



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

**PROPUESTA TECNOLÓGICA**

**“IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE POSICIÓN  
ANGULAR PARA UNA ESTACIÓN FOTOVOLTAICA DE 560W DE 2 EJES”**

Proyecto de Titulación presentado previo a la obtención del Título de Ingeniero  
Electromecánico.

**Autores:**

Chisaguano Chicaiza Cristian Rosendo

Hurtado Buni Christian Fabricio

**Tutor:**

Ing. MsC. Luis Rolando Cruz Panchi

**LATACUNGA – ECUADOR**

**2021 - 2022**



Universidad  
Técnica de  
Cotopaxi



Ingeniería  
Electromecánica

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, Chisaguano Chicaiza Cristian Rosendo y Hurtado Buni Christian Fabricio en calidad de estudiantes de la Universidad Técnica de Cotopaxi, declaramos ser autores de la presente propuesta tecnológica: **“IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE POSICIÓN ANGULAR PARA UNA ESTACIÓN FOTOVOLTAICA DE 560W DE 2 EJES”**, siendo el Ing. MsC. Luis Rolando Cruz Panchi; 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 del 2022

Chisaguano Chicaiza Cristian Rosendo

CC: 055040001-4

Hurtado Buni Christian Fabricio

CC: 175000477-0



Universidad  
Técnica de  
Cotopaxi



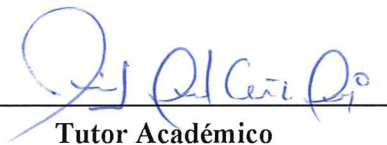
Ingeniería  
Electromecánica

## AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE TITULACIÓN

En calidad de Tutor del Trabajo Tecnológico sobre el título:

**“IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE POSICIÓN ANGULAR PARA UNA ESTACIÓN FOTOVOLTAICA DE 560W DE 2 EJES”**, de Chisaguano Chicaiza Cristian Rosendo y Hurtado Buni Christian Fabricio, de la Carrera de Ingeniería Electromecánica, considero que dicho Informe Investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científicos-técnicos suficientes para ser sometidos a la 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 del 2022



---

**Tutor Académico**

Ing. MsC. Luis Rolando Cruz Panchi

CC: 050259517-6



Universidad  
Técnica de  
Cotopaxi



Ingeniería  
Electromecánica

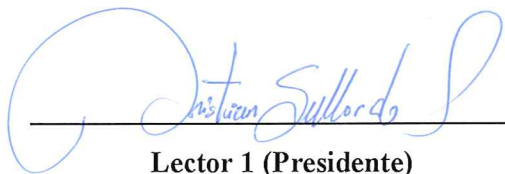
## APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

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: Chisaguano Chicaiza Cristian Rosendo y Hurtado Buni Christian Fabricio, con el Título de Proyecto de Titulación: “IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE POSICIÓN ANGULAR PARA UNA ESTACIÓN FOTOVOLTAICA DE 560W DE 2 EJES”, 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 2022

Para constancia firman:



---

**Lector 1 (Presidente)**

Ing. MsC. Cristian Fabian Gallardo Molina

CC: 050284769-2

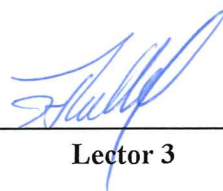


---

**Lector 2**

PhD. Enrique Torres Tamayo

CC: 175712194-0



---

**Lector 3**

Dr. Héctor Luis Laurencio Alfonso

CC: 175836725-2



Universidad  
Técnica de  
Cotopaxi



Ingeniería  
Electromecánica

## AVAL DE IMPLEMENTACIÓN

Con el presente documento, se pone en constancia que los estudiantes; Chisaguano Chicaiza Cristian Rosendo y Hurtado Buni Christian Fabricio, de la Carrera de Ingeniería Electromecánica de la Universidad Técnica de Cotopaxi, han desarrollado el proyecto tecnológico “IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE POSICIÓN ANGULAR PARA UNA ESTACIÓN FOTOVOLTAICA DE 560W DE 2 EJES” y realizaron la entrega del módulo 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 del 2022



Ingeniería  
Electromecánica

*Cristian Gallardo*

**DIRECTOR DE LA CARRERA**

**INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

Ing. MsC. Cristian Fabian Gallardo Molina

CC: 050284769-2

## **AGRADECIMIENTO**

*A Dios, por guiarme en mi camino dándome el valor suficiente de tomar decisiones correctas en los momentos difíciles de mi vida, a mis padres, a mis hermanos y hermanas ya que siempre me aconsejaron, me apoyaron y demostraron la gran fe que tenían en mí para concluir mi carrera universitaria. A la Universidad Técnica de Cotopaxi por ser un templo de conocimiento; a los catedráticos de la Carrera de Ingeniería Electromecánica y a mi tutor de Tesis que me brindó sus consejos y enseñanzas para la realización de este trabajo de investigación. De igual manera agradecer a mis amigos y demás personas que de múltiples maneras contribuyeron y me apoyaron en la realización del presente trabajo.*

***Cristian Rosendo Chisaguano Chicaiza***

## **AGRADECIMIENTO**

*En primer lugar quiero agradecer a Dios, por su fortaleza, grandeza, que ante todo, está presente en mí y hace posible cada paso que doy, a mi querida Universidad Técnica de Cotopaxi por abrirme las puertas a la prestigiosa Carrera de Ingeniería Electromecánica y a sus docentes, quienes han compartido los conocimientos necesarios tanto académicos como humanísticos, para desenvolverme en la sociedad como profesional, también, a mis compañeros y amigos, quienes compartieron su conocimiento, alegrías y tristezas, y a mi familia que durante estos cinco años estuvieron apoyándome y lograron que este sueño se haga realidad.*

***Christian Fabricio Hurtado Buni***

## **DEDICATORIA**

*Dedico este proyecto investigativo de manera muy especial a mis queridos padres Rosendo y Olga por ser un ejemplo de sacrificio, esfuerzo y perseverancia; a mis hermanos y hermanas que sembraron en mí, las bases de responsabilidad y deseos de superación, para que yo pueda culminar con éxito este objetivo. De igual manera a mi novia Denisse por estar a mi lado siendo esa fortaleza para llegar lejos; a mis maestros quienes me guiaron con sus sabias enseñanzas hasta obtener mi anhelado título y como no a mis amigos por su apoyo incondicional.*

***Cristian Rosendo Chisaguano Chicaiza***



## **DEDICATORIA**

*Dedico este proyecto a mis padres Ángel y María por ser los pilares fundamentales a lo largo de mi formación profesional, quienes no me dejan rendirme ante ninguna adversidad y me enseñan cada día a ser una mejor persona, a mis hermanos por estar siempre presentes acompañándome, a todo el resto de mi familia y amigos que de una u otra manera me han llenado de sabiduría en el desarrollo de la tesis.*

***Christian Fabricio Hurtado Buni***



## ÍNDICE DE CONTENIDO

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 DE CONTENIDO.....	X
ÍNDICE DE TABLAS .....	XIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIV
RESUMEN.....	XVI
ABSTRACT.....	XVII
AVAL DE TRADUCCIÓN .....	XVIII
1. INFORMACIÓN GENERAL .....	19
2. INTRODUCCIÓN .....	20
2.1 El problema.....	20
2.1.1 Situación Problémica.....	20
2.1.2 Matriz Causa Efecto .....	21
2.1.3 Formulación del Problema .....	21
2.2 Objeto y campo de acción .....	22
2.2.1 Objeto de estudio.....	22
2.2.2 Campo de Acción.....	22
2.3 Beneficiarios .....	22
2.3.1 Directos .....	22
2.3.2 Indirectos.....	22
2.4 Justificación.....	22
2.5 Hipótesis.....	23
2.6 Objetivos .....	23
2.6.1 Objetivo general .....	23
2.6.2 Objetivos específicos.....	23



2.7	Sistema de tareas .....	24
3.	FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA .....	26
3.1	Antecedentes de investigación .....	26
3.2	ENERGÍA SOLAR .....	30
3.2.1	Ventajas de la energía solar .....	31
3.2.2	Desventajas de la energía solar .....	31
3.2.3	Células y módulos fotovoltaicos .....	31
3.3	DISPONIBILIDAD SOLAR EN EL ECUADOR .....	32
3.4	RADIACIÓN SOLAR .....	33
3.4.1	Radiación Solar en Ecuador .....	35
3.4.2	Instrumentos para la medida de la irradiancia .....	35
3.5	Posición del sol. ....	35
3.6	Efectos de sombras en sistemas de energía solar .....	39
3.7	SEGUIMIENTO SOLAR .....	40
3.7.1	Mecanismos según el grado de libertad .....	41
3.7.2	Tipos de seguidores según el número de ejes.....	42
3.7.3	Tipos de seguidores según el algoritmo de seguimiento .....	44
4.	MATERIALES Y MÉTODOS .....	45
4.1	METODOLOGÍA .....	45
4.2	DECLARACIÓN DE VARIABLES .....	46
4.2.1	Operacionalización de las variables .....	46
4.2.2	Métodos, técnicas e instrumentos.....	46
4.3	Descripción de la implementación del sistema de control de posición .....	47
4.3.1	Inclinaciones máximas y mínimas del sistema.....	48
4.3.2	Desarrollo del algoritmo matemático de seguimiento astronómico .....	49
4.4	SISTEMA DE CONTROL.....	52
4.5	Parámetros del controlador.....	54
4.5.1	Diagrama de flujo del sistema.....	55
4.6	Análisis para la selección del actuador lineal.....	55
4.7	Desarrollo de la interfaz .....	56
4.7.1	Desarrollo.....	57
4.8	Conexión en la red rs485.....	61
4.9	INCLINACIÓN Y ORIENTACIÓN PARA PANELES FIJOS .....	62
4.9.1	Orientación .....	62
4.9.2	Inclinación.....	62
4.10	Diseño del experimento práctico.....	63
5.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS .....	64



