómica que funciona mediante ecuaciones, que dan con la posición del sol y se direcciona a este, mediante el cual es el tipo de seguimiento a implementar. Debido a que el uso de ecuaciones matemáticas es necesario para tener el posicionamiento adecuado de los paneles, más adelante se presenta el algoritmo matemático que se necesita, y luego la lógica de programación del sistema de control automático [39].

4.5.1. Inclinaciones máximas y mínimas del sistema

La trayectoria solar se ve influida por la ubicación, en este caso la estación fotovoltaica se encuentra en la terraza del bloque B de la Universidad Técnica de Cotopaxi, campus Matriz, donde su ubicación corresponde a las siguientes coordenadas: Latitud -0.917342° S, Longitud -78.633058° O.

Con respecto a la trayectoria diaria en sentido Este-Oeste, basado en los índices de irradiación y geografía de la zona, la irradiación útil está comprendida entre las 8:00 am y 17:00, con -33° al este y 33° al oeste, teniendo así un recorrido útil de 66° [39].

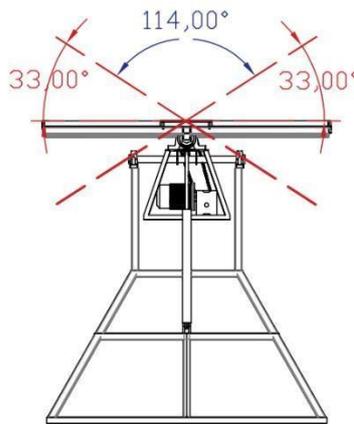


Figura 4.2: Inclinación Este-Oeste [39].

4.5.2. Desarrollo del algoritmo matemático de seguimiento astronómico

Se determina la posición exacta del sol en un instante de tiempo, es decir basándose en la fecha y hora, tiene la ventaja de ser independiente de las condiciones climáticas ya que el seguimiento depende de ecuaciones que predicen la ubicación del sol en tiempo real.

Ecuaciones de geometría solar.

Los sistemas de coordenadas horizontales y horarias, como: la declinación y ángulo horario definen un triángulo esférico astronómico donde su solución da a conocer la altura del sol en función de la altitud, latitud, longitud y el acimut en función de la altura [40].

Declinación (δ): Ángulo que forma el eje polar terrestre con el eje de la elíptica que da movimiento de la tierra alrededor del sol, este ángulo varía entre -23,45 y +23,45 dependiendo de las estaciones del año.

$$\delta = 23,45 \cdot \text{sen}\left(\left(\frac{360}{365}\right)(d + 285)\right) \quad (4.1)$$

Donde d es el número de día del año.

Tiempo estándar del meridiano de Greenwich (*LSTM*):

El Δ_{GMT} es la diferencia de hora entre localidad (LT) y la hora del meridiano de Greenwich (GMT), al este es positivo y al oeste es negativo.

$$LSTM = 15^{\circ} \cdot \Delta_{GMT} \quad (4.2)$$

Para el caso de estudio $\Delta_{GMT} = -5$

Corrección del tiempo por la excentricidad terrestre (*EoT*)

El resultado se da en minutos y corrige la excentricidad de la órbita terrestre y su inclinación.

$$E_{ot} = 9,87 \cdot \text{sen}(B) - (7,53) \cdot \text{cos}(B) - 1,5 \cdot \text{sen}(B) \quad (4.3)$$

Donde B es en grados y resulta de la siguiente ecuación donde d es el número de día del año:

$$B = \left(\frac{360}{365}\right)(d - 81) \quad (4.4)$$

Factor de corrección del tiempo (*TC*)

Resultado en minutos considerando (LSTM) antes calculado, la longitud (λ) de la localidad, y el factor de corrección (*EoT*).

$$TC = 4 \cdot (\lambda - LSTM) + E_{ot} \quad (4.5)$$

Tiempo solar de la localidad (*LST*)

Mediante las correcciones antes mencionadas se ajusta el tiempo de la localidad.

$$LST = LT + \frac{TC}{60} \quad (4.6)$$

Ángulo de Elevación de los paneles (α)

Representa los grados por cada hora de sol, se convierte el tiempo de la localidad a grados, hay que saber que, por cada hora la tierra rota 15°, al medio día su valor es cero, en la mañana el valor es negativo y en la tarde es positivo.

$$\alpha = 15 \cdot (LST - 12) \quad (4.7)$$

Elevación solar (β)

Es necesario conocer la latitud de la localidad (φ), el ángulo horario y la declinación antes mencionada.

$$\beta = \text{sen}^{-1}(\text{sen}(\delta) \cdot \text{sen}(\varphi) + \text{cos}(\delta) \cdot \text{cos}(\varphi) \cdot \text{cos}(\alpha)) \quad (4.8)$$

Elevación máxima (β_{max})

Elevación máxima que alcanza el sol durante el día, el cual varía durante el año.

$$\beta_{max} = \varphi - \delta \quad (4.9)$$

Azimut (Az)

Dirección de donde llegan los rayos solares, el signo positivo corresponde para (HRA >0), este ángulo aumenta en el sentido de horario partiendo del norte geográfico.

$$Az = \text{cos}^{-1}\left(\frac{\text{sin}(\delta) \cdot \text{cos}(\varphi) - \text{cos}(\delta) \cdot \text{sin}(\varphi) \cdot \text{cos}(\alpha)}{\text{cos}(\beta)}\right) \quad (4.10)$$

Cuando se aplican las ecuaciones antes mencionadas, se desarrolla el algoritmo capaz de calcular el vector solar a partir de la longitud, latitud, fecha y hora, de manera que ahora se conoce la posición del sol en tiempo real.

Se simuló el algoritmo con referencia a la posición del Bloque B de la Universidad Técnica de Cotopaxi, donde se encuentra la estación fotovoltaica, evaluándose para uno de los siguientes días y teniendo valores relacionados a los días que se describen a continuación.

- Solsticios (21 de junio y 21 de diciembre): El eje de rotación (ángulo de declinación) terrestre está inclinado +23,45 (verano) ó -23,45 (invierno).
- Equinoccios (20 de marzo y 22 de septiembre): El ángulo es nulo y los rayos de sol se proyectan directamente a la línea ecuatorial.

A partir de los datos calculados, se obtiene el valor acimutal, elevación solar y demás datos y se comprueba la precisión del algoritmo a partir de la información promocionada por la herramienta online “sunearthtools.com”, la cual proporciona la posición del sol.

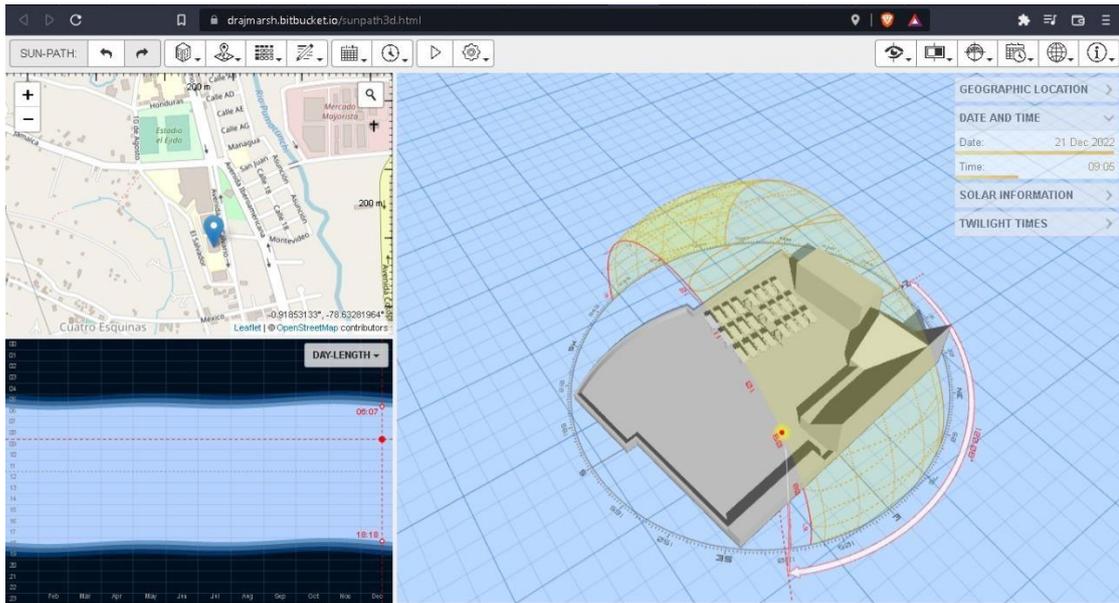


Figura 4.3: Trayectoria solar en la Universidad Técnica de Cotopaxi [40].

4.6. DISEÑO DEL MECANISMO

4.6.1. Diagrama Cinemático del mecanismo

El diagrama cinemático se diseña tomando un marco de referencia que generalmente es la base fija del mecanismo, de ahí se identifican los demás eslabones que conectan con las demás articulaciones, luego se representan las partes que guían al sistema que se mueve, y finalmente se realiza el esquema.

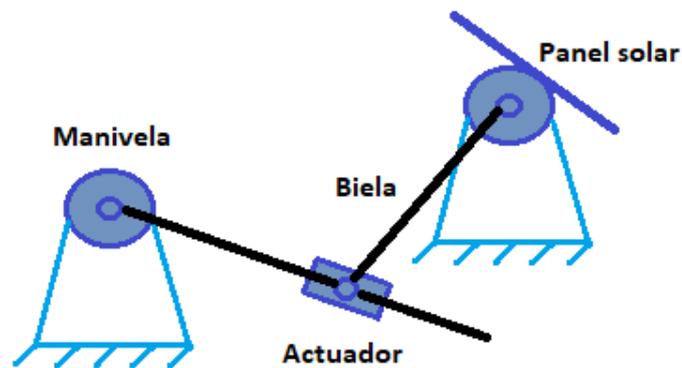


Figura 4.4: Diagrama cinemático del mecanismo

4.6.2. Determinación de los grados de libertad por el método de Kutzbach Grubler

$$GDL = 3(N - 1) - 2J_p - J_h \quad (4.11)$$

n = Número total de eslabones en el mecanismo.

J_p = Número total de uniones principales (uniones de pernos correderas)

J_h = Número total de uniones de orden superior (uniones de levas o engranes)

4.7. ANÁLISIS DEL SOPORTE MECÁNICO

4.7.1. Cálculo de Fuerzas Aplicadas en el Eje

Para el cálculo de las fuerzas estáticas que soporta el eje se utilizó la ecuación

$$F = m * g \quad (4.12)$$

En donde:

F = Fuerza

m = masa

g = gravedad

4.7.2. Fuerzas en el Eje por la Carga del Viento

La fuerza de empuje necesaria se determina de acuerdo con la geometría y la forma de la carga. En el caso de estudio el proyecto está previsto para mover 8 paneles solares, las dimensiones de los paneles solares son 999 mm x 1650 mm en donde la estructura podrá abarcar 4 paneles solares de 150W cada uno. Los vientos en la ubicación donde se instala la estructura oscilan entre 7,71 y 1,02 m/s, según Windfinder un servicio de monitoreo satelital. Además, se sabe que el peso de cada panel es de 12 kg. Mediante estos datos se calcula la fuerza que debe vencer la estructura para moverse con facilidad.

Fuerza del viento:

$$F = AP \quad (4.13)$$

En donde:

F = Fuerza del viento

A = Área de la superficie de contacto con el viento proyección.

P = Presión del viento

4.8. PARÁMETROS DEL CONTROLADOR

Para satisfacer las necesidades requeridas del sistema en desarrollo, se propone la implementación de un controlador que cumpla con las siguientes especificaciones (ANEXO 7).

- Capacidad de poder realizar el posicionamiento de los paneles solares
- Posibilidad de ejecución del algoritmo de control astronómico.
- Comunicación mediante protocolo MODBUS RTU.
- Medio físico de comunión RS485

- Facilidad de configuración y ajuste por software.
- Capacidad para conducir motores (Actuador lineal) de 12V DC.
- Voltaje de entrada 110V AC, 60Hz.
- Admite la conexión con GPS para la recepción de datos.
- Facultad de conexión con un sensor inclinómetro.

4.8.1. Diagrama de flujo del sistema

El controlador se encarga de recibir datos provenientes de los sensores, mediante el cual realiza los cálculos que determina la posición del sol, posteriormente analiza la velocidad del viento que dependiendo de esta, el controlador posiciona los paneles de manera horizontal, después verifica si es de día o noche con el fin de posicionarse en dirección al amanecer durante la noche y de no ser el caso compara los valores calculados con los datos del inclinómetro para la corrección de la posición angular mediante la activación de relés que energizan dos actuadores lineales con motores de 12V DC.