5.1	validación de funcionamiento .....	64
5.2	Simulación del algoritmo de seguimiento.....	65
5.3	Análisis de la irradiación del sistema fotovoltaico fijo y el móvil .....	67
5.3.1	Análisis de la irradiación del sistema fotovoltaico fijo .....	67
5.3.2	Análisis de la irradiación del sistema fotovoltaico móvil .....	67
5.4	Análisis del aprovechamiento del sistema fotovoltaico fijo y móvil.....	69
5.4.1	Sistema fotovoltaico fijo .....	69
5.4.2	Sistema fotovoltaico móvil.....	70
5.4.3	Sistema fotovoltaico fijo y móvil.....	71
5.4.4	Sistema fotovoltaico fijo en función de la inclinación .....	72
5.4.5	Sistema fotovoltaico móvil en función de la inclinación .....	72
5.5	Tabulación de resultados .....	73
5.6	consumo de energía del motor comparado con el aumento de producción de energía.....	75
5.7	Presupuesto .....	76
5.8	Análisis de impacto .....	77
5.8.1	Impacto tecnológico .....	77
5.8.2	Impacto ambiental .....	77
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	77
6.1	Conclusiones .....	77
6.2	Recomendaciones.....	78
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	79
8.	ANEXOS.....	81



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Radiación obtenida con ángulos óptimos para cada tipo de seguidor .....	29
Tabla 3.2 Captación media anual de sistema FV fijo y con seguimiento.....	30
Tabla 3.3 Porcentaje de aumento de voltaje para los algoritmos de seguimiento .....	30
Tabla 3.4 Ventajas y desventajas según el algoritmo de seguimiento .....	44
Tabla 4.1 Variable independiente.....	46
Tabla 4.2 Variable dependiente.....	46
Tabla 4.3 Métodos, técnicas e instrumentos.....	47
Tabla 4.4 Característica del actuador lineal (ANEXO 3).....	56
Tabla 4.5 Parámetros de configuración del equipo en OPC.....	57
Tabla 4.6 Definición y dirección de los registros.....	58
Tabla 4.7 Inclinación para sistemas fijos .....	62
Tabla 5.1 Resultados del algoritmo astronómico de posicionamiento .....	65
Tabla 5.2 Información que provee el software online SunEarthTools.com .....	66
Tabla 5.3 Tabulación de datos del sistema fotovoltaico fijo y móvil.....	74
Tabla 5.4 Energía consumida por el motor .....	75
Tabla 5.5 Energía aprovechada .....	76
Tabla 5.6 Gastos.....	76



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Diagrama Causa-Efecto .....	21
Figura 3.1 Adición de capacidad de generación fotovoltaica en los años 2008-2018, en [GW].....	26
Figura 3.2 Células FV de silicio poli y monocristalino.....	32
Figura 3.3 Irradiación solar global horizontal anual .....	33
Figura 3.4 Espectro electromagnético de la radiación solar.....	33
Figura 3.5 Tipos de radiación.....	34
Figura 3.6 Trayectoria solar en el plano del observador .....	36
Figura 3.7 Etapas de los equinoccios y solsticios .....	37
Figura 3.8 Solsticio de verano.....	37
Figura 3.9 Ángulos de posición.....	38
Figura 3.10 Coordenadas celestes horarias .....	38
Figura 3.11 Ángulos de posición.....	39
Figura 3.12 Efectos de la sombra en los paneles solares.....	40
Figura 3.13 Comparación fotovoltaica con seguimiento y fijo. ....	41
Figura 3.14 Mecanismo giroscopios .....	42
Figura 3.15 Mecanismo heliostato .....	42
Figura 3.16 Seguidor solar de dos ejes.....	43
Figura 3.17 Seguidor solar de un eje.....	44
Figura 4.1 Esquema de desarrollo .....	47
Figura 4.2 Inclinación Norte-Sur .....	48
Figura 4.3 Inclinación Este-Oeste .....	49
Figura 4.4 Trayectoria solar en la Universidad Técnica de Cotopaxi [32].....	52
Figura 4.5 Diagrama de bloques .....	54
Figura 4.6 Diagrama de flujo del controlador por programación astronómica .....	55
Figura 4.7 Configuración de tags en OPC.....	60



Figura 4.8 Panel frontal del sistema SCADA .....	61
Figura 4.9 Diagrama de bloques .....	61
Figura 4.10 Conexión en la red RS485. ....	62
Figura 4.11 Conexión en cortocircuito del panel móvil.....	63
Figura 4.12 Conexión en cortocircuito del panel fijo.....	64
Figura 5.1 Sistema de control implementado.....	65
Figura 5.2 Irradiación sistema fotovoltaico fijo .....	67
Figura 5.3 Irradiancia del sistema fotovoltaico móvil.....	68
Figura 5.4 Irradiación del sistema fotovoltaico fijo vs el móvil.....	68
Figura 5.5 Generación de corriente del sistema fotovoltaico fijo .....	69
Figura 5.6 Generación de corriente del sistema fotovoltaico fijo sin perturbaciones .....	70
Figura 5.7 Generación de corriente del sistema fotovoltaico móvil.....	70
Figura 5.8 Generación de corriente del sistema fotovoltaico móvil sin perturbaciones.....	71
Figura 5.9 Generación de corriente del sistema móvil y fijo .....	71
Figura 5.10 Corriente del sistema fijo en función de la inclinación.....	72
Figura 5.11 Corriente del sistema móvil en función de la inclinación.....	73



Universidad  
Técnica de  
Cotopaxi



Ingeniería  
Electromecánica

## UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

### FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

**TÍTULO:** “IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE POSICIÓN ANGULAR PARA UNA ESTACIÓN FOTOVOLTAICA DE 560W DE 2 EJES”

**Autores:**

Chisaguano Chicaiza Cristian Rosendo

Hurtado Buni Christian Fabricio

### RESUMEN

El presente proyecto tiene como objetivo implementar un sistema de control de posición a una estación fotovoltaica de 560W, el cual permitió mejorar el aprovechamiento de la radiación solar incidente en la zona en un 30%, inicialmente se realizó la investigación bibliográfica, donde se analizó la trayectoria solar, tipos sistemas de seguimiento y algoritmo de seguimiento, después se dimensionó el actuador lineal para el movimiento de este a oeste, y el algoritmo de seguimiento astronómico que calcula la posición del sol en tiempo real mediante ecuaciones solares las cuales utilizan datos como la ubicación geográfica, fecha y hora, posteriormente se seleccionó el tipo de control ON- OFF que controla el encendido y apagado de los motores de 12V DC que contiene los actuadores lineales, por último se empleó la investigación práctica con el fin de verificar el funcionamiento del sistema con pruebas de operación, donde se comprobó el aprovechamiento de la energía solar de un sistema con control de posición versus un sistema fijo, en los dos casos se midió la corriente de cortocircuito o corriente máxima que puede generar el panel, ambas configuraciones de paneles se probaron en un día soleado, dando como resultado en el sistema fotovoltaico móvil da un incremento en la generación de corriente eléctrica del 19.85% más que un sistema fijo.





Universidad  
Técnica de  
Cotopaxi



Ingeniería  
Electromecánica

**Palabras clave:** Control ON-OFF, actuadores, trayectoria solar, seguimiento astronómico.

## COTOPAXI TECHNICAL UNIVERSITY

### ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES FACULTY

**TITLE:** “IMPLEMENTATION OF AN ANGULAR POSITION CONTROL SYSTEM FOR A 2-AXIS 560W PHOTOVOLTAIC STATION”

#### **Authors:**

Chisaguano Chicaiza Cristian Rosendo

Hurtado Buni Christian Fabricio

### **ABSTRACT**

This project aims to implement a position control system to a photovoltaic station of 560W, which allowed to improve the use of incident solar radiation in the area by 30%, initially literature research was conducted, where the solar trajectory was analyzed, types of tracking systems and tracking algorithm, then the linear actuator was dimensioned for the movement from east to west, and the astronomical tracking algorithm that calculates the position of the sun in real time by solar equations which use data such as geographic location, date and time, The ON-OFF control type was then selected to control the switching on and off of the 12 V DC motors that contain the linear actuators. Finally, practical research was used to verify the performance of the system with operational tests, where the use of solar energy of a system with position control versus a fixed system was verified, In both cases the short-circuit current or maximum current that the panel can generate was measured, both panel configurations were tested on a sunny day, resulting in the mobile photovoltaic system gives an increase in the generation of electric current of 19.85% more than a fixed system.

**Keywords:** ON-OFF control, actuators, solar trajectory, astronomical tracking.

## *AVAL DE TRADUCCIÓN*

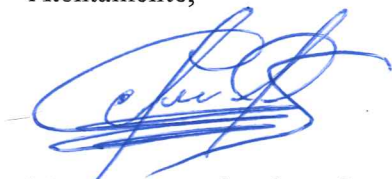
En calidad de Docente del Idioma Inglés del Centro de Idiomas de la Universidad Técnica de Cotopaxi; en forma legal **CERTIFICO** que:

La traducción del resumen al idioma Inglés del proyecto de titulación cuyo título versa: **“IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE POSICIÓN ANGULAR PARA UNA ESTACIÓN FOTOVOLTAICA DE 560W DE 2 EJES”**, presentado por: **Chisaguano Chicaiza Cristian Rosendo y Hurtado Buni Christian Fabricio**, estudiantes de la Carrera de: **Ingeniería en Electromecánica**, perteneciente a la **Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas**, 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 aval para los fines académicos legales.

Latacunga, 08 marzo del 2022

Atentamente,



CENTRO  
DE IDIOMAS

Mg. Marco Paúl Beltrán Semblantes

**DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS-UTC**  
**CI: 0502666514**

## 1. INFORMACIÓN GENERAL

### **Título:**

Implementación de un sistema de control de posición angular para una estación fotovoltaica de 560W de 2 ejes.

### **Fecha de inicio:**

25 de octubre de 2021

### **Fecha de finalización:**

04 de marzo de 2022

### **Lugar de ejecución:**

Zona 3, Provincia de Cotopaxi, Cantón Latacunga, Barrio San Felipe, Universidad Técnica de Cotopaxi.

### **Facultad que auspicia:**

Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas

### **Carrera que auspicia:**

Ingeniería Electromecánica.

### **Proyecto de investigación vinculado:**

Proyecto formativo.

### **Equipo de Trabajo:**

- Ing. MsC. Cruz Panchi Luis Rolando.
- Chisaguano Chicaiza Cristian Rosendo.
- Hurtado Buni Christian Fabricio.

### **Área de Conocimiento:**

Ingeniería, Industria y Construcción

071 Ingeniería y Profesionales Afines

0714 Electrónica y automatización.

### **Línea de investigación:**

Procesos industriales

### **Sublínea de investigación de la Carrera:**

Automatización, control y protecciones de sistemas electromecánicos.

## 2. INTRODUCCIÓN

La energía solar se manifiesta como una opción importante ante el aumento de consumo energético renovable del planeta, debido a que, la cantidad de energía del sol, que llega a la superficie de la tierra en un día, es superior a diez veces la energía total que se consume en nuestro planeta durante un año. A través del efecto fotovoltaico la energía emitida por la radiación del sol puede ser convertida en energía eléctrica.

Para lograr mayor aprovechamiento de la cantidad de energía adquirida de una instalación fotovoltaica existen dos metodologías: La primera consiste en mejorar de forma considerable los componentes internos de un panel fotovoltaico con el fin de que su rendimiento aumente. La segunda consiste en adquirir la mayor cantidad de radiación solar recibida por el panel; para esto se busca que el área del panel fotovoltaico se mantenga en posición perpendicular a la radiación lumínica de la fuente de luz externa. En los sistemas fotovoltaicos existe la posibilidad de implementar un dispositivo adicional que permite aumentar la captación de radiación solar y por ende mejorar la energía suministrada por la instalación, tal dispositivo es considerado un seguidor solar.

### 2.1 EL PROBLEMA

#### 2.1.1 Situación Problemática

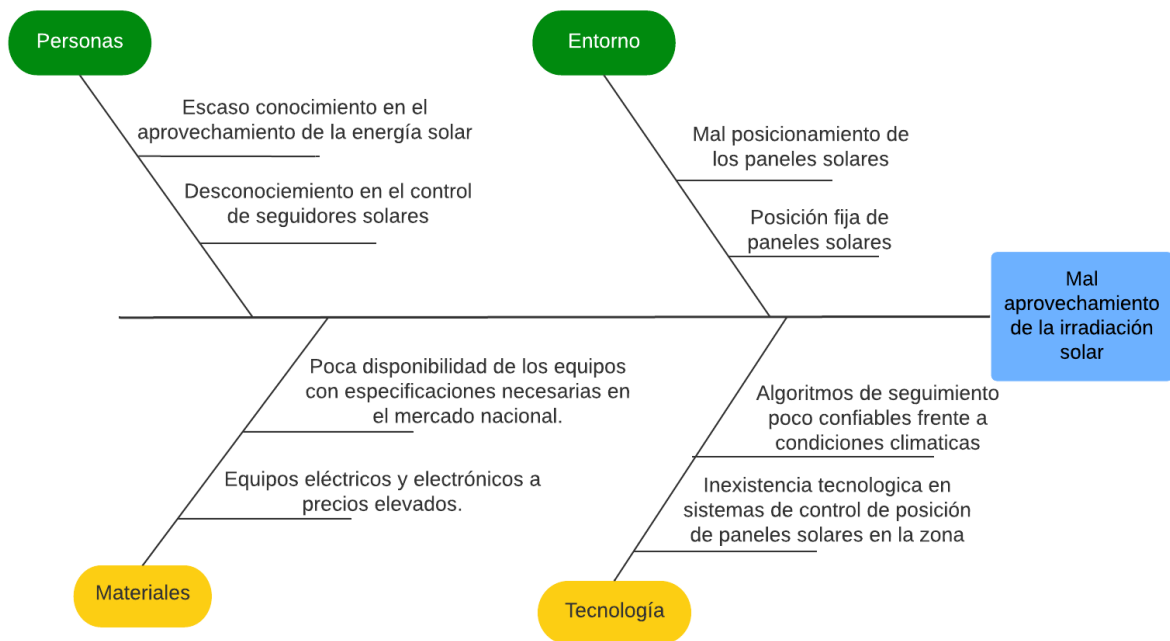
Hoy en día en nuestro planeta ocurren varios acontecimientos, debido al calentamiento global, el efecto invernadero que tiene su inicio en la contaminación ambiental, los escasos recursos, el crecimiento poblacional, demanda de energía, etc. Todo esto ha incentivado a explorar nuevas alternativas energéticas más limpias y eficientes, especialmente se ha registrado que la energía solar ha surgido, dando gran importancia a nivel mundial.

La comunidad científica internacional menciona diversos diseños de Sistemas de Seguimiento Solar que optimizan la energía solar, citando algunos ejemplos se tienen: los Seguidores solares de alta tecnología: *MecaSolar* en España, el Seguidor Solar *SunPower T0*: Máxima producción de energía por hectárea fabricado por la corporación *SunPower* en los Estados Unidos de Norteamérica, el Sistema de seguimiento solar activo *Lorentz-Etrack* del grupo TRITEC S.A en Alemania y los Sistemas de Seguimiento Solar: Energía ERCAM S. A. en España y el GEA-Generación de Energías Alternativas de Chile [1].

Actualmente en nuestro país no existen seguidores solares y algunas empresas que trabajan con sistemas fotovoltaicos, calentadores de agua y otros sistemas de aprovechamiento de la radiación solar, se encuentran completamente fijos, es decir, no aprovechan la mayor cantidad de energía que pudieran. Es por ello que mediante este proyecto se enmarca en aprovechar la mayor cantidad de energía solar posible, usando un sistema que muestre las coordenadas solares y fijación de ángulos en todo momento.

Surge entonces la idea de una alternativa de aprovechar la energía solar, desarrollando el control autónomo de una pequeña central de generación de energía eléctrica fotovoltaica ubicado en la Universidad Técnica de Cotopaxi, basado en el movimiento de los paneles solares para seguir la trayectoria del sol durante todo el día, posicionándose frente a la incidencia de los rayos del sol, de manera que sea lo más perpendicular posible, de modo que sea máximo el aprovechamiento energético.

### 2.1.2 Matriz Causa Efecto



**Figura 2.1** Diagrama Causa-Efecto

### 2.1.3 Formulación del Problema

Mal aprovechamiento de la irradiación solar existente en la zona, debido a un sistema de posicionamiento angular fijo de paneles fotovoltaicos.

## **2.2 OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN**

### **2.2.1 Objeto de estudio**

Sistema de control de posición angular para una estación fotovoltaica de 560W de dos ejes.

### **2.2.2 Campo de Acción**

3311 Tecnología de Automatización

3311.02 Ingeniería de Control

## **2.3 BENEFICIARIOS**

### **2.3.1 Directos**

El proyecto de tesis beneficia directamente a nosotros como estudiantes para la obtención del Título de Ingenieros Electromecánicos, y al laboratorio de Energías Renovables de la carrera de Ingeniería Electromecánica de la Universidad Técnica de Cotopaxi.

### **2.3.2 Indirectos**

Estudiantes de la carrera de Ingeniería Electromecánica de la Universidad Técnica de Cotopaxi.

## **2.4 JUSTIFICACIÓN**

Existen sistemas de recolección de energía solar donde las celdas solares 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 [1].

La salida de potencia de las células fotovoltaicas se puede mejorar con un seguidor solar que fuerza a la luz del sol al 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 [2].

La ganancia de energía depende de la temporada, las bajas inclinaciones siguen siendo favorables en verano, mientras que en invierno se necesitan inclinaciones más elevadas, en general, el aumento en la ganancia de energía de los seguidores de doble eje en comparación con los paneles fijos óptimos para las ubicaciones varía desde el 17,72% hasta 31,23%, destaca así la importancia de los seguidores solares [3].

Otra ventaja más 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 la 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**

Con la implementación de un sistema de control de posición angular en una estación fotovoltaica de 560W de dos ejes, se podrá mejorar el aprovechamiento de la irradiación solar existente en la zona.

## **2.6 OBJETIVOS**

### **2.6.1 Objetivo general**

Implementar un sistema de control de posición angular para una estación fotovoltaica de 560W de 2 ejes, mediante la integración de componentes electrónicos y actuadores eléctricos para tener un mayor aprovechamiento de la irradiación solar incidente en la zona.

### **2.6.2 Objetivos específicos**

- Recopilar información acerca de sistemas de control de posicionamiento, protocolos de comunicación y actuadores eléctricos existentes para la implementación del proyecto.
- Dimensionar el controlador y actuador eléctrico para establecer los requerimientos funcionales necesarios para el proyecto.
- Instalar el equipo de seguimiento en la estructura del seguidor solar, para un correcto posicionamiento de los paneles solares en dirección al sol.
- Realizar pruebas de funcionamiento del sistema de control, interfaz, y análisis de datos, para verificar el aprovechamiento con el sistema de control implementado.