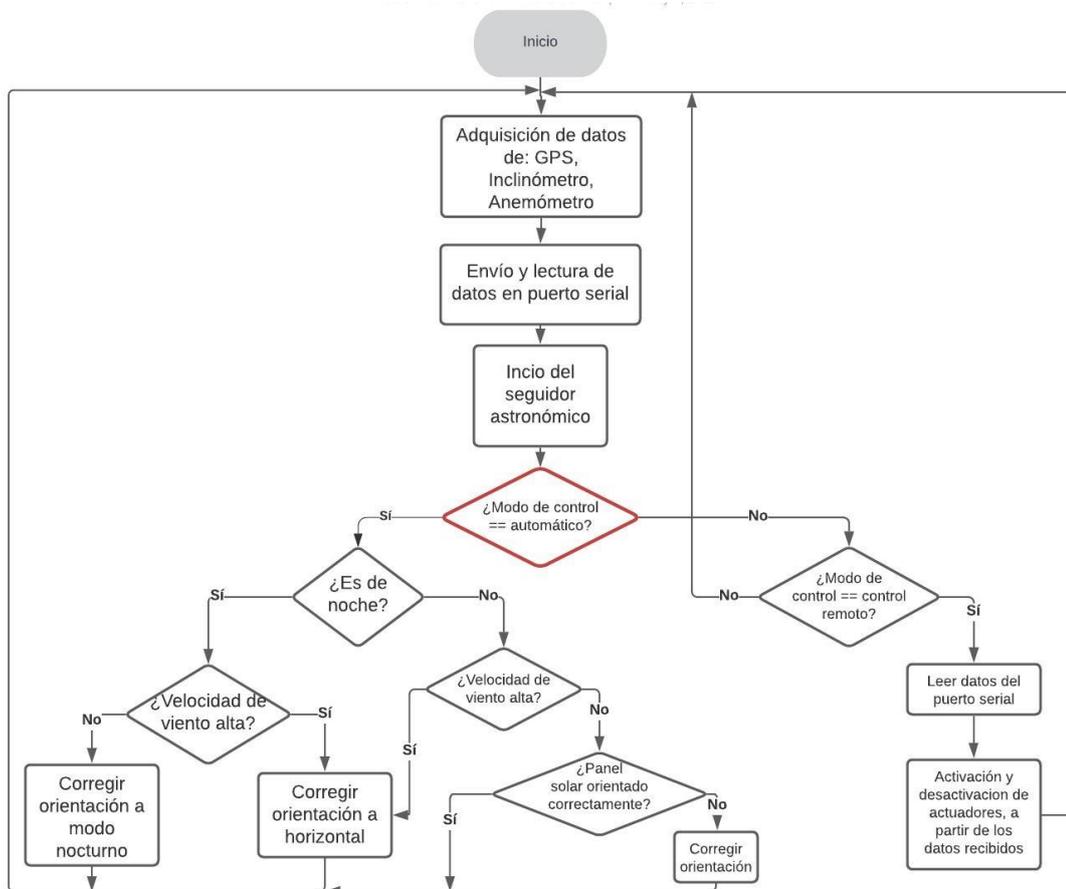


Figura 4.5: Diagrama de flujo del controlador por programación astronómica [32]

4.9. INCLINACIÓN Y ORIENTACIÓN PARA PANELES FIJOS

El objetivo es determinar el ángulo de inclinación ideal y orientación de los paneles de la estación fotovoltaica, de manera que simule un sistema fijo, con el fin de obtener datos de tensión que se genere bajo esta configuración, y posteriormente se compare con datos recolectados cuando el sistema de control de posición este activo.

4.9.1. Orientación

Si se encuentra en el hemisferio norte, el panel debe orientarse al sur, y si se encuentra en el hemisferio sur, debe orientarse al norte y colocarlos en cierta inclinación.

4.9.2. Inclinación

Los paneles deben ser colocados en un ángulo entre el plano horizontal y el panel solar que se llama inclinación, debido al movimiento de la tierra, en invierno no tiene la misma inclinación que en verano, por lo que los paneles deben instalarse en un ángulo fijo determinado óptimo para el verano e invierno.

Tabla 4.4: Inclinación para sistemas fijos [32].

LATITUD DEL LUGAR (°)	ÁNGULO DE INCLINACIÓN FIJO
0 a 15°	15°
15° a 25°	La misma latitud
25° a 30°	Latitud más 5°
30 a 35°	Latitud más 10°
35 a 40°	Latitud más 15°
40° o más	Latitud más 20°

El ángulo mínimo que tendrá el sistema fijo será 15° con el fin de evitar acumulación de polvo y agua sobre los paneles solares.

4.10. DISEÑO DEL EXPERIMENTO PRÁCTICO

Al tener a disposición dos tipos de sistemas fotovoltaicos (fijo y móvil) se pretende realizar pruebas de tensión de cada uno de ellos.

Se conecta en cortocircuito los terminales de los paneles solares de la estructura fija y del móvil. En las figuras que se presentan a continuación se muestran las conexiones realizadas para cada panel (ANEXO 5).

En la figura 4.6 se muestra el modo de conexión de los terminales del panel en la estructura

móvil con lo cual se realiza el experimento.

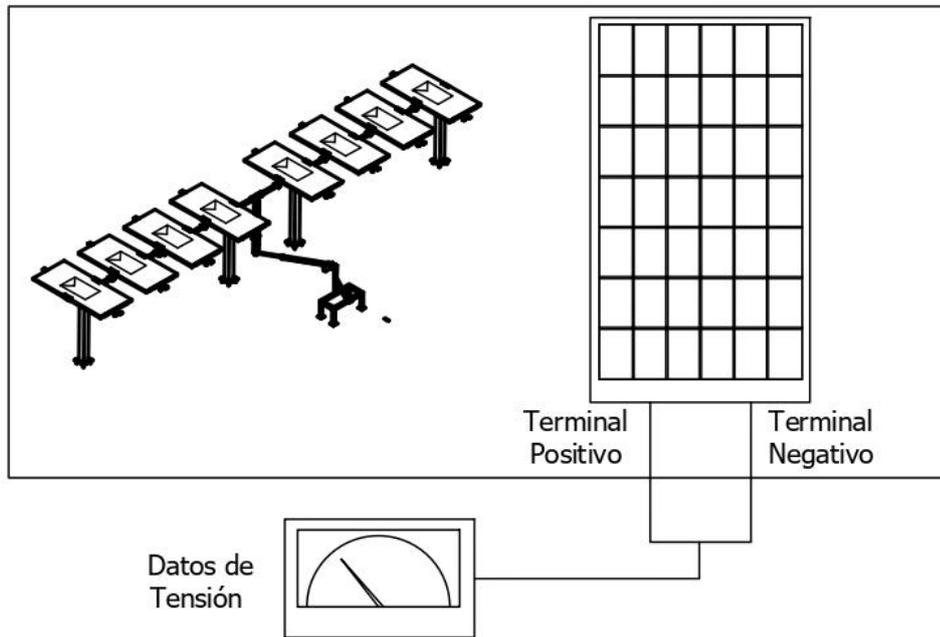


Figura 4.6: Conexión para adquirir tensiones del panel móvil.

En la figura 4.7 se muestra un proceso similar a la conexión del panel móvil, pero esta vez con el panel fijo mediante el cual se analizará compara la corriente generada por cada uno de los dos paneles.

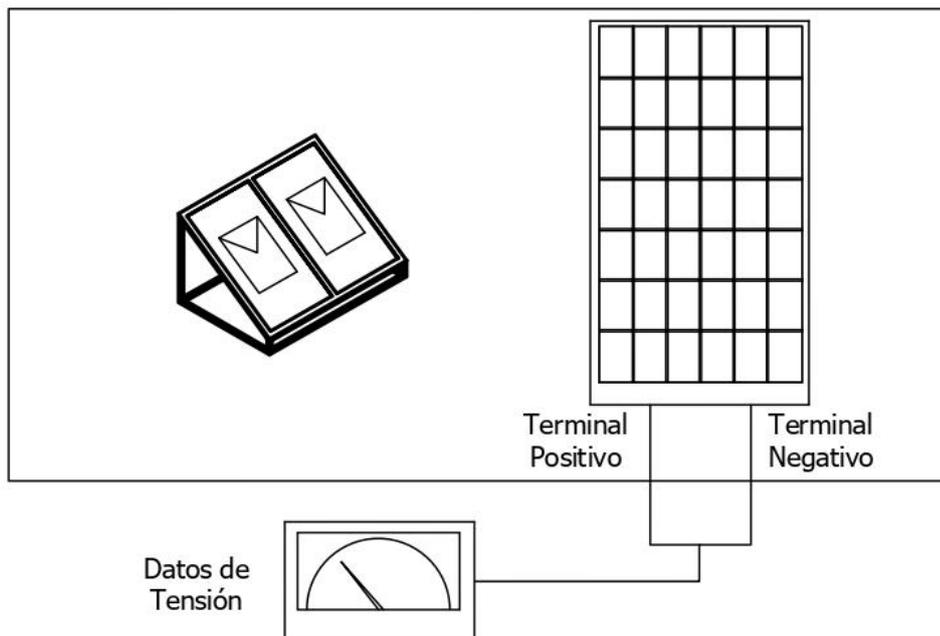


Figura 4.7: Conexión para adquirir tensiones del panel fijo.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. TIPO DE SEGUIDOR SOLAR IMPLEMENTADO

Luego de recopilar información acerca de los diferentes tipos de seguidores solares, para la aplicación de este proyecto se determinó que el sistema de seguimiento solar necesario para la propuesta tecnológica es el seguidor de un eje ya que al comparar un sistema fijo con un sistema de seguimiento angular de un eje se destaca un incremento en la producción en un rango del 15 % al 20 %, y en un sistema de seguimiento angular de dos ejes se halla una incremento de producción en un rango del 18 % al 24 %.

Al comparar los resultados del aprovechamiento de un sistema solar a dos ejes no es muy significativo en comparación con el sistema de eje horizontal, se recomienda el uso de seguidores de un eje por simplicidad de los diseños y costos.

5.2. TIPO DE SEGUIMIENTO PARA EL SISTEMA CONTROL

El sistema de seguimiento adopta el algoritmo de seguimiento astronómico, este tipo de control es confiable cuando hay escasez de iluminación en días nublados y lluviosos, el seguidor solar puede calcular la elevación del sol en tiempo real con precisión, a partir de datos como la longitud, latitud, tiempo, hora y fecha.

El mecanismo del seguidor solar corresponde a una configuración de un eje, el sistema realiza el seguimiento mediante el cálculo de la trayectoria solar que determina la posición del sol. El controlador compara los valores calculados por el algoritmo con los valores del sensor inclinómetro. De acuerdo con la operación, el controlador envía la señal al actuador, es decir mediante relevadores activa o desactiva el actuador lineal de 12V, de manera que lo enciende (ON) o apaga (OFF), hasta que los valores coincidan.

Se usa un tipo de control ON-OFF, conocido como todo o nada, su característica es que depende del signo del error, se activa la señal al relé que activa el actuador lineal, cuando la variable del proceso (datos de la inclinación de los paneles) está por debajo del valor del Set Point (Valores de inclinación calculados). Para evitar excesivas connotaciones que pueden ocasionar daños a los actuadores se añade una histéresis, lo cual es una diferencia en los límites del Set Point.

Por consiguiente, se definen las características del controlador ON-OFF para el proceso de control de posición angular.

Tabla 5.1: Descripción del control de posición ON.OFF.

Control de posición ON-OFF	
Rango de control. (este - oeste)	-33°; +33°
Histéresis	
Histéresis positiva	Set Point +1°
Histéresis negativa	Set Point -1°
Estados	Actuadores
Si el Set Point es mayor que la variable del proceso	Activa el actuador lineal (polarización inversa del motor 12DC)
Si el Set Point es menor que la variable de proceso	Activa el actuador lineal (polarización directa del motor 12DC)
Si el Set Point se mantiene entre los límites	Desactiva el motor

El controlador realizará la acción de corrección del ángulo de inclinación que permite mantener en funcionamiento el equipo frente a drásticos factores como: cambio de posición del sol durante el día y año, velocidades de viento muy elevadas, garantizando que estos se encuentren dentro de los límites mínimos y máximos que establece el sistema y a la vez no provoque daños a la estructura mecánica del seguidor solar.

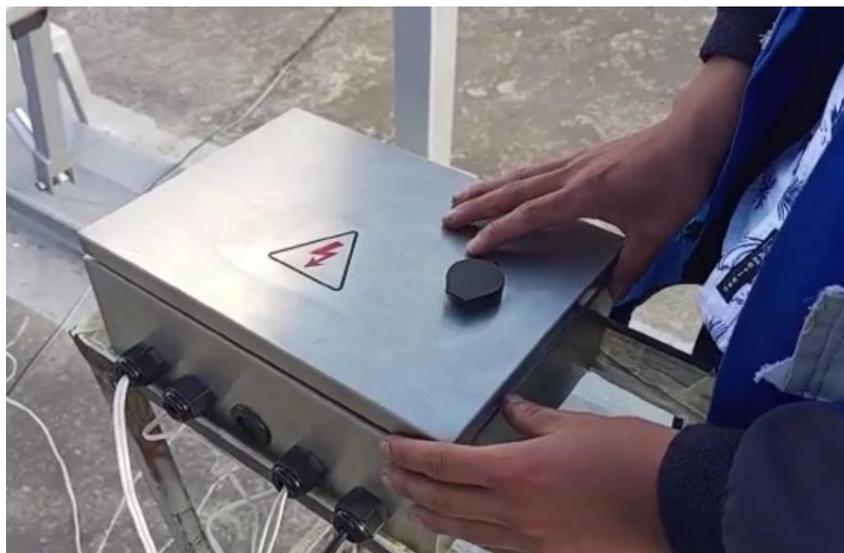


Figura 5.1: Controlador solar.