## 2.7 SISTEMA DE TAREAS

<b>Objetivos específicos</b>	<b>Actividades (tareas)</b>	<b>Resultados esperados</b>	<b>Técnicas, Medios e Instrumentos</b>
Recopilar información acerca de sistemas de control de posicionamiento, protocolos de comunicación y actuadores eléctricos existentes para la implementación del proyecto.	Obtención de información acerca de sistemas de control de posición de seguidores solares.	Conocimiento teórico sobre el funcionamiento y posibles soluciones de elementos eléctricos y electrónicos a adquirir.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Análisis de documentación</li> <li>- Artículos científicos, libros.</li> </ul>
	Investigación de los tipos de seguidores solares e incrementos de producción en cada caso.	Cuadro comparativo de las ventajas y desventajas de cada sistema.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Análisis de documentación</li> </ul>
Dimensionar el controlador y actuador eléctrico para establecer los requerimientos funcionales necesarios para el proyecto.	Dimensionamiento de elementos electromecánicos del mecanismo de movimiento	Selección de elementos adecuados para el movimiento de la estructura	PC, software.
	Cotización de materiales y equipos.	Adquisición de equipos para la implementación	Cotizaciones de proveedores.
	Desarrollo de una interfaz del sistema.	Sistema capaz de enviar y recibir información acerca de la estación fotovoltaica.	PC, Software
Instalar el equipo de seguimiento en la estructura del seguidor solar, para un correcto	Montaje de los actuadores lineales en la estructura mecánica del seguidor solar.	Actuadores lineales correctamente instalados en la estructura	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fichas técnicas de los equipos.</li> </ul>



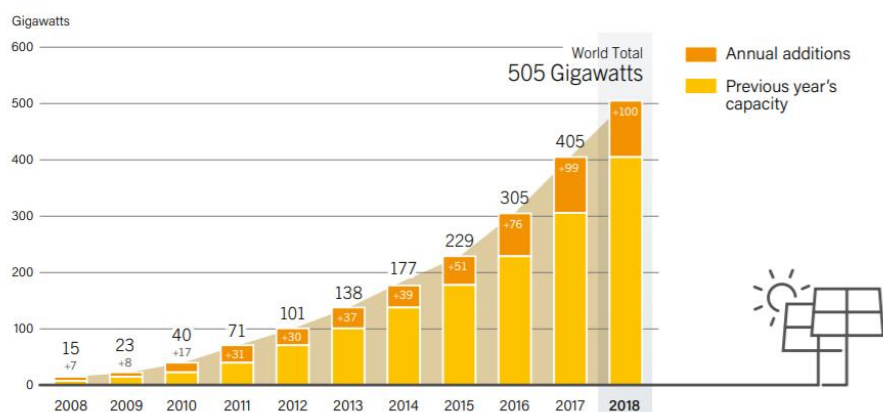
posicionamiento de los paneles solares en dirección al sol.	Conexión eléctrica de los elementos, y parametrización de datos en la interfaz.	Correcta instalación de equipos eléctricos.	- Multímetro, PC, Software
Realizar pruebas de funcionamiento del sistema de control, interfaz, y análisis de datos, para verificar el aprovechamiento con el sistema de control implementado.	Implementación de un experimento para la recolección de datos de producción de los paneles solares	Obtención datos de corriente de cortocircuito de un sistema móvil y fijo	- Análisis de documentación
	Puesta en marcha del sistema de control de posición.	Correcto posicionamiento del seguidor solar	- Puesta en marcha del sistema de control de posición del seguidor solar.
	Registro y procesamiento de datos para obtención de curvas de producción.	Verificación de mayor producción de energía eléctrica del sistema móvil comparado con un sistema fijo	- Base de datos de la computadora

### 3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

#### 3.1 ANTECEDENTES DE INVESTIGACIÓN

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 [4].

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 [5].



**Figura 3.1** Adición de capacidad de generación fotovoltaica en los años 2008-2018, en [GW] [5].

A pesar de la tasa de crecimiento de un solo dígito del mercado global en 2018, la energía solar fotovoltaica se ha convertido en la energía de más rápido crecimiento del mundo tecnológica, con mercados de escala de gigavatios en un aumento en número de países. La demanda de energía solar fotovoltaica se está extendiendo y expandiéndose, ya que se convierte en la opción más competitiva para generación de electricidad en un número creciente de mercados, para aplicaciones residenciales y comerciales y cada vez más para proyectos de servicios públicos, incluso sin tener en cuenta los costos externos de combustibles fósiles [5].

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 1 se puede apreciar la adición anual de capacidad instalada en paneles fotovoltaicos a nivel mundial y su evolución desde el año 2008 [5].

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 [6].

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 [7].

Se sabe que el seguimiento de 2 ejes, en el que los diferentes módulos solares apuntan al sol, mejora la captura general de energía solar por un área determinada de módulos entre un 30 y un 50% en comparación con los módulos con una inclinación fija. En los días soleados, la luz solar directa representa hasta el 90% de la energía solar total, y el otro 10% proviene de la energía solar difusa (dispersa). Sin embargo, durante las condiciones nubladas, casi toda la irradiancia solar es radiación difusa que se distribuye isotrópicamente por todo el cielo [8].

Un análisis de datos muestra que, durante las condiciones nubladas, inclinar un módulo solar o un sensor lejos del cenit reduce la irradiancia en relación con una configuración horizontal, en el que el sensor o módulo apunta hacia el cenit (inclinación horizontal del módulo) y, por lo tanto, recibe la mayor cantidad de esta radiación del cielo distribuida isotrópicamente. Esta observación condujo a un algoritmo de seguimiento mejorado en el que una matriz solar

rastreará el sol durante los períodos sin nubes utilizando el seguimiento de 2 ejes, cuando el disco solar es visible, pero iría a una configuración horizontal cuando el cielo se nublara. Durante los períodos nublados, mostramos que una orientación horizontal del módulo aumenta la captura de energía solar en casi un 50% en comparación con el seguimiento solar de 2 ejes durante el mismo período [8].

En el estudio realizado en Taiwán [7], 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.

En [9] manifiesta, un método utilizado para la verificación del funcionamiento de dispositivos seguidores solares es mediante la toma de varios valores para diferentes posiciones angulares, en primer lugar, sin la función de seguidor y posteriormente con el dispositivo seguidor activo, estas valoraciones se las realiza mediante el uso de un luxómetro, cuya finalidad fue comprobar que las condiciones medidas en cada caso son comparables en cuanto a iluminación.

Según [10], el sistema de seguimiento del punto de máxima potencia para aplicaciones fotovoltaicas. El sistema desarrollado es una versión análoga del algoritmo "orientado a P & O". Mantiene sus principales ventajas: simplicidad, fiabilidad y fácil implementación práctica, y evita sus principales desventajas: inexactitud y respuesta relativamente lenta. Además, el sistema desarrollado se puede implementar de forma práctica a bajo coste, lo que supone un valor añadido. El sistema también muestra un excelente comportamiento para variables muy rápidas en los niveles de radiación incidente.

Esto permite su aplicación incluso en instalaciones domésticas, donde la inversión, los costos pueden ser el factor más determinante para la toma de decisiones. El sistema desarrollado presenta la ventaja de su alta velocidad que también ayuda a mejorar la energía fotovoltaica y la eficiencia del sistema.

Con el arranque de este rastreador, el sistema de seguimiento es capaz de obtener eficiencias superiores al 97,2% en los primeros 100 ms. Una vez alcanzado el "MPP" (punto de máxima potencia), (durante los primeros milisegundos de la puesta en marcha) el sistema presenta una

eficacia de seguimiento superior al 99% (99,99%), incluso para variaciones en la radiación que inciden tan rápida y extrema. Esta eficiencia es superior al 81-85% de una clasificación sistemática "P&O" (Perturbador y Observador), superior a 88-89% de un sistema "InC" (conductancia incremental) y para 73-85% de un sistema "CV" (voltaje constante) [10].

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** Radiación obtenida con ángulos óptimos para cada tipo de seguidor [11].

		Seguidor de 2 ejes	Seguidor de 1 eje		Sin seguidor		
		Radiación	Radiación	Ángulo $\theta_x$	Radiación	Ángulo $\theta_x$	Ángulo $\theta_y$
Ciudades	Quito	$8,2611 \cdot 10^6$	$7,9313 \cdot 10^6$	$0^\circ$	-	-	-
	Pamplona	$7,4810 \cdot 10^6$	$7,0010 \cdot 10^6$	$45^\circ$	$5,3686 \cdot 10^6$	$40^\circ$	$40^\circ$
	Helsinki	$6,9268 \cdot 10^6$	$6,1776 \cdot 10^6$	$55^\circ$	-	-	-

### 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 [12].

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

**Tabla 3.2** Captación media anual de sistema FV fijo y con seguimiento [12].

Sistema	Captación anual media
Panel solar fijo 13° de inclinación	98%
<b>Seguimiento</b>	
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 [13] 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 3.3** Porcentaje de aumento de voltaje para los algoritmos de seguimiento [13]

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

El sol es una fuente principal de vida, hay que saber aprovecharla de una forma racional, la cantidad de energía que el sol da por día es diez mil veces mayor que lo que se consume en un día en el planeta.

La energía solar está contenida en la radiación solar que termina transformándose en energía

eléctrica mediante celdas fotovoltaicas o paneles solares, estos producen corriente continua donde sus características dependen de la intensidad energética de la radiación solar y temperatura ambiente.

### **3.2.1 Ventajas de la energía solar**

La energía solar como alternativa energética en la actualidad ofrece una serie de ventajas [9]:

- Utiliza el recurso inagotable: la luz.
- Es una energía limpia que no genera emisiones de gases contaminantes.
- Es una solución para disponer de electricidad en zonas aisladas.
- Es la energía renovable que puede instalarse a gran escala dentro de la zona urbana.
- Los paneles y la estructura de soporte pueden desmontarse al cumplir con su vida útil, pudiendo reutilizarse [14].

### **3.2.2 Desventajas de la energía solar**

Los inconvenientes que se encuentran en este tipo de energía hacen referencia a las instalaciones y parques solares:

- El impacto visual que provocan los parques solares, debido a las grandes superficies de captación.
- Solo hay producción mientras la luz solar esté disponible y depende del grado de insolación.
- El costo de instalación es costoso, en comparación a otra instalación que genere la misma potencia.
- El rendimiento es muy bajo, debido a la baja eficiencia de las células solares, en muchos casos inferior al 40%.

### **3.2.3 Células y módulos fotovoltaicos**

La célula fotovoltaica es una combinación de elementos semiconductores, estos pueden emitir electrones cuando golpean con energía los fotones en la superficie del semiconductor.

La manera de procesar el silicio define el panel en monocristalino, policristalino como se muestra en la siguiente figura, también existen otros tipos de células solares en forma esférica

con un diámetro entre 1 y 1,5m, aún en desarrollo, capaces de aprovechar la radiación en cualquier ángulo, tanto la radiación reflejada como la difusa.



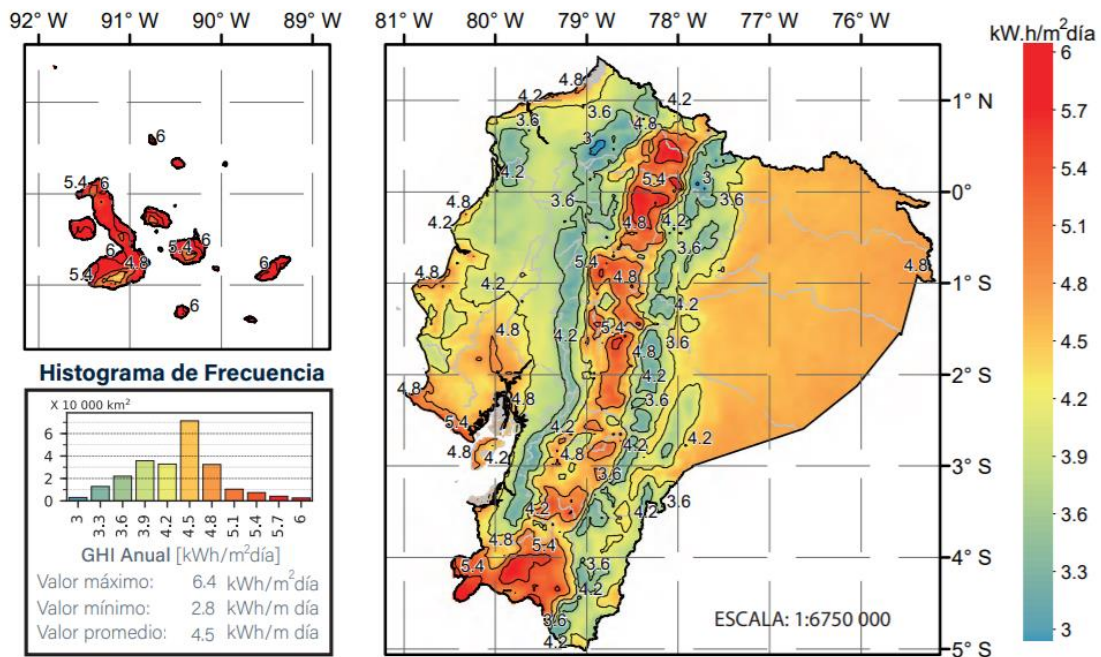
**Figura 3.2** Células FV de silicio poli y monocristalino

### **3.3 DISPONIBILIDAD SOLAR EN EL ECUADOR**

Los niveles de radiación solar en Ecuador son lo suficientemente elevados para la implementación de tecnologías solares térmicas y fotovoltaicas, el recurso solar es casi constante a lo largo del año. Las zonas ubicadas en elevada altitud (Sierra) tienen niveles de radiación mayores, mientras que las regiones como la Costa y el Oriente son de niveles menores. En el primer caso, el menor espesor de la atmósfera y la menor presencia de nubes permite tener una mayor radiación. En el segundo caso, la presión atmosférica causa la formación de nubes, lo que hace de estas regiones altamente húmedas y nubosas [15].

Según [16], sugieren un valor a partir de  $3,8 \text{ kWh/m}^2$  día es una cantidad mediante la cual un proyecto fotovoltaico es viable. El mapa de irradiación global horizontal anual muestra que aproximadamente el 75% del territorio ecuatoriano tiene niveles de irradiación por encima de este valor, especialmente en la zona centro oscilan entre los  $4,5 - 5,7 \text{ kWh/m}^2$  día, este valor es importante ya que una buena parte de industria y población del país se encuentra en esta región.

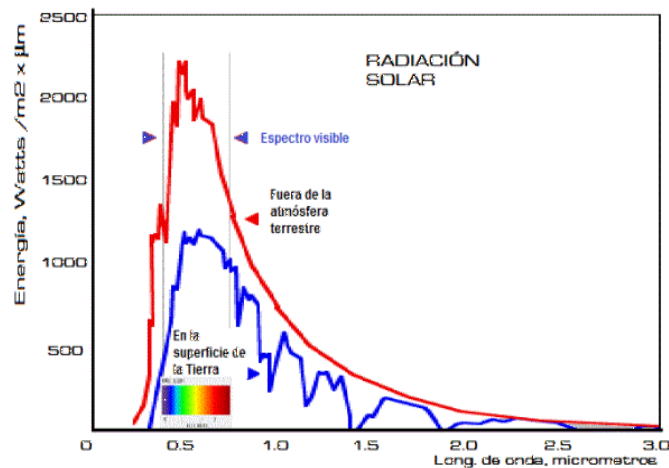




**Figura 3.3** Irradiación solar global horizontal anual [15].

### 3.4 RADIACIÓN SOLAR

La radiación puede ser directa, dispersa, reflejada y absorbida por diferentes elementos existentes en la atmósfera del planeta, la radiación solar se transmite en forma de ondas electromagnéticas con longitudes de onda entre 0.15 $\mu$ m a 4 $\mu$ m como se aprecia a continuación.



**Figura 3.4** Espectro electromagnético de la radiación solar.

Como se mencionó anteriormente, la energía solar llega a la Tierra en forma de radiación. De

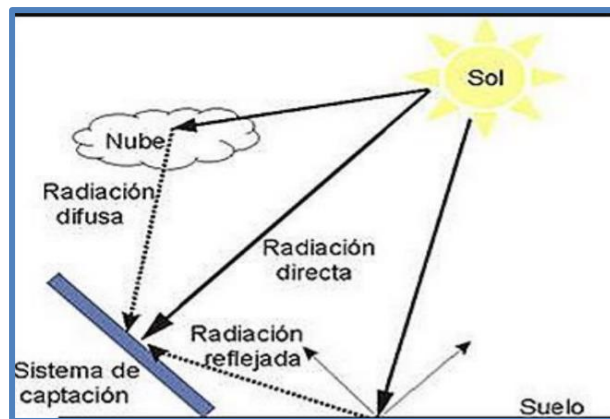
esta solo una parte alcanza la superficie terrestre y se la cuantifica en diferentes magnitudes:

**Irradiación (G o H):** Es la energía radiante que llega a la superficie en un tiempo determinado.

Se expresa en, Joule o kWh.

La irradiancia se compone de diferentes tipos:

- **Directa (I):** Es la que atraviesa completamente la atmósfera sin refracciones y reflexiones intermitentes.
- **Difusa (D):** Es emitida por el entorno celeste, mediante la reflexión y refracción en la atmósfera. El causante de este tipo de radiación son las nubes.
- **Reflejada (R):** Es parte de la radiación directa que es reflejada por una determinada superficie. Se tiene en cuenta que la radiación difusa, al proceder de todas partes no se refleja.



**Figura 3.5** Tipos de radiación [17].

**Irradiancia (E):** Se define como la energía que incide por unidad de tiempo y superficie, como la potencia incidente o la intensidad media de la radiación. Se expresa en  $W/m^2$ .

La suma de la radiación directa y difusa es lo que se le conoce como radiación global o irradiación.

La irradiancia es la magnitud que se utiliza para representar en los mapas, medida en el plano horizontal. Se estima que en buenas condiciones de radiación solar se tiene unos valores de irradiancia de  $1000 W/m^2$

### **3.4.1 Radiación Solar en Ecuador**

Nuestro país se encuentra ubicado en una zona privilegiada, sobre la línea Ecuatorial, es decir se encuentra en ambos hemisferios y por ello es un país con una alta incidencia de radiación solar.

La gran variedad de condiciones atmosféricas y topográficas del Ecuador y el amplio rango de latitudes, desde las Galápagos hasta la Amazonía, genera una enorme diversidad de situaciones de radiación que obviamente condicionan los cálculos del tamaño de una instalación que cubra una determinada demanda de energía [18].

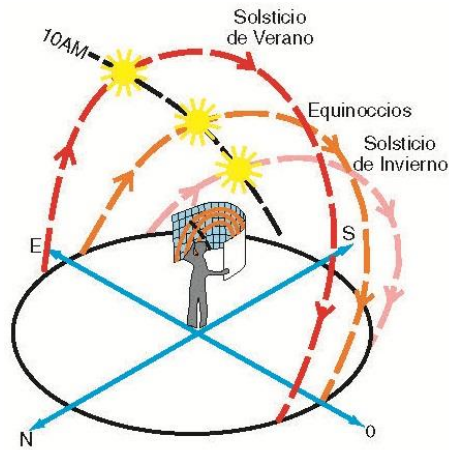
Un valor medio aproximado de la radiación solar global que incide en Ecuador es de 4200 kWh/m<sup>2</sup> por año muy superior a la radiación solar de España que es de 1400 kWh/ m<sup>2</sup> por año en la parte peninsular [18]; sin embargo, de acuerdo a [19] se presentan variaciones de más de un 30% de unos lugares a otros en el Ecuador continental, y de más del 40% si se comparan con las islas Galápagos.