5.3. DETERMINACIÓN DE ÁNGULOS DE ELEVACIÓN PARA LOS PANELES SOLARES

Para alcanzar la mayor incidencia de irradiación posible en el sistema fotovoltaico de un eje es necesario que el controlador solar calcule y compare los ángulos de elevación que tendrán los paneles durante el transcurso del día, alcanzando un ángulo máximo y mínimo de 30 y -30 grados respectivamente según el diseño implementado. Se calcula el ángulo de inclinación para cada hora de cualquier día del año siguiendo las ecuaciones de geometría solar para este ejemplo el 20 de marzo del 2022 - día 79, y para la ubicación geográfica (-0,917342°; -78,633058°) correspondiente a la ubicación de la estación fotovoltaica que se encuentra en la terraza del bloque B de la Universidad Técnica de Cotopaxi campus matriz.

Declinación (δ):

d = número de día del año

$$\delta = 23,45 \cdot \text{sen}\left(\left(\frac{360}{365}\right)(d + 285)\right) \quad (4.1)$$

$$\delta = 23,45 \cdot \text{sen}\left(\left(\frac{360}{365}\right)(79 + 285)\right)$$

$$\delta = -0,4036$$

Tiempo estándar del meridiano de Greenwich (**LSTM**):

$$\text{LSTM} = 15^\circ \cdot \Delta_{\text{GMT}} \quad (4.2)$$

Para el caso de estudio $\Delta_{\text{GMT}} = -5$

$$\text{LSTM} = 15^\circ \cdot -5$$

$$\text{LSTM} = -75^\circ$$

Corrección del tiempo por la excentricidad terrestre (**Eot**):

$$B = \left(\frac{360}{365}\right) (d - 81) \quad (4.4)$$

$$B = \left(\frac{360}{365}\right) (79 - 81)$$

$$B = -1,97$$

$$E_{\text{ot}} = 9,87 \cdot \text{sen}(2B) - (7,53) \cdot \text{cos}(B) - 1,5 \cdot \text{sen}(B) \quad (4.3)$$

$$E_{\text{ot}} = 9,87 \cdot \text{sen}[2(-1,97)] - (7,53) \cdot \text{cos}(-1,97) - 1,5 \cdot \text{sen}(-1,97)$$

$$E_{\text{ot}} = -8,15$$

Factor de corrección del tiempo (**TC**)

La longitud $\lambda = -78,633$

$$TC = 4 \cdot (\lambda - LSTM) + E_{ot} \quad (4.5)$$

$$TC = 4 \cdot [(-78,633) - (-75)] + (-8,15)$$

$$TC = -22,68$$

Tiempo solar de la localidad (LST)

LT = 12 horas

$$LST = LT + \frac{TC}{60} \quad (4.6)$$

$$LST = 12 + \frac{-22,68}{60}$$

$$LST = 11,62$$

Ángulo de Elevación de los paneles (α)

$$\alpha = 15 \cdot (LST - 12) \quad (4.7)$$

$$\alpha = 15 \cdot (11,62 - 12)$$

$$\alpha = -5,7^\circ$$

De acuerdo con lo calculado mediante las ecuaciones de geometría solar se obtuvo un ángulo de elevación de $-5,7^\circ$ para los paneles fotovoltaicos.

Tabla 5.2: Ángulos de geometría solar en SunEarthTools.

Fecha:	20/03/2023 GMT-5		
coordinar:	-0.9174533, -78.6331468		
ubicación:	-0.91745330, -78.63314680		
hora	Incidencia	Azímüt	Elevación
6:18:45	-0,833	90.17°	90,833
7:00:00	9,48	90°	80,52
8:00:00	24,48	89.73°	65,52
9:00:00	39,48	89.4°	50,52
10:00:00	54,48	88.89°	35,52
11:00:00	69,47	87.79°	20,53
12:00:00	84,43	81.26°	-5,57
13:00:00	80,47	275.16°	-9,53
14:00:00	65,49	271.93°	-24,51
15:00:00	50,49	271.08°	-39,51
16:00:00	35,49	270.65°	-54,51
17:00:00	20,49	270.36°	-69,51
18:00:00	5,49	270.12°	-84,51
18:25:17	-0,833	270.03	-90,833

Al realizar una comparativa utilizando los datos del software SunEarthTools para la misma fecha y hora en la tabla 5.2, recomienda elevar los paneles solares a $-5,57^\circ$, por lo que se deduce que es favorable el algoritmo implementado en el controlador solar para este sistema, ya que tendría un margen de error de $\pm 0,2^\circ$ aproximadamente.

5.4. GRADOS DE LIBERTAD DEL MECANISMO

Para realizar el diagrama de movimiento del sistema fotovoltaico de un eje se realiza posteriormente mediante el análisis de los eslabones y juntas que lo componen y mediante esto se aplicará la fórmula para determinar los grados de libertad que esta posea.

$$M = 3 * (L - 1) - 2(J1 - J2) \quad (3.1)$$

$$M = 3 * (2 - 1) - 2(1 - 0)$$

$$M = 3 - 2$$

$$M = 1$$

5.5. ANÁLISIS PARA LA SELECCIÓN DEL ACTUADOR LINEAL

5.5.1. Peso de los paneles y estructura

Se tiene en cuenta la masa de los 8 paneles solares los cuales tienen una masa de 12 Kg y también la de la estructura que sujeta a los paneles llegando a pesar cada panel hasta 16 Kg, y en el peor de los casos el actuador lineal tendría que alzar todo el peso que se muestra continuación y se selecciona un actuador lineal eléctrico con una fuerza mayor a la que se calcula.

$$F_p = m \cdot g \quad (4.12)$$

$$F_p = (16\text{Kg} \cdot 8) \cdot 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$F_p = 1255,68$$

Donde:

F_p = Fuerza ejercida por los paneles.

5.5.2. Fuerza de la velocidad del viento

La fuerza que ejerce el viento sobre la estructura se determina conociendo la velocidad del viento en el lugar de la instalación, Los vientos en la ubicación donde se instala la estructura oscilan entre 7,71 y 1,02 m/s, según Windfinder un servicio de monitoreo satelital. Primero se

determina la presión del viento en el lugar.

$$P = 1,22v^2 \quad (5.1)$$

$$P = 1,22(7,71)^2 = 72,52 \text{ Pa}$$

Donde:

v = Velocidad del viento en el lugar de instalación

Luego se determina la fuerza ejercida sobre cada panel solar conociendo sus dimensiones: Largo = 1650 mm, ancho = 990 mm. También es necesario conocer el ángulo máximo de los que estarán expuestos a la dirección horizontal del viento. En las cartas solares se recomienda una exposición horizontal de 33° .

$$F = AP \text{ sen}(33^\circ) \quad (4.13)$$

$$F = 1,65 * 0,99 * 72,52 * \text{sen}33^\circ$$

$$F = 64,518 \text{ N}$$

A esta fuerza se debe multiplicar por cuatro ya que estarán dispuestos 8 paneles por eje.

$$F_{\text{Viento}} = 64,518\text{N} * 8$$

$$F_{\text{Viento}} = 516,14 \text{ N}$$

Se determina la fuerza total en el eje.

$$F_{\text{Eje}} = F_{\text{Viento}} + F_{\text{Peso}} \quad (5.2)$$

$$F_{\text{Eje}} = 516,14\text{N} + 1255,68\text{N}$$

$$F_{\text{Eje}} = 1771,829 \text{ N}$$

5.5.3. Momento para mover la estructura

El momento para girar los paneles se determina con la mitad de la fuerza total ejercida en el eje, esta corresponde a la fuerza en los extremos de los paneles $F_{\text{Eje}'}$ por la distancia desde el eje hasta el extremo más alejado del panel solar $L_{\text{panel}} = 0,825\text{m}$.

$$F_{\text{Eje}'} = \frac{F_{\text{Eje}}}{2} \quad (5.3)$$

$$F_{\text{Eje}'} = 1771,829 / 2$$

$$F_{\text{Eje}'} = 885,91 \text{ N}$$

$$M_{\text{Eje}} = F_{\text{Eje}'} * L_{\text{Panel}} \quad (5.4)$$

$$M_{\text{Eje}} = 885,91 \text{ N} * 0,825 \text{ m}$$

$$M_{Eje} = 730,87 \text{ Nm}$$

$$M_{Eje} = M_{Brazo}$$

$$M_{Eje} = FA * LB \quad (5.5)$$

$$FA = M_{Eje} / LB$$

$$FA = 730,87 \text{ Nm} / 0,75$$

$$FA = 974,50 \text{ N}$$

Donde:

L_{Panel} = Largo del panel.

F_{Eje} = Fuerza ejercida en los extremos de los paneles solares.

M_{Eje} = Momento en el eje.

FA = Fuerza necesaria para el actuador lineal.

Esta fuerza corresponde a la perpendicular con respecto al brazo, pero en el diseño tendrá un movimiento en donde no siempre la fuerza del actuador será perpendicular al brazo del eje, por lo que se calcula una nueva fuerza con respecto al ángulo crítico donde el actuador realizará un máximo esfuerzo. Ver Anexo 4.

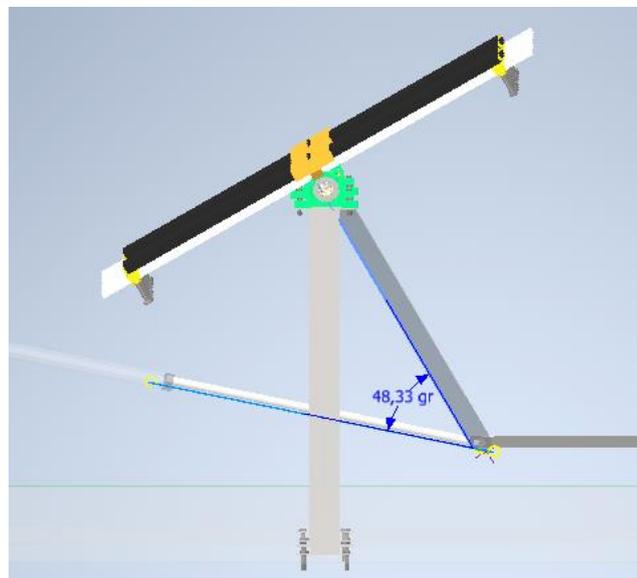


Figura 5.2: Ángulo crítico actuador abierto.

$$FA = F_{Crítica} * \text{sen } 48,33$$

$$F_{Crítica} = FA / \text{sen } 48,33$$

$$F_{Crítica} = 974,50 / \text{sen } 48,33$$

$$F_{\text{Crítica}} = 1304,57 \text{ N}$$

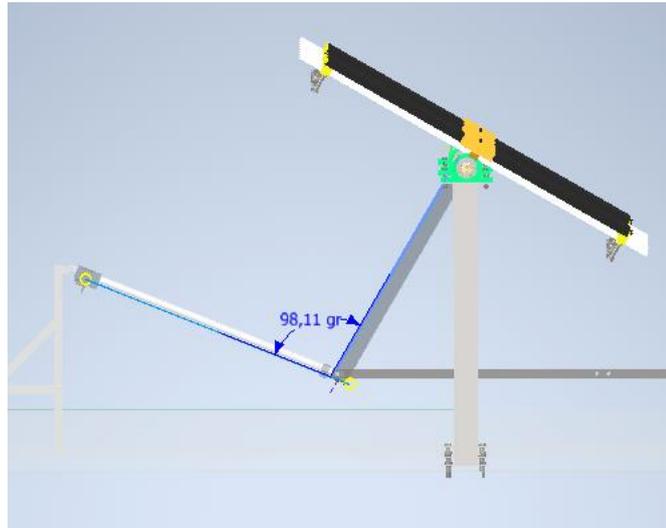


Figura 5.3: Ángulo crítico actuador cerrado.

$$F_A = F_{\text{Crítica}} * \cos (8,11)$$

$$F_{\text{Crítica}} = F_A / \cos (8,11)$$

$$F_{\text{Crítica}} = 974,50 / (\cos 8,11)$$

$$F_{\text{Crítica}} = 984,34$$

De acuerdo con lo calculado se ha seleccionado un actuador con una capacidad de 1775,61N lo cual es suficiente para realizar el movimiento en la estructura.

Por otra parte, debido a la investigación requerida, se determina la carrera del actuador lineal la cual es de 1000mm para lograr el movimiento en el sentido Este-Oeste, así como su grado de protección Ip66 lo que significa una protección total contra el contacto, es hermético al polvo y la carcasa protege el interior de los fuertes chorros de agua. A continuación, se muestra una tabla donde se presentan las características del actuador lineal eléctrico seleccionado.

Tabla 5.3: Característica del actuador lineal.