### **3.4.2 Instrumentos para la medida de la irradiancia.**

Para la medición de la radiación solar existen dispositivos básicos como: el piranómetro y pirheliómetro, donde el piranómetro recibe la radiación en todas las direcciones por lo que mide la radiación global, la adición de radiación directa y difusa incidentes en una superficie [20].

## **3.5 POSICIÓN DEL SOL.**

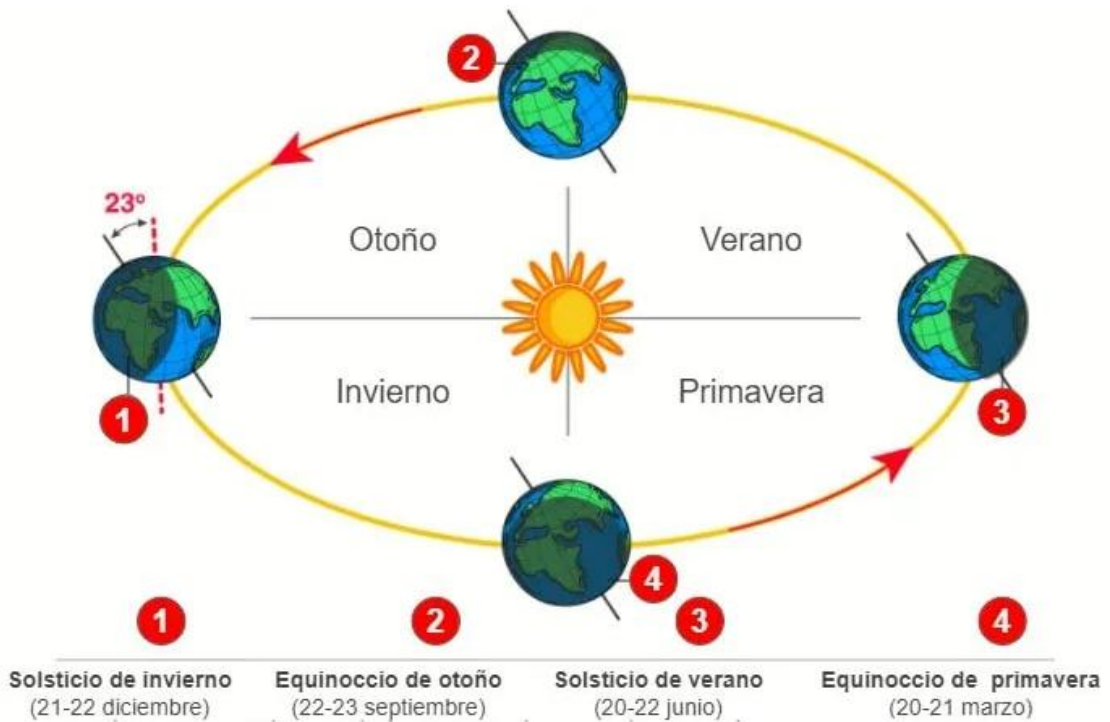
El sol describe un arco desde su salida hasta su puesta, a mitad de su recorrido se sitúa por definición el plano meridiano local, la vertical del observador en la superficie terrestre interseca a la bóveda celeste en el cenit, el eje de la tierra forma un ángulo igual a la latitud del lugar, con el plano del horizonte del observador, como se observa en la siguiente imagen.



**Figura 3.6** Trayectoria solar en el plano del observador [21].

El posicionamiento del sol puede referirse en dos sistemas de coordenadas centrales en el observador: horarias y horizontales que determina el vector solar entendido como un vector con origen en el observador y en el extremo se tiene el sol.

En el movimiento de giro la Tierra rota sobre sí misma alrededor de su eje polar, perpendicular al plano ecuatorial terrestre. Entre el eje polar y el plano de la eclíptica hay un ángulo constante de  $23,45^\circ$ . Sin embargo, el ángulo entre el plano ecuatorial y la línea que une la Tierra y Sol es variable a lo largo del año. Este ángulo variable es la causa de las estaciones, de que el Sol aparezca más alto en los mediodías veraniegos y los días invernales sean más cortos que los de verano.



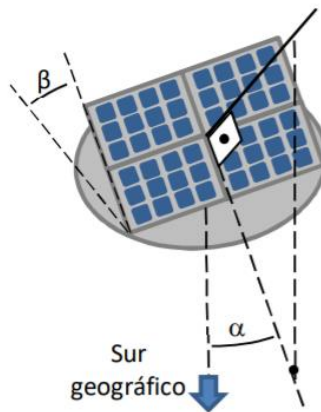
**Figura 3.7** Etapas de los equinoccios y solsticios [22].

Sin embargo, la distancia entre Sol y Tierra es mayor en el verano que en el invierno del hemisferio Norte. Así, el efecto debido a la inclinación de los rayos solares es mucho más apreciable en la meteorología que la distancia entre el Sol y la Tierra.



**Figura 3.8** Solsticio de verano [23].

Al momento de delimitar la posición del sol se necesita conocer las siguientes magnitudes.



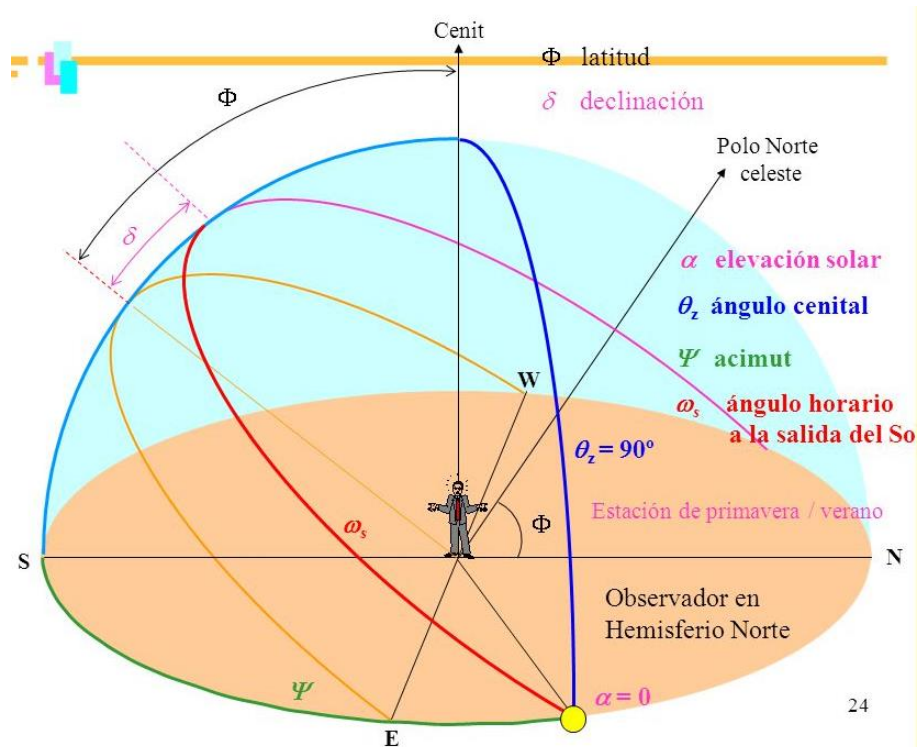
**Figura 3.9** Ángulos de posición [24].

- **Orientación ( $\alpha$ )**

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

- **Inclinación ( $\beta$ )**

Ángulo entre la superficie de interés y la horizontal.



**Figura 3.10** Coordenadas celestes horarias [25].

- **Declinación solar ( $\delta_s$ )**

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

- **Latitud ( $\phi$ )**

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

- **Ángulo horario solar ( $W_s$ )**

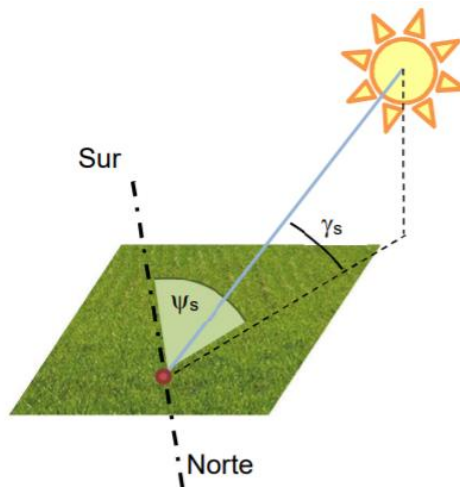
Desplazamiento angular del sol sobre el plano de la trayectoria solar, tomando como origen de este ángulo horario el mediodía solar y valores crecientes en el sentido del movimiento del sol, donde cada hora equivale a  $15^\circ$ .

- **Altura solar ( $h_s$ )**

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 ( $a_s$ )**

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) [20].



**Figura 3.51** Ángulos de posición [24].

- **Altitud Solar ( $\gamma_s$ )**

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

- **Azimut Solar o Azimut ( $\psi_s$ )**

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

### 3.6 EFECTOS DE SOMBRAS EN SISTEMAS DE ENERGÍA SOLAR

La generación de energía eléctrica de un panel solar depende en gran medida de la cantidad de

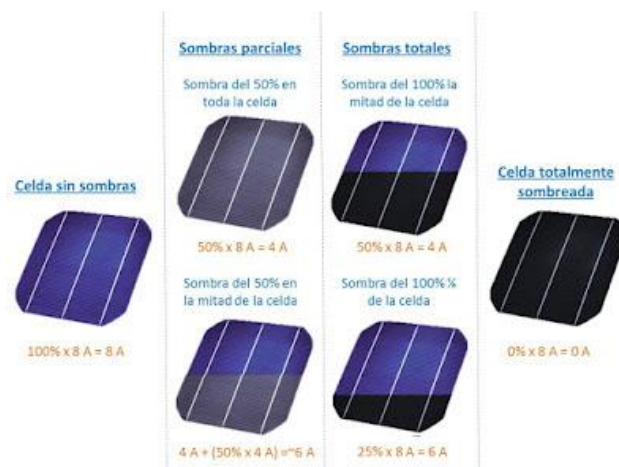


luz solar que estos reciben y cualquier objeto ya sea: una tubería, o árbol que se interponga entre el sol y el panel, disminuirá la producción de energía.

Una publicación de Gil Masters, profesor de ingeniería civil y ambiental en la Universidad de Stanford, titulado “Energía renovable y sistemas de energía eléctrica eficientes”, se demuestra cómo el sombreado de una de las 36 células de un pequeño módulo fotovoltaico puede reducir la producción de energía en más de un 75% [26].

La sombra necesariamente no tiene que cubrir todo el panel, es suficiente que cubra pocas celdas para reducir a la salida eléctrica del panel, además los paneles solares están equipados con diodos de derivación, lo que reduce los efectos nocivos de celdas, ya que sin estos se calentara hasta producir la quemadura de la misma.

El ángulo del sol cambia en el día y en las estaciones del año, lo que puede producir sombras no identificadas previamente, por lo que se debe tener en cuenta estos factores en la planeación e instalación de los paneles, sabiendo, que un sistema libre de sombras tendrá un rendimiento óptimo.



**Figura 3.62** Efectos de la sombra en los paneles solares [27].

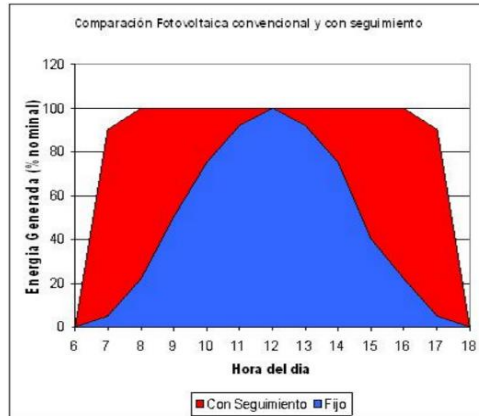
### 3.7 SEGUIMIENTO SOLAR

Un seguidor solar es un equipo tecnológico con la capacidad de orientarse al sol desde el amanecer hasta la puesta de sol ya que la tierra se mueve alrededor del sol, de forma que el seguimiento aprovecha al máximo el rendimiento de las células fotovoltaicas.

Un diseño de seguimiento solar puede aumentar el rendimiento energético hasta en 40% en comparación con un diseño fijo [12].



El seguimiento de un eje afecta un ángulo, este tipo es ideal en condiciones donde el eje es paralelo al eje del planeta teniendo un movimiento de este a oeste, por otra parte el seguimiento de dos ejes realizan su objetivo con mayor precisión, en este tipo de seguimiento normalmente se usa dos motores de accionamiento lineal para el seguimiento de este-oeste en el día, y norte-sur en las estaciones del año, en la siguiente figura se muestra la ganancia de una instalación con seguimiento y fija.



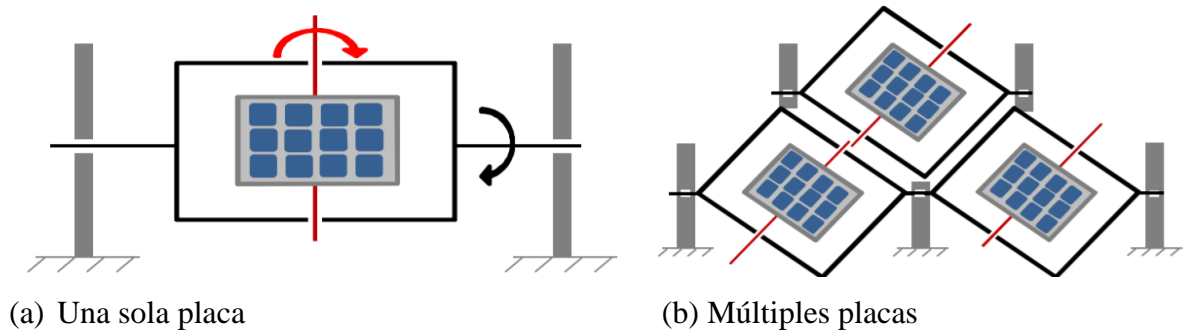
**Figura 3.73** Comparación fotovoltaica con seguimiento y fijo.

### 3.7.1 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.

- **Tipo giroscopio**

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



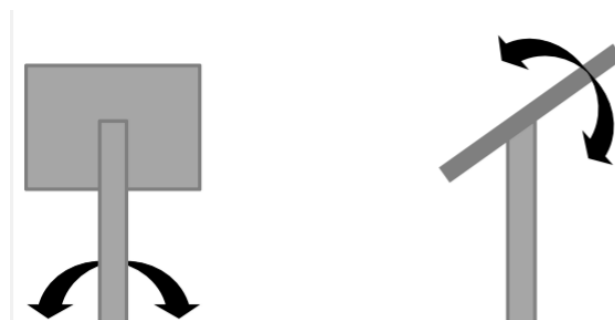
**Figura 3.84** Mecanismo giroscopios [24].

Este tipo de seguidor es más fácil de controlar mediante sensores fotosensibles. Tiene la ventaja de poder girar a una disposición inicial de  $45^\circ$  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.

- **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 3.95** Mecanismo heliostato [24].

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.

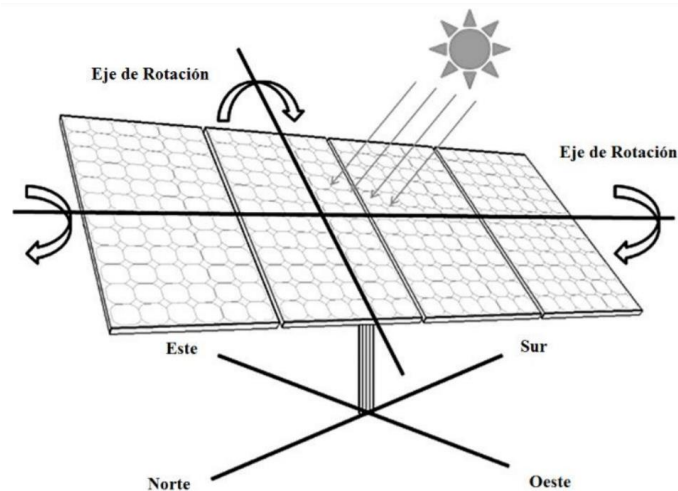
### 3.7.2 Tipos de seguidores según el número de ejes

- **En dos ejes (2x)**

La superficie se mantiene perpendicular al sol, existen dos tipos:

Monoposte: un único apoyo central

Carrusel: varios apoyos distribuidos a lo largo de una superficie circular.



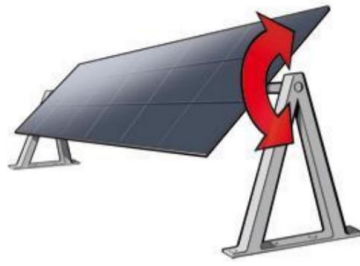
**Figura 3.106** Seguidor solar de dos ejes [28]

- **En un eje polar (1xa)**

La superficie gira sobre un eje orientado al sur e inclinado un ángulo igual a la latitud. El giro se ajusta para que la normal a la superficie coincida en todo momento con el meridiano terrestre que contiene al sol y la velocidad de giro es de  $15^\circ$  por hora, como la del reloj.

- **En un eje azimutal (1xa)**

La superficie gira un eje vertical, el ángulo de la superficie es constante e igual a la latitud. El giro se ajusta para que la normal a la superficie coincida en todo momento con el meridiano local que contiene al sol, y la velocidad de giro es variable a lo largo del día.



**Figura 3.117** Seguidor solar de un eje [28]

- **En un eje horizontal (1xh)**

La superficie gira en un eje horizontal y orientado en dirección norte-sur. El giro se ajusta para que la normal a la superficie coincida en todo momento con el meridiano terrestre que contiene al sol.

### 3.7.3 Tipos de seguidores según el algoritmo de seguimiento

- **Seguidores por punto luminoso**

Poseen un sensor que les indica cual es el punto del cielo más luminoso y al que deben apuntar, el algoritmo de este tipo de seguidor basa su funcionamiento en la señal integrada por uno o varios sensores, dependiendo de dicha señal se envía un comando de control a uno o varios motores para posicionarse en el punto más adecuado de luminosidad [1].

- **Seguidores con programación astronómica**

Estos mediante un programa conocen en qué punto debería estar el Sol a cada hora y apuntan a dicha posición, estos presentan una total independencia de las condiciones climáticas ya que su algoritmo no requiere de sensores que indiquen cual 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.

**Tabla 3.4** Ventajas y desventajas según el algoritmo de seguimiento [29].

Según el algoritmo de seguimiento	Ventajas	Desventajas
Por punto luminoso	- Fácil implementación del algoritmo de seguimiento.	- 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"> <li>- Mayor fiabilidad.</li> <li>- Independencia de las condiciones climáticas.</li> <li>- Mantenimiento menos riguroso</li> </ul>	- Implementación un poco más complicada

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.

## **4. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **4.1 METODOLOGÍA**

La implementación de un sistema de control de posición angular de una estación fotovoltaica en la Universidad Técnica de Cotopaxi 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. Es importante

mencionar que se utilizó la investigación tecnológica y la investigación aplicada o práctica en las siguientes etapas que se describen a continuación.