Actuador lineal	
Carrera	1000 mm
Velocidad	20 mm/s
Fuerza	400 lb
Tensión	12 V
Corriente	4 – 12 A
IP	66

5.6. PASO Y VELOCIDAD DEL ACTUADOR LINEAL ELÉCTRICO

Pasos para medir la velocidad del actuador lineal

1. Alimente el actuador lineal según sus especificaciones eléctricas. Dado que esta es solo una prueba de banco, no es necesario conectar interruptores o una caja de control. Simplemente aplique un voltaje positivo y negativo de una fuente de alimentación o batería para permitir que la barra se extienda/retraiga por completo.
2. Una vez que la barra haya llegado a su posición final, toma un cronómetro y ponlo a cero.
3. Encienda los cables de la fuente de alimentación o la batería y prepárese para iniciar el cronómetro en el momento en que la varilla comience a extenderse/retraerse.
4. Detenga el temporizador una vez que alcance su posición extendida/retraída, anote el tiempo y repita para la dirección opuesta.

Para el cálculo del paso se utiliza la siguiente fórmula.

$$P = S/t \quad (5.6)$$

Donde:

P: Paso

S: Carrera

T: Tiempo

$$P = S/t$$

$$P = 40/12$$

$$P = 3.33 \text{ in/s}$$

5.7. DISEÑO ESTRUCTURAL DEL SOPORTE PARA EL ACTUADOR

En esta parte del diseño se busca encontrar las dimensiones para la base del actuador teniendo en cuenta las dimensiones del actuador lineal eléctrico, el espacio en la terraza y ciertas obstrucciones que impiden el montaje del sistema, así como también la selección de los materiales por medio de análisis mecánicos teniendo en cuenta los esfuerzos y cargas que se implementarán en las diferentes partes de la estructura. Para empezar con el diseño primero se realiza la simulación en un programa de diseño y modelado para tener una referencia lo más próxima a lo que en realidad se va a construir en la vida real. En la figura 5.4. Se muestra el diseño preliminar del soporte simulado en un software de modelado en 3D.

El mecanismo de soporte será implementado en el sistema estructural construido previamente.

Ver Anexo 3 y 4.

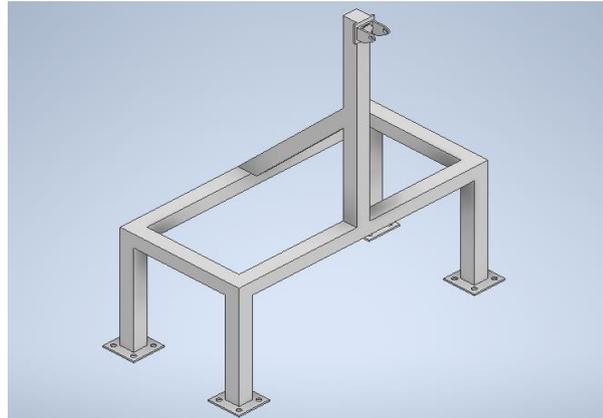
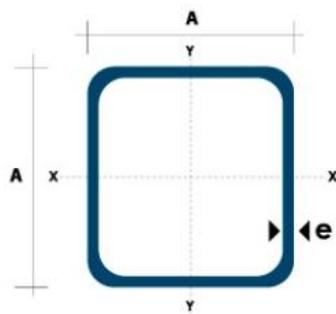


Figura 5.4: Soporte mecánico para el actuador.

5.7.1. Selección de materiales

En la selección del material para el soporte se toma en cuenta principalmente su disponibilidad en los mercados locales, su calidad y resistencia a ambientes hostiles. Teniendo en cuenta lo antes mencionado se procederá a seleccionar el tubo dependiendo del catálogo existente en nuestra región.



Dimensiones			Área	Ejes X-Xe Y-Y		
A mm	Esesor mm (e)	Peso Kg/m	Área cm2	I cm4	W cm3	I cm3
20	1.2	0.72	0.90	0.53	0.53	0.77
20	1.5	0.88	1.05	0.58	0.58	0.74
20	2.0	1.15	1.34	0.69	0.69	0.72
25	1.2	0.90	1.14	1.08	0.87	0.97
25	1.5	1.12	1.35	1.21	0.97	0.95
25	2.0	1.47	1.74	1.48	1.18	0.92
30	1.2	1.09	1.38	1.91	1.28	1.18
30	1.5	1.35	1.65	2.19	1.46	1.15
30	2.0	1.78	2.14	2.71	1.81	1.13
40	1.2	1.47	1.80	4.38	2.19	1.25
40	1.5	1.82	2.25	5.48	2.74	1.56
40	2.0	2.41	2.94	6.93	3.46	1.54
40	3.0	3.54	4.44	10.20	5.10	1.52
50	1.5	2.29	2.85	11.06	4.42	1.97
50	2.0	3.03	3.74	14.13	5.65	1.94
50	3.0	4.48	5.61	21.20	4.48	1.91
60	2.0	3.66	3.74	21.26	7.09	2.39
60	3.0	5.42	6.61	35.06	11.69	2.34

Figura 5.5: Catálogo de tubos estructurales.

5.7.2. Deformación equivalente

En la Figura 5.6. observamos la deformación equivalente, esta se muestra cuando cambia la estructura al momento de estar sometida a cargas en este caso estáticas fijas lo que nos da como

resultado una deformación máxima de 2,32 mm, por lo que la estructura soporta sin dificultad la fuerza aplicada.

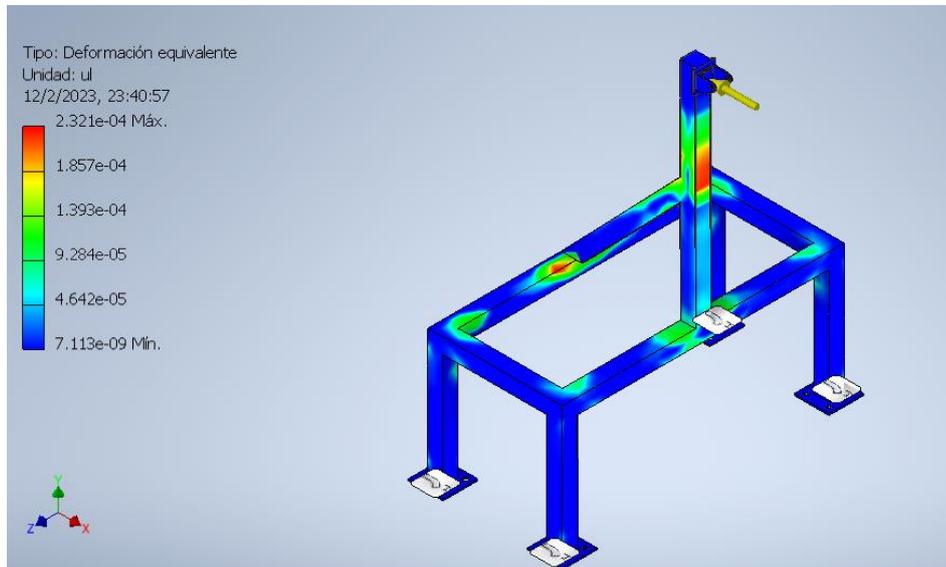


Figura 5.6: Deformación equivalente.

5.7.3. Factor de seguridad

En la Figura 5.7. se muestra el coeficiente de seguridad que tiene la estructura, un coeficiente de seguridad de 1 nos indica que el material es esencialmente elástico, la mayoría de los diseñadores procuran obtener un coeficiente de seguridad de 2 y 4 según las cargas colocadas, en este caso tenemos un coeficiente de seguridad mínima de 3,98 ul y una máxima de 15 ul por lo que nos indica que la estructura soportara las cargas aplicadas teniendo un sobredimensionamiento en el diseño.

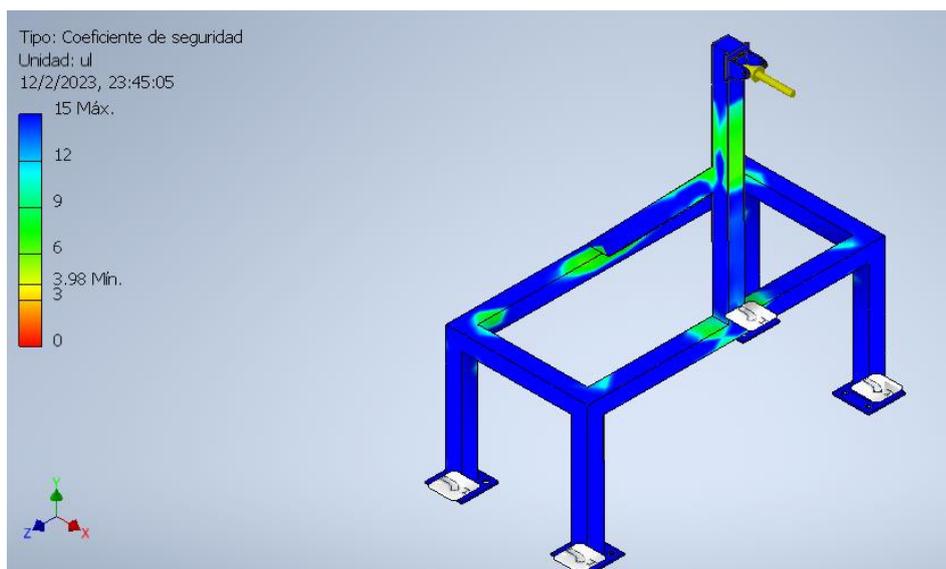


Figura 5.7: Factor de seguridad.

5.8. CARACTERÍSTICAS DEL CONTROLADOR SOLAR DE POSICIONAMIENTO ANGULAR

El controlador solar adquirido tiene incorporado en su interior un algoritmo mediante ecuaciones astronómicas el cual se encarga del posicionamiento angular de los paneles, los mismos que cumplirán con un movimiento de Este a Oeste.

Mediante un sensor de ángulo (inclinómetro) este equipo es capaz de realizar una comparación en tiempo real entre los ángulos de elevación calculados por el algoritmo y los adquiridos por el inclinómetro, realizando de esta manera un control ON/OFF en el actuador lineal, logrando así el movimiento angular de un eje en el sistema fotovoltaico y captando la mayor irradiancia solar en el mismo.

A continuación, se muestran las funcionalidades del equipo:

- Seguimiento automático: En este modo, la luz “DVE“ se enciende durante 10 segundos, luego encenderá la luz “Oeste”, comenzando así a trabajar el “Motor”, El seguimiento automático se detiene cuando el inclinómetro ha captado el punto más alto del sol.
- Protección de sobrecarga: Cuando la luz “Sobrecarga” se enciende, el seguimiento se detiene. Una vez que se borre el error, se debe reiniciar para luego reanudar la operación.
- Protección contra el viento: Cuando hay viento fuerte, la luz “Viento” se enciende y el rastreador se nivela. Cuando cesa el viento, el sistema reanuda el seguimiento después de un breve retraso.
- Protección contra lluvia o nieve: Con la señal de lluvia/nieve, las luces “Nieve” y “Este” se encienden, el rastreador se mueve hacia el este. El sistema se reanuda después de que se cancela la señal.
- Almacenamiento nocturno: Este modo comienza después de las 21:00.

5.9. INSTALACION DEL CONTROLADOR

Al controlador se conectó una entrada de alimentación por cable de 110V de 12m el cuál alimenta una fuente de voltaje de 12 V y a la placa de control, tiene una salida de 12V la misma que se conecta directamente hacia el actuador lineal eléctrico, y una entrada de datos provenientes del sensor de ángulo (ANEXO 6).

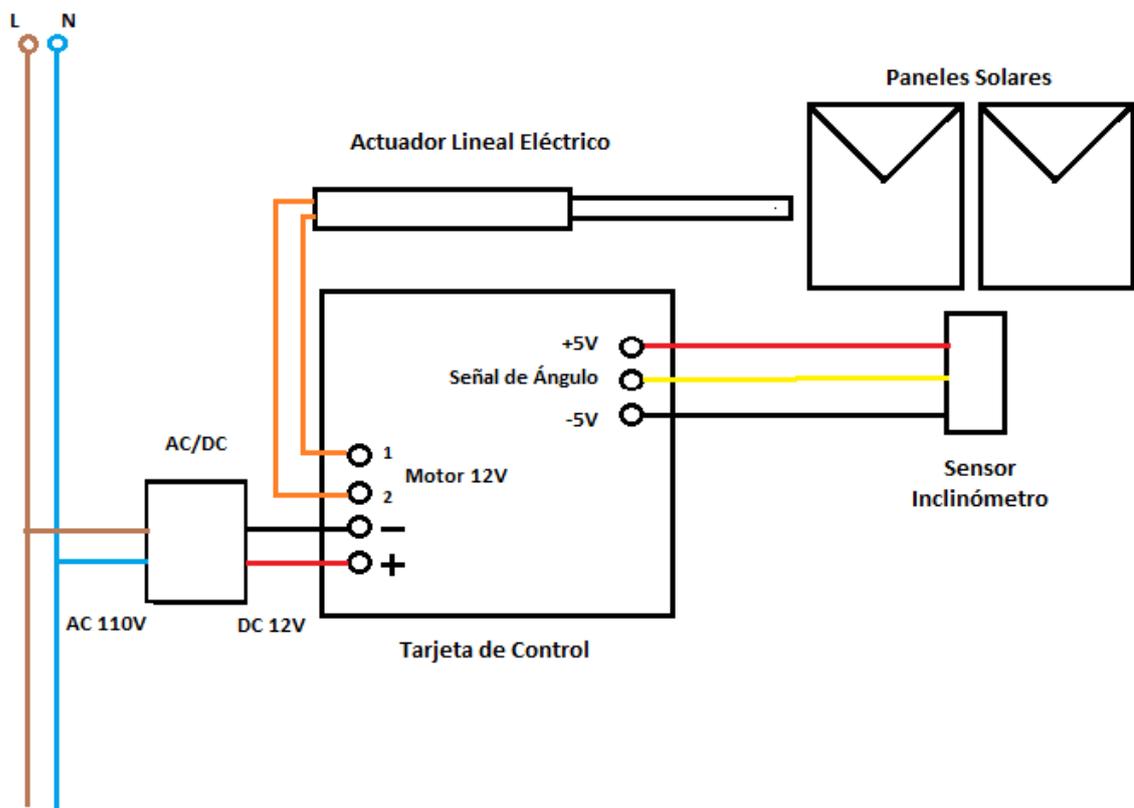


Figura 5.8: Cableado del controlador.

5.10. INSTALACIÓN DEL SENSOR SOLAR

El sensor cuenta con un cable de 3m de largo y tornillos para su instalación, este se posicionó debajo de uno de los paneles solares orientando hacia el norte el orificio del cable de datos (ANEXO 6).



Figura 5.9: Instalación del sensor de posición.

5.11. PRUEBA DEL CONTROLADOR:

Antes de poner en funcionamiento el controlador de seguimiento solar se debe tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- Verificar el estado de los bornes de conexión.
- Quite y bloquee la alimentación de entrada antes de que comience la instalación y el cableado del controlador.
- Afloje todos los tornillos de los bornes de conexión a ocupar.
- Instale el sensor de inclinación en el eje principal (opcional), con el orificio del cable hacia el norte.
- Pele aproximadamente 3/8 (in) de aislamiento externo del cable e inserte el extremo sin aislamiento debajo de la placa de presión del borne y apriete el tornillo.
- Una vez que realice las instalaciones necesarias verifique que haya buenas terminaciones tirando ligeramente de cada cable.
- Posicione el interruptor manual en automático y espere 10 segundos.
- Energice y verifique que no exista cortocircuitos en ningún punto de conexión.
- Compruebe su funcionamiento apreciando el movimiento del vástago del actuador lineal eléctrico.

5.12. CONSTRUCCIÓN DEL SOPORTE PARA EL ACTUADOR

Para el proceso de corte y construcción de la base que sujetará el actuador lineal eléctrico se utilizó un tubo cuadrado de 35mm de base 6 m de altura y 3 mm de espesor, el cual se sometió a pruebas de simulación para evaluar su comportamiento frente a las cargas a las que iba a ser sometido. Para su elaboración se procedió a utilizar el proceso de corte, taladrado de las piezas y soldadura por arco eléctrico con electrodo para acero galvanizado AGA ya que es un electrodo que resistirá a la intemperie y brindará una mejor unión entre piezas, además se selló con resina impermeabilizante toda unión para evitar daños por filtraciones de agua. La forma de la base se debe a que en el lugar de instalación existe una canaleta que obstruye el espacio de montaje. Otra razón de su diseño es que estará sujeta a bases empernadas las cuales la hacen mucho más rígida y segura, en la figura 5.10. se muestra el diseño del soporte



Figura 5.10: Soporte del actuador.

5.13. MONTAJE DEL ACTUADOR LINEAL ELÉCTRICO

Para lograr sujetar el actuador lineal en la base y que el mismo tenga un grado de libertad fue necesario realizar un soporte de montaje con las medidas brindadas por el fabricante, esto con el fin de que el actuador no pierda fuerza al momento de realizar el movimiento en la estructura. Asimismo, se usaron pernos de presión para ensamblar el actuador a la base y al brazo mecánico que genera el movimiento en la estructura de seguimiento solar de un eje.



Figura 5.11: Actuador lineal anclado.

5.14. ANÁLISIS DE TENSION DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO FIJO Y MÓVIL

A continuación, se procede a analizar los datos obtenidos durante los 10 días de medición de la tensión, se analiza y compara el voltaje global de la tensión, haciendo un promedio de los datos obtenidos durante los días de medición tanto para paneles fijos en la tabla 5.4 y paneles móviles en la tabla 5.5.

Tabla 5.4: Datos de tensión medidos del panel fijo.

TENSIONES MEDIDAS POR FECHA Y HORA (V)											
Fecha Hora	30/01	31/01	01/02	02/02	02/03	06/02	07/02	08/02	09/02	10/02	Promedio
6:00	16,3	16,4	17	16,8	17,1	16,3	17,5	16,8	16,5	16,3	16,7
7:00	17,7	16,5	17,2	17,5	17,4	17,4	18,1	17,1	17,5	17,5	17,39
8:00	18,8	17,8	18,1	18,3	18,4	18,1	18,8	17,8	18,4	18,6	18,31
9:00	19,1	18,7	18,5	18,8	19,1	19,1	19,1	18,8	19,1	19	18,93
10:00	19,5	19,1	18,8	19,2	19,5	19,6	19,5	19,2	19,5	19,4	19,33
11:00	19,5	19	19,3	19,7	19,8	19,8	19,8	19,4	19,8	19,8	19,59
12:00	19,8	19,2	19,7	20,1	19,8	20	20,1	19,9	20,4	20	19,9
13:00	20	18,7	19,2	20,2	19,5	19,9	20,8	20,1	20,3	20,4	19,91
14:00	19,6	18,6	18,8	19,2	18,8	19	20,4	19,7	20	20,5	19,46
15:00	19,2	18,3	18,5	19,1	18,4	18,5	19,8	19,1	19,8	20,3	19,1
16:00	18,3	18	18,4	18,5	17,8	17,8	18,9	18,5	19	19,8	18,5
17:00	18,1	17,9	17,5	17,8	17,7	17,6	18,2	17,7	18,1	18,5	17,91
18:00	17,9	17,5	17,4	17,5	17,1	17	18	17,2	17,9	18	17,55

Tabla 5.5: Datos de tensión medidos del panel móvil

TENSIONES MEDIDAS POR FECHA Y HORA (V)											
Fecha Hora	30/01	31/01	01/02	02/02	02/03	06/02	07/02	08/02	09/02	10/02	Promedio
6:00	17,3	18,3	19,1	18,8	19,2	18,3	19,5	18,9	18,5	18,4	18,63
7:00	18,7	18,6	19,2	19,5	19,4	19,4	20,2	19,1	19,5	19,4	19,3
8:00	20	19,4	20,1	20,3	20,5	20,1	20,5	19,8	20,4	20,6	20,17
9:00	20,3	20,5	20,3	20,8	21,3	21,1	21	20,5	21,1	21	20,79
10:00	22	21	21,1	21,2	21,5	21,6	21,5	21,4	21,5	21,7	21,45
11:00	22,8	21,8	21,8	22,4	22,1	21,8	22,8	21,6	21,8	22	22,09
12:00	23,8	22,3	22,9	23,5	22,8	22	23,8	22,1	22,4	23,6	22,92
13:00	22,2	21,9	22,4	22,2	21,4	21,9	22,2	22,5	22,3	22,5	22,15
14:00	21,9	20,5	21,8	21,1	20,8	21	21,9	21,7	22,1	21,9	21,47
15:00	21,1	20,3	21,5	20,5	20,4	20,5	21,1	21,3	21,5	21,5	20,97
16:00	20	19,7	19,8	19,8	19,8	19,7	20	20,5	20,6	19,8	19,97
17:00	19	18,1	19,5	19,2	19,7	19,7	19	19,5	19,5	19,5	19,27
18:00	18,2	18,2	19,1	18,2	19	19,2	18,2	19,2	18,8	18,2	18,63

5.14.1. Análisis de tensión del sistema fotovoltaico fijo

En la figura 5.12 se muestra el nivel de tensión por unidad de tiempo captado por un panel fijo esto debido a que permanece en un ángulo de inclinación de 35°, los datos a evaluar son los del promedio de tensiones en la tabla 5.4.

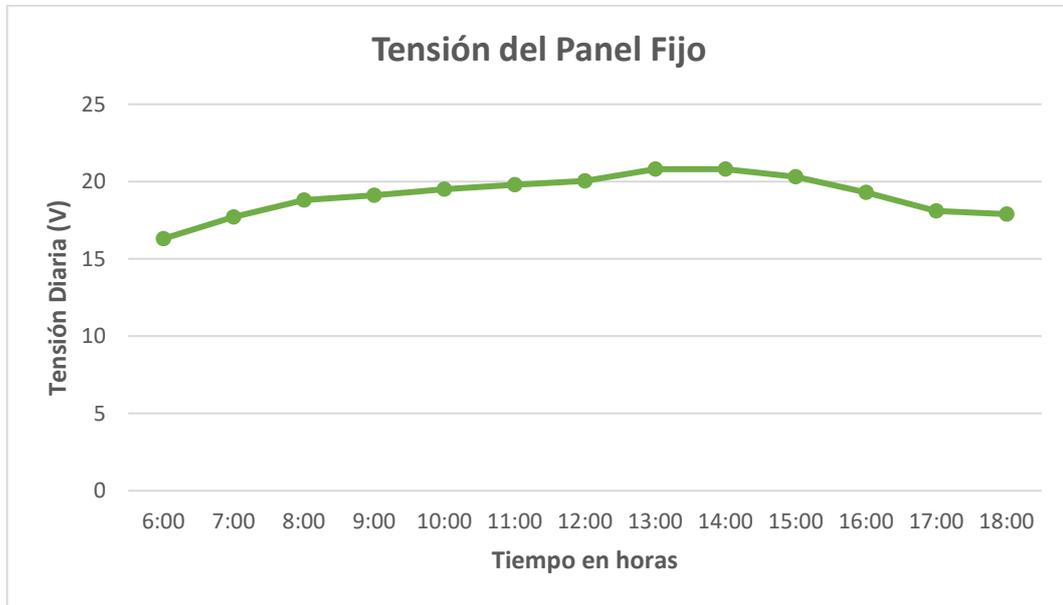


Figura 5.12: Tensión del sistema fotovoltaico fijo.

5.14.2. Análisis de tensión del sistema fotovoltaico móvil

En la figura 5.13 se muestra el nivel de tensión medido por el sistema fotovoltaico móvil, mediante el cual se aprecia claramente un nivel de energía solar más elevado que el sistema fijo, esto al poseer grados de inclinación con respecto al sol, los datos a evaluar son los del promedio de tensiones en la tabla 5.5.

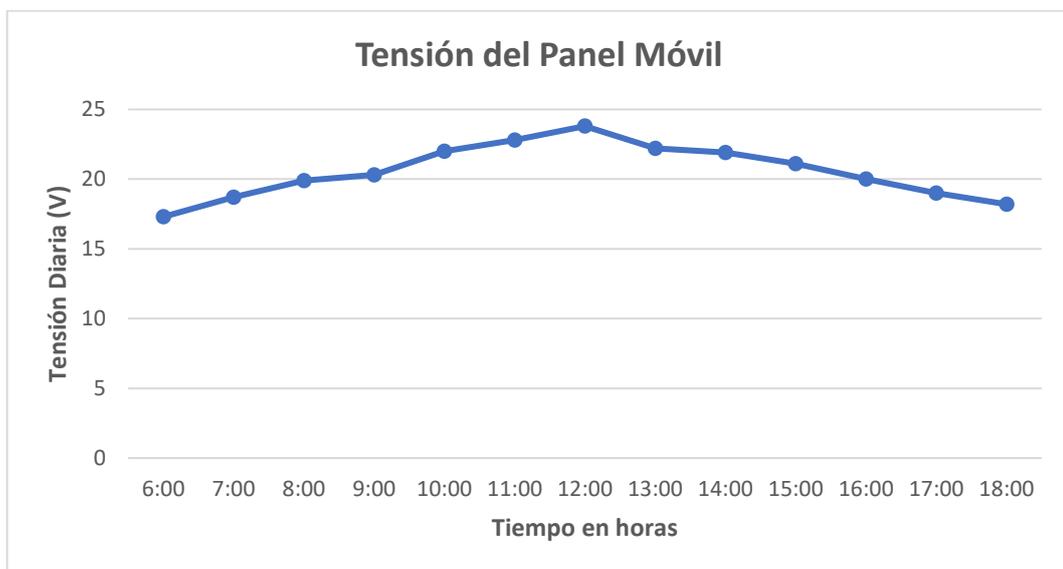


Figura 5.13: Tensión del sistema fotovoltaico móvil.

Para una mejor visualización de captación de energía solar obtenida entre los dos sistemas fotovoltaicos se muestra la figura 5.14. Donde se observa la diferencia de tensión global, al tener un sistema fotovoltaico fijo y un sistema móvil.

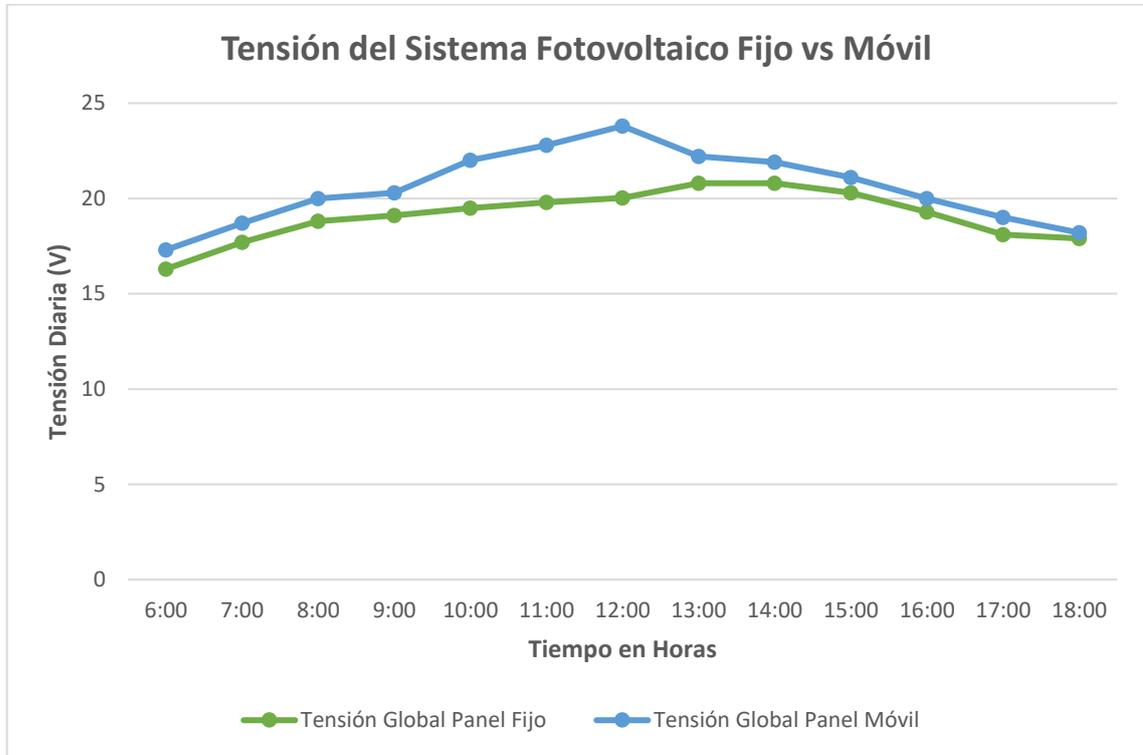


Figura 5.14: Tensión del sistema fotovoltaico fijo vs el móvil.

En la figura 5.14 se puede apreciar que a las 12:00 PM, se tiene el mayor aprovechamiento de irradiación solar, debido a que el sistema de control determina la hora exacta y envía una señal eléctrica al actuador que se encuentra anclado a el sistema de paneles solares fotovoltaicos para que se posicionen a 0° aproximadamente permitiendo aprovechar la mayor cantidad de irradiación solar. Al comparar el sistema fijo con el móvil se calcula que hay una ganancia del 12% mayor en los paneles con el sistema de seguimiento solar.

5.15. PRESUPUESTO

Durante el proceso de la implementación han interferido algunos factores determinantes como: el valor de equipos, tiempo de construcción y pruebas por lo cual infiere en los costos que se muestran a continuación, tomando en cuenta las fluctuaciones del mercado de los diferentes elementos.

5.15.1. Presupuesto global del proyecto

Tabla 5.6: Presupuesto global del proyecto.

Rubros	Total
Materiales y Suministro	\$ 1247,15
Gastos Indirectos	\$ 562,00
Gastos Imprevistos	\$ 10,00
TOTAL	\$ 1819,15

5.15.2. Gastos directos totales

Tabla 5.7: Gastos directos totales

Materiales y Suministros	Cantidad	Precio	Precio Total
Actuador Eléctrico Lineal PA-04-40-400	1	\$ 494,15	\$ 494,15
Tarjeta de control DGIT para seguimiento solar de 1 eje	1	\$ 660	\$ 660
Tubo estructural cuadrado galvanizado Pulg 1 ½ X 1.5	1	\$ 19,75	\$ 19,75
Pernos de expansión ISO 4014 - M12 X 45	10	\$ 0,50	\$ 5,00
Pintura	2	\$ 2,15	\$ 4,30
Cable gemelo AWG 16	20	\$ 0,60	\$ 12
Rodenas de presión F02 X 1/2	15	\$ 0,11	\$ 1,65
Pernos D12HF 3/8 X 2 ½ y F12HF 1/2x 2 1/2 H. Fino	2	\$ 0,50	\$ 1,00
SIKA FILL Blanco Impermeabilizante para techos	1	\$ 38,00	\$ 38,00
Llave mixta #14, #15, #19	3	\$ 0,60	\$ 1,80
Brocas concreto/ hierro 1/2	2	\$ 1,50	\$ 1,50
Platina de acero 20x3mm	4	\$ 2,00	\$ 8,00
TOTAL			\$ 1247,15

5.15.3. Gastos indirectos

Dentro de los gastos indirectos están las horas invertidas en el diseño, construcción, tiempo empleado en la implementación y pruebas de funcionamiento, todo lo detallado permite determinar el costo de mano de obra según el salario mínimo ecuatoriano por un ayudante electromecánico que es de 450 dólares americanos.

$$\# \text{ horas} = 8 \text{ horas} \times 20 \text{ días}$$

$$\# \text{ horas} = 160 \text{ horas}$$

$$\text{Costo/hora} = \frac{450}{160}$$

$$\text{Costo/hora} = 2,81\$$$

5.15.4. Gastos indirectos totales

Tabla 5.8: Gastos indirectos totales

Horas de trabajo	Actividad	Valor Unitario (\$)	Valor Total (\$)
80	Diseño estructural	\$ 2,81	\$ 224,80
70	Implementación	\$ 2,81	\$196,70
50	Pruebas de funcionamiento	\$ 2,81	\$ 140,50
TOTAL			\$ 562,00

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

- Mediante la revisión bibliográfica, se determinó que el sistema de control por posición astronómica realizado es más fiable debido a que en condiciones climáticas no distorsiona la trayectoria de los paneles solares con un margen de error de posicionamiento de un valor como mínimo de $\pm 1^\circ$ esto debido a la histéresis que genera el sistema.
- Al realizar el dimensionamiento de los equipos se tuvo como resultado que los actuadores lineales deben tener una fuerza mayor a 1000 N (225 lbf), una carrera de 1000 mm, y un sensor inclinómetro con una resolución de 0.1°, lo que nos permite tener mayor control de movimiento de los paneles, además cada equipo seleccionado tiene un grado de protección IP66.
- En la instalación del equipo se configuró los límites con un máximo de -30° de inclinación en sentido este, y 30° en sentido oeste, teniendo en cuenta que al sobrepasarlos se compromete la integridad mecánica de la estructura.
- Con el sistema de control de posición en funcionamiento se determinó que la generación de tensión se eleva en un 12% más que el panel solar en configuración fija.

6.2. RECOMENDACIONES

- Con la finalidad de ampliar el alcance del proyecto se podría implementar un sistema de visualización HMI, mediante comunicación RS485, para poder visualizar los datos de posición, ángulos de inclinación en diferentes horas del día.
- Se podría llevar a cabo la implementación de un sistema de comunicación y adquisición de datos para verificar la ganancia porcentual de la energía generada con el sistema de seguimiento solar móvil.
- En cuanto a proyecciones futuras en el sistema de paneles solares fotovoltaicos se puede acoplar el número de filas y paneles solares que se requiera luego de realizar el diseño de un eje, el cual permita acoplar al vástago del actuador el número de filas determinadas a acoplar.
- Para verificar la ganancia y visualizar los datos de programación se puede incorporar una interfaz HMI, debido a que el sistema de control cuenta con un sistema de comunicación en bus diferencial multipunto RS485

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] N. Machado Toranzo, A. Lussó Cervantes, L. L. Oro Carralero, J. Bonzon Henríquez y O. Escalona Costa, «Seguidor Solar, optimizando el aprovechamiento de la energía solar,» *SCIELO*, vol. 36, nº 2, 2015.
- [2] D. E. M.J. Clifford, «Diseño de un novedoso seguidor solar pasivo,» *ELSEVIER*, vol. 77, nº 3, pp. 269-280, 2004.
- [3] C. R. Batista Rodriguez y R. I. Urquiza Salgado, «Cálculo y análisis de la máxima eficiencia anual de los seguidores solares,» *Entre Ciencia E Ingeniería*, vol. 12, nº 24, pp. 25 - 31, 23 05 2019.
- [4] REN21 Secretariat, «Renewables 2018 Global Status Report,» Paris, REN21, 2018.
- [5] REN21 Secretariat, *Renewables 2019 Global Status Report*, Paris, 2019.
- [6] T. Partridge, «Inter Press Service,» 03 02 2021. [En línea]. Available: <https://ipsnoticias.net/2021/02/proyecto-solar-aromo-reto-las-renovables-ecuador/>. [Último acceso: 04 12 2021].
- [7] A. Sabri Allw y I. Hameem Shallal, «EVALUATION OF PHOTOVOLTAIC SOLAR POWER OF A DUAL-AXIS,» *JOURNAL OF SOUTHWEST JIAOTONG UNIVERSITY*, vol. 55, nº 1, p. 9, 2020.
- [8] N. A. Kelly y T. L. Gibson, «Improved photovoltaic energy output for cloudy conditions with a solar tracking system,» *ELSEVIER*, 2009.
- [9] A. Escobar Mejia, M. Holguín Londeño y J. C. Osorio R., «Diseño e implementación de un seguidor solar para la optimización de un sistema fotovoltaico,» *Scientia et Technica*, nº 44, p. 6, 2010.
- [10] J. M. Enrique, J. M. Andújar y M. A. Bohórquez, «A reliable, fast and low cost maximum power point tracker for photovoltaic applications,» *ELSEVIER*, p. 11, 2009.
- [11] E. Turrillas Solabre y J. Aginaga García, «Estudio comparativo de la eficiencia,» UPNA, Pamplona, 2014.
- [12] I. A. Coronel Villavicencio, «Estudio de sistemas híbridos con seguimiento solar para la comunidad de Yuwints en el Oriente Ecuatoriano,» Leiria, 2017.
- [13] J. A. Vilcanqui Apaza, «Estudio para el desarrollo de un seguidor solar de dos ejes auto configurable para paneles fotovoltaicos,» Lima, 2020.
- [14] Universidad de Caldas - Biblioteca Koha, *Universidad de Caldas - Biblioteca Koha › Detalles de: Instalaciones solares fotovoltaicas*.
- [15] D. Vaca Revelo y F. Ordóñez, «Mapa solar del Ecuador,» SCINERGY, Quito, 2019.
- [16] J. Cevallos Sierra y J. Ramos Martin, «Spatial assessment of the potential of renewable energy: The case of Ecuador,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pp. 1154-1165, 2018.
- [17] Monografias.com, «La energía solar fotovoltaica y sus aplicaciones».

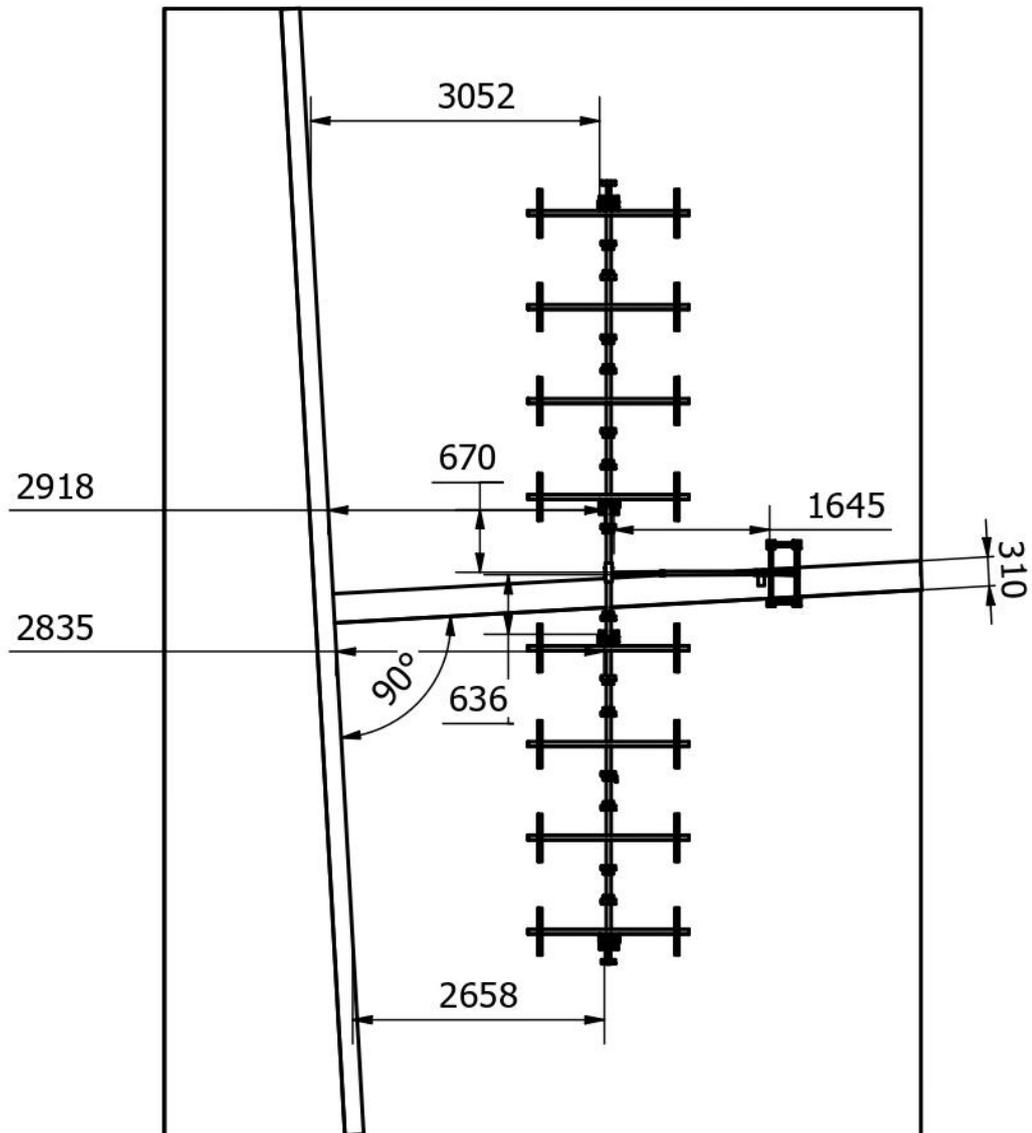
- [18] G. F. Velasco y E. Cabrera, *Generación solar fotovoltaica dentro del esquema de generación distribuida para la provincia de Imbabura*, Quito: ESPE, 2008.
- [19] CONELEC, *Atlas solar del Ecuador*, 2008.
- [20] N. R. Flores Rivera y M. Á. Domínguez Ramírez, «Medición de la eficiencia energética de los paneles solares de silicio,» Puebla, 2015.
- [21] Solarweb.net, «Mala suerte con el sol,» 16 07 2018. [En línea]. Available: <https://www.solarweb.net/forosolar/fotovoltaica-sistemas-aislados-la-red/44082-mala-suerte-sol2.html>. [Último acceso: 23 01 2022].
- [22] LasDiferencias.com, «Diferencias Entre Equinoccio y Solsticio,» [En línea]. Available: <https://lasdiferencias.com/diferencia-equinoccio-solsticio/>. [Último acceso: 22 01 2022].
- [23] Y. Vallejo, «UNAM Global,» 22 06 2018. [En línea]. Available: <https://www.ecosdelcombeima.com/actualidad/nota-128266-sabe-que-es-el-solsticio-de-verano>. [Último acceso: 23 01 2022].
- [24] S. Balaguer, *Seguidor solar de dos ejes*, Onda, 2016.
- [25] «Curso de Energía Solar Fotovoltaica».
- [26] EcoInventos, «EcoInventos green technology,» 04 11 2021. [En línea]. Available: <https://ecoinventos.com/como-evitar-impacto-sombras-paneles-solares/>. [Último acceso: 25 11 2021].
- [27] M. Pérez, «conermex te conectas con el sol,» [En línea]. Available: <https://www.conermex.com.mx/blog-sombrasenpaneles.html>.
- [28] S. A. Muñiz Domínguez, *Implementación de mecanismo y algoritmo de control para posicionamiento de paneles solares para seguimiento del sol*, México, 2018.
- [29] G. B. Camacáz Pérez, *Diseño e implementación de un sistema automático de seguimiento solar para un generador termo solar*, Ibarra, 2016.
- [30] . G. P. Vaca Padilla y . J. . S. Vega Toaquiza, «IMPLEMENTACIÓN DE UN SEGUIDOR SOLAR DE 2 EJES PARA UN SISTEMA FOTOVOLTAICO DE 560 W,» Latacunga, 2021.
- [31] M. Mayer, M. Cáceres, A. Firman y L. H. Vera, «Desarrollo de algoritmos de control de un sistema seguidor para la medición de las componentes de la radiación solar,» *ResearchCHGate*, vol. 4, p. 198, 2018.
- [32] L. Taian Xinpeng Energy Technology Co., «Tracking Control Manual». 03 01 2019.
- [33] Studylib.es, «Cálculo de las pérdidas de radiación solar por sombras,» 13 11 2015. [En línea]. Available: <https://studylib.es/doc/105142/c%C3%A1lculo-de-las-p%C3%A9rdidas-de-radiaci%C3%B3n-solar-por-sombras>. [Último acceso: 23 01 2022].
- [34] M. Judy, «Made in China,» [En línea]. Available: https://es.made-inchina.com/co_esolarfirst/product_Horizontal-Single-Axis-Solar-Tracker-Flat-SingleAxis-Tracking_esheruiou.html.
- [35] «LBA INDUSTRIAL,» [En línea]. Available: <http://www.lbaindustrial.com.mx/seguidor-solar/>.

- [36] antusol, «antusol.webcindario.com,» [En línea]. Available: <https://antusol.webcindario.com/instalacion.html>.
- [37] Q. E. SOLUTIONS, «QKSOL ENERGY SOLUTIONS,» [En línea]. Available: <https://qksol.com/deger/seguidores-solares-de-2-ejes-deger/>.
- [38] A. R. Marisanty, S. Barra, C. Nicasio, S. Bonafé, C. Herrán y L. Abadía, «Diseño, construcción y ajuste de un prototipo de simulador de la trayectoria solar.,» Avances en
- [39] Energías Renovables y Medio Ambiente Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, vol. 11, 2007.

8. ANEXOS

Anexo 2. Plano de posicionamiento de la estructura fotovoltaica

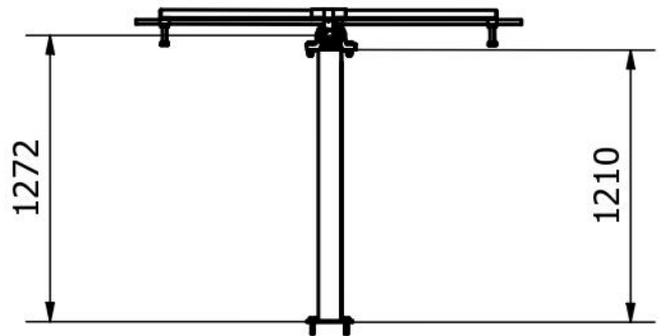
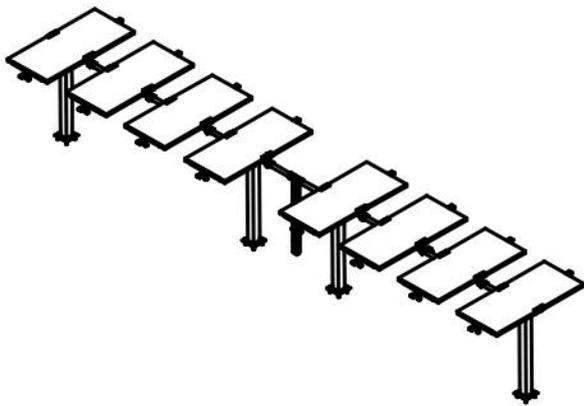
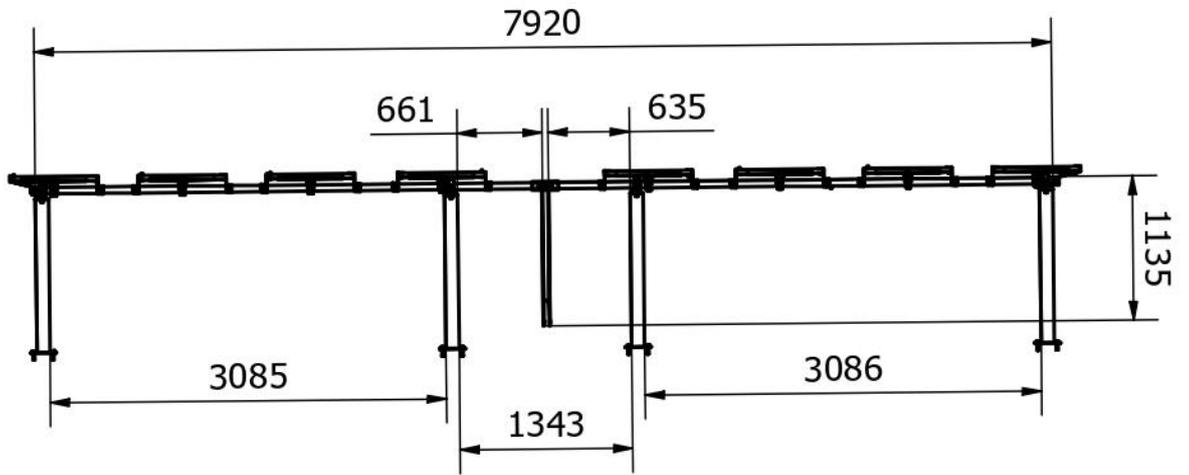
Vista Superior del Sistema Fotovoltaico



Diseño de HP	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha	
INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA			Plano del Sistema Fotovoltaico		
			planos_estructura	Edición	Hoja 1 / 1

Anexo 3. Plano de dimensiones de la estructura fotovoltaica

VISTA FRONTAL

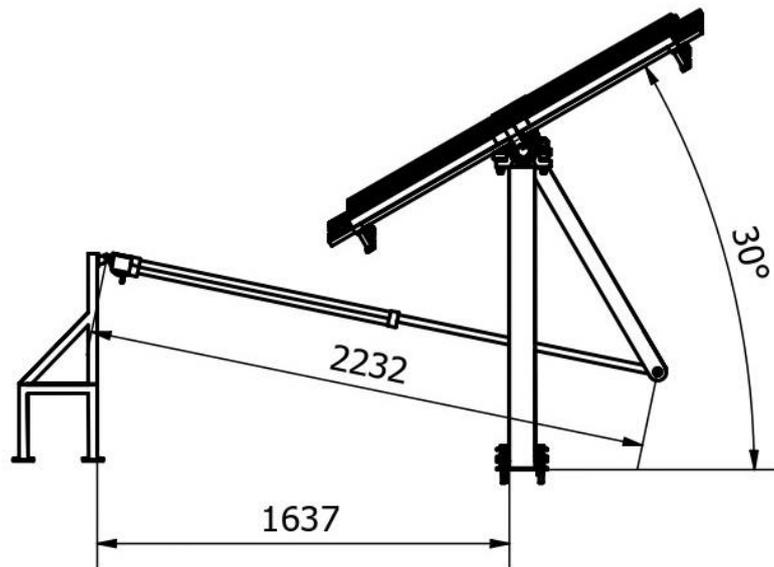


VISTA LATERAL

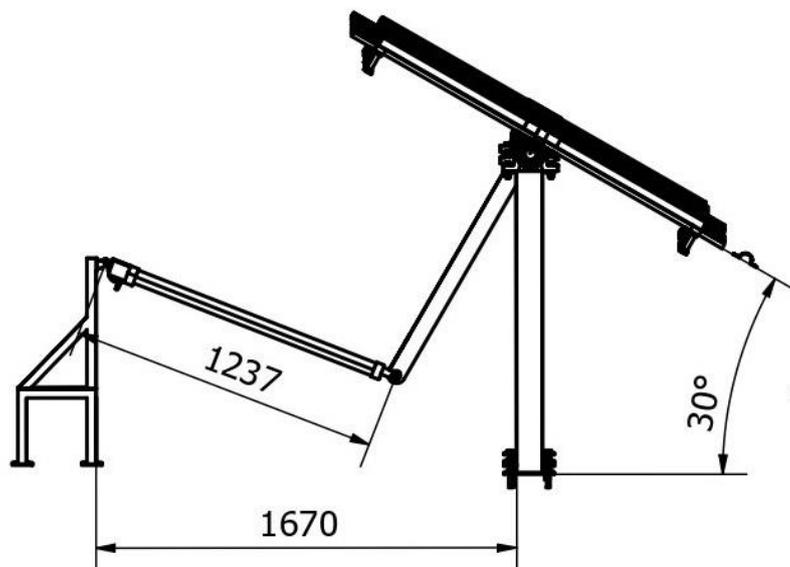
Diseño de HP	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha	
INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA			Planos del Sistema Fotovoltaico		
				Edición	Hoja 1 / 1

Anexo 4. Ángulos máximo y mínimo con respecto al vástago del actuador

Ángulo con el vástago extendido



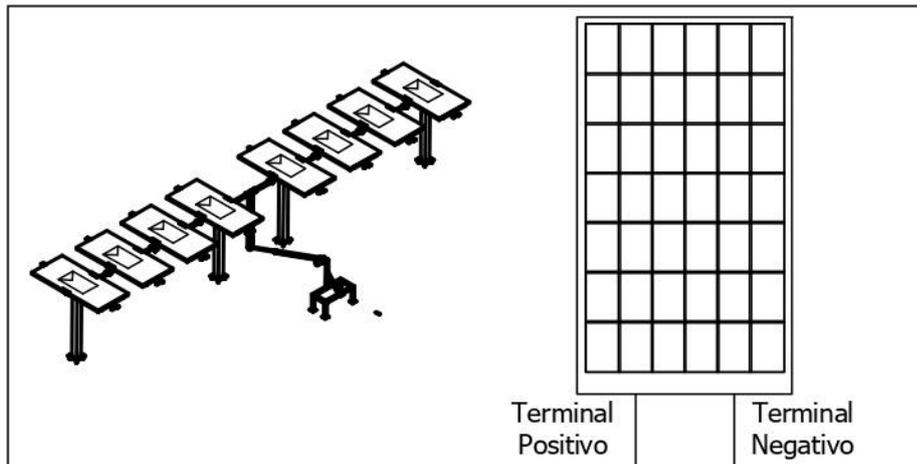
Ángulo con el vástago retraído



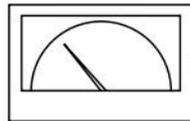
Diseño de HP	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha	
INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA			Determinación de Ángulos Mínimo y Máximo		
			planos_cotas_superior	Edición	Hoja 1 / 1

Anexo 5. Conexión para la medición de tensiones en los paneles solares

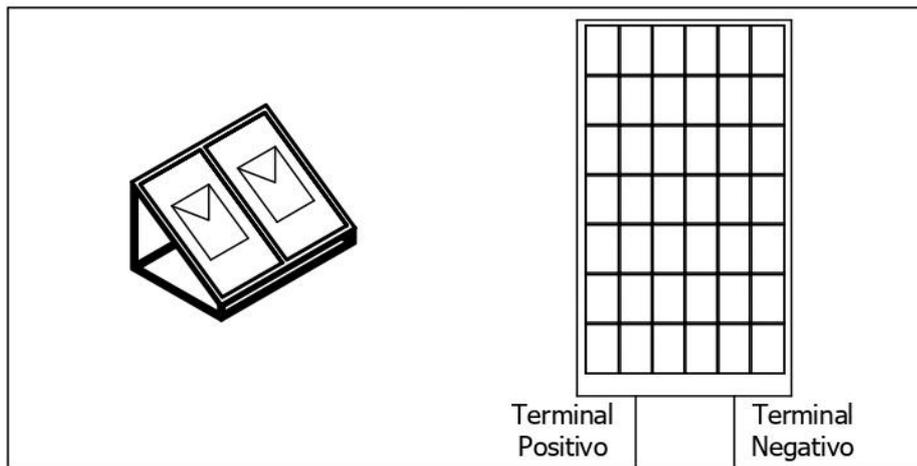
CONEXIÓN PARA MEDIR TENSIONES DEL PANEL MÓVIL



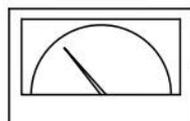
Datos de Tensión



CONEXIÓN PARA MEDIR TENSIONES DEL PANEL FIJO



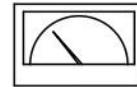
Datos de Tensión



SIMBOLOGÍA



Paneles solares

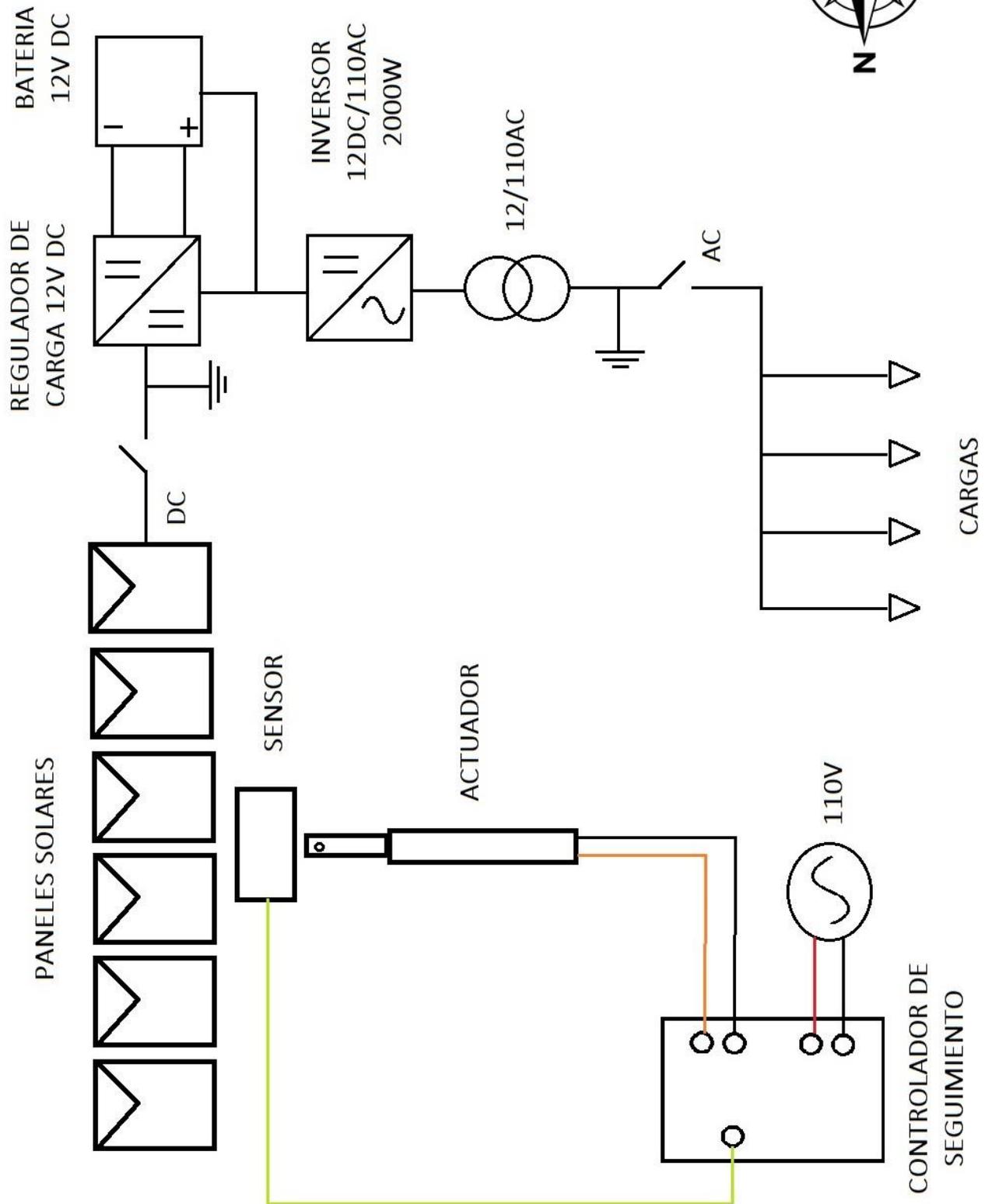


Voltímetro

Diseño de HP	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha
-----------------	--------------	--------------	-------	-------

INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA	Plano del Sistema Fotovoltaico	
	Edición	Hoja 1 / 1

Anexo 6. Diagrama Unifilar del sistema fotovoltaico



Diseño de HP	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha	
-----------------	--------------	--------------	-------	-------	--

Anexo 7.

MANUAL DE USUARIO



CONTROLADOR DE SEGUIMIENTO SOLAR DE UN EJE

ÍNDICE

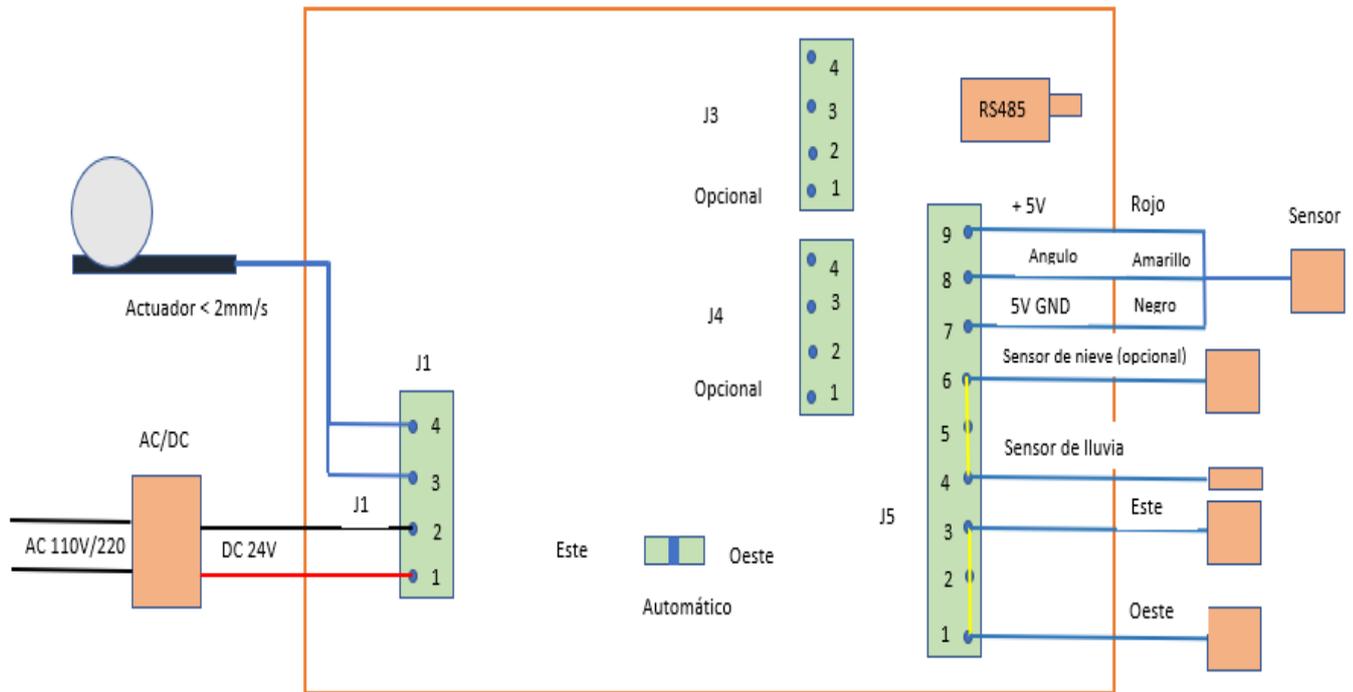
1.	Funciones y especificaciones	98
2.	Instalación y cableado	98
3.	Prueba del controlador	99
4.	Como funciona	99
5.	Errores comunes	100

1. FUNCIONES Y ESPECIFICACIONES

Funciones Principales	Especificaciones	
Seguimiento este-oeste basado en algoritmos	Precisión de seguimiento	$\approx \pm 2^\circ$
Protección de sobrecarga y cortocircuito	Rango de seguimiento	$\pm 45^\circ \sim 60^\circ$
Protección viento/lluvia	Potencia de entrada	CA 50/60 HZ, 110V/220V, CC 12V
Opción de seguimiento manual	Voltaje de salida	CC 12V/8A
Control de parada programada y control de parada forzada	Velocidad de giro del rastreador	<0,035 rpm
Trabaja automáticamente	Puertos disponibles	Sensor de viento, lluvia nieve, (NO)
Comunicación RS485	Grado de protección	Sensor IP69. Controlador IP65
	Temperatura de funcionamiento	$-20^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$

2. INSTALACIÓN Y CABLEADO

1. Instalar controlador en la columna principal (opcional)
2. Instalar el sensor en el eje principal, con el orificio del cable orientado hacia el Norte



3. PRUEBA DEL CONTROLADOR

- No encienda el controlador hasta que el sensor haya sido instalado. De lo contrario el control de parada NO funcionara.
- Una vez encendido (RS485), la luz de color azul comenzara a parpadear.
- Presione el botón de color negro (interruptor manual) y el rastreador debe moverse en la dirección seleccionada (Este-Oeste).
- Cuando posicione (interruptor manual) en neutral, el rastreador iniciara el modo de seguimiento automático.

4. COMO FUNCIONA

- **Seguimiento automático:** En este modo, la luz de (DVE) se enciende durante 10 segundos, luego la luz (Oeste) se enciende, posteriormente (Motor) comienza a trabajar. El seguimient9o automático se detiene cuando el rastreador ha captado el punto más alto del sol.
- **Protección de sobrecarga:** Cuando la luz (Sobrecarga) se enciende, el seguimiento se detiene. Una vez que se borre el error, reinicie y espere que el sistema se reanude.

- **Protección contra el viento:** Cuando hay viento fuerte (Viento), la luz se enciende y el rastreado se nivela. Cuando cesa el viento, el sistema reanuda el seguimiento después de un breve retraso.
- **Protección contra lluvia:** Con señal de lluvia (Lluvia) y (Este) las luces se encienden el rastreador se moverá hacia el este. El sistema se reanuda después de que se cancela la señal.
- **Almacenamiento nocturno:** Este modo comienza después de las 21:00 PM.

5. ERRORES COMUNES

Errores	Solución rápida
1. Ni el seguimiento automático ni el seguimiento manual funcionan.	Portal de prueba (J1) y ver si el voltaje de 24V es normal, y si (F) el fusible esta quemado.
2. Cuando se enciende por primera vez el rastreador se mueve en dirección opuesta.	(Sensor) instalado en dirección incorrecta, o (Interruptor Manual) no está en posición neutral.
3. El seguimiento se desvía demasiado.	Ajustar (Sensor) ángulo Este-Oeste.
4. No se mueve en una dirección determinada.	Verifique el interruptor de límite para esa dirección.
5. La luz (Sobrecarga) esta encendida y al reiniciar la alimentación no se borra.	Verifique si el rastreador esta atascado y verifique si la corriente de trabajo del motor es demasiado alta.
6. Cuando el motor arranca, está en estado intermitente	El voltaje de entrada es demasiado bajo.