## 4.2 DECLARACIÓN DE VARIABLES

- **Variable Independiente**

Posición angular e irradiación

- **Variable Dependiente**

Corriente eléctrica

### 4.2.1 Operacionalización de las variables

**Tabla 4.1** Variable independiente

<b>Variable independiente</b>	<b>Definición conceptual</b>	<b>Indicador</b>	<b>Unidades</b>	<b>Instrumentos</b>
Posición angular Irradiación	Los sistemas de posicionamiento angular permiten tener orientado permanentemente los paneles hacia el sol aprovechando al máximo su irradiación.	Ángulo Irradiación	Grados kWh/m <sup>2</sup>	- Sensor inclinómetro - Piranómetro

**Tabla 4.2** Variable dependiente

<b>Variable dependiente</b>	<b>Definición conceptual</b>	<b>Indicador</b>	<b>Unidades</b>	<b>Instrumentos</b>
Corriente eléctrica	Aumento de la energía eléctrica generada por los paneles solares.	Corriente	Amper	Amperímetro

### 4.2.2 Métodos, técnicas e instrumentos

**Tabla 4.3** Métodos, técnicas e instrumentos

Métodos	Técnicas	Instrumentos
Deductivo	Control y comunicación	Controladores y HMI
Científico	Observación y medición	Fichas técnicas y equipos de medición

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** Esquema de desarrollo

### 4.3 DESCRIPCIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DE POSICIÓN

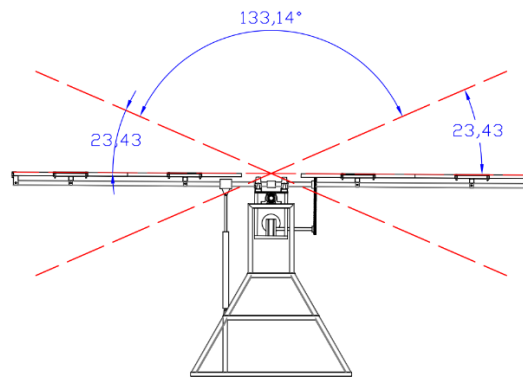
Existen tipos de seguidores solares por algoritmo de seguimiento, ya sea por punto luminoso el cual usa un sensor que ayuda a direccionar al punto con más luz en el cielo, o bien los seguidores con programación astronómica que funciona mediante ecuaciones, que dan con la posición del

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 [1].

#### 4.3.1 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 Universidad Técnica de Cotopaxi, campus Matriz, donde su ubicación corresponde a las siguientes coordenadas: Latitud  $-0.917342^{\circ}$  S, Longitud  $-78.633058^{\circ}$  O.

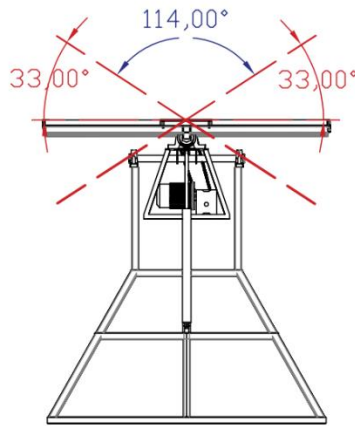
Respecto a la orientación e inclinación, a lo largo del año con orientación Norte-Sur (Solsticio verano), y con un periodo desde el 20 de junio (solsticio de invierno) hasta el 21 de diciembre (Solsticio verano), donde llega a la latitud Norte de:  $+23,43^{\circ}$  y al sur:  $-23,43^{\circ}$  respecto a la línea ecuatorial [30], teniendo así un recorrido total de  $46,86^{\circ}$  a lo largo del año en sentido Norte-Sur (Anexo 1).



**Figura 4.2** Inclinación Norte-Sur

Ahora bien, 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  $-33^{\circ}$  al este y  $+33^{\circ}$  al oeste, teniendo así un recorrido útil de  $66^{\circ}$ .





**Figura 4.3** Inclinación Este-Oeste

### 4.3.2 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 [31].

**Declinación ( $\delta$ ):** 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  $\Delta_{GMT}$  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.

$$Eot = 9.87 \cdot \text{sen}(2B) - 7.53 \cdot \cos(B) - 1.5 \cdot \text{sen}(B) \quad (4.3)$$

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 ( $\lambda$ ) de la localidad, y el factor de corrección (*EoT*).

$$TC = 4 \cdot (\lambda - LSTM) + EoT \quad (4.5)$$

### **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 horario (*HRA*)**

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  $15^\circ$ , al medio día su valor es cero, en la mañana el valor es negativo y en la tarde es positivo.

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

### **Elevación solar ( $\beta$ )**

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

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

### **Elevación máxima ( $\beta_{max}$ )**

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

$$\beta_{max} = \varphi - \varphi$$

### **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.

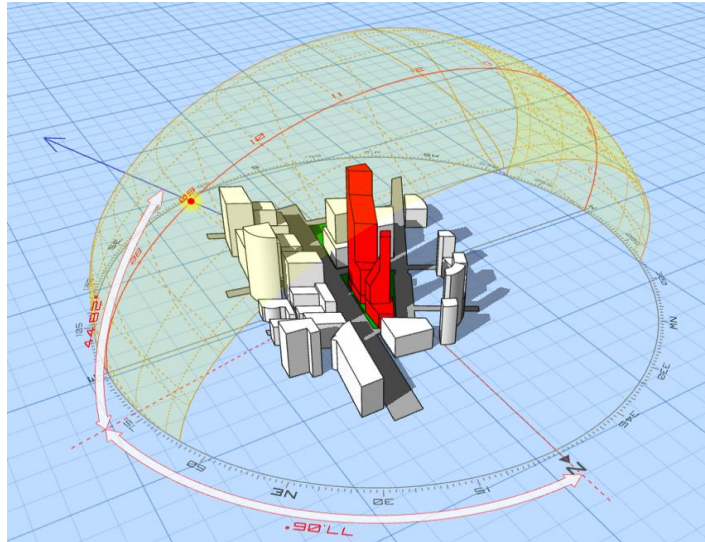
$$Az = \text{cos}^{-1} \left( \frac{\sin(\delta) \cdot \cos(\varphi) - \cos(\delta) \cdot \sin(\varphi) \cdot \cos(HRA)}{\cos(\beta)} \right) \quad (4.9)$$

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 4.4** Trayectoria solar en la Universidad Técnica de Cotopaxi [32].

#### **4.4 SISTEMA DE 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 ubicación 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 dos ejes, el sistema realiza el seguimiento mediante el cálculo de la trayectoria solar que determina la posición del sol. El controlador compara los valores calculados con los valores del sensor inclinómetro. De acuerdo a la operación, el controlador envía la señal a los actuadores, es decir mediante relevadores activa o desactiva los actuadores lineales de 12V, de manera que los 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 a los relés que activan los actuadores lineales, 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 conmutaciones 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.

Control de posición ON-OFF	
Rango de control. (este - oeste)	-33°; +33°
(norte – sur)	-23,43; +23,43
Histéresis	
Histéresis positiva	Set Point +1°
Histéresis negativa	Set Point -1°
Estados	Actuadores
Si el Set Point es mayor que la variable del proceso	Activar los actuadores lineales (polarización inversa de los motores 12DC)
Si el Set Point es menor que la variable de proceso	Activar los actuadores lineales (polarización directa de los motores 12DC)
Si el Set Point se mantiene entre los límites	Desactivar todos los motores

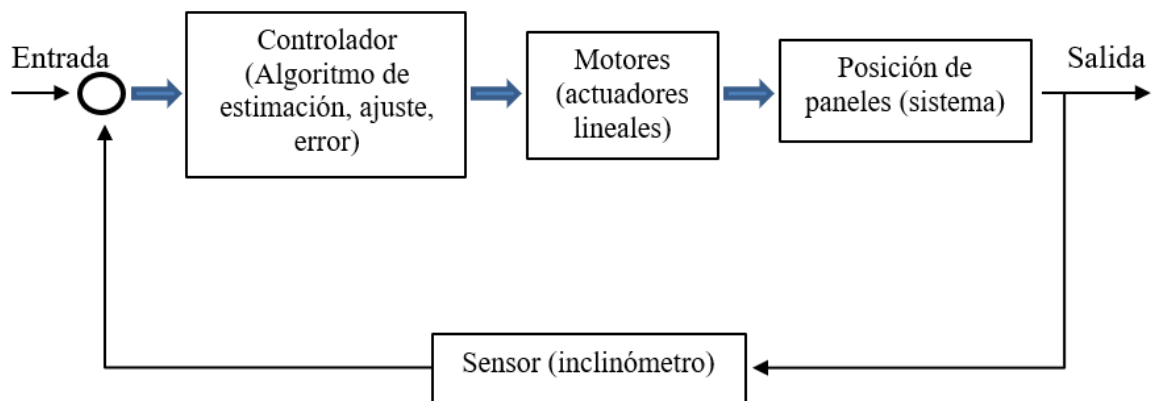
El controlador realizará la acción de corrección del ángulo de inclinación que permite mantener en funcionamiento el equipo frente a drásticos factores como: cambio de posición del sol durante el día y año, velocidades de viento muy elevadas, garantizando que estos se encuentren dentro de los límites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

### Diagrama de bloques del sistema de control

En el sistema de control, el GPS envía la información de la ubicación, fecha y hora actual hacia el controlador, así como el sensor de viento, mediante el cual controlador analiza si es día o noche, en la noche los paneles se posicionan hacia el amanecer, en el día procede a calcular la posición del sol en tiempo real a partir de los datos proporcionados por el GPS, una vez se tenga los ángulos de inclinación estos se compara con los ángulos del sensor inclinómetro y

dependiendo su variación se activa los relés, ejecutando la señal del encendido y apagado (ON/OFF) hasta corregir el error.

Luego el controlador también realizará una comparación entre los valores máximos y mínimos previamente programados, dependiendo del resultado envía la señal de OFF para los actuadores lineales, y se mantiene en constante repetición del ciclo de control.



**Figura 4.5** Diagrama de bloques

#### **4.5 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 2).

- 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 dos motores de 12V CD.
- Voltaje de entrada 110 V AC, 60Hz.
- Admite la conexión con GPS para la recepción de datos.
- Facultad de conexión con un sensor inclinómetro y anemómetro.

### 4.5.1 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.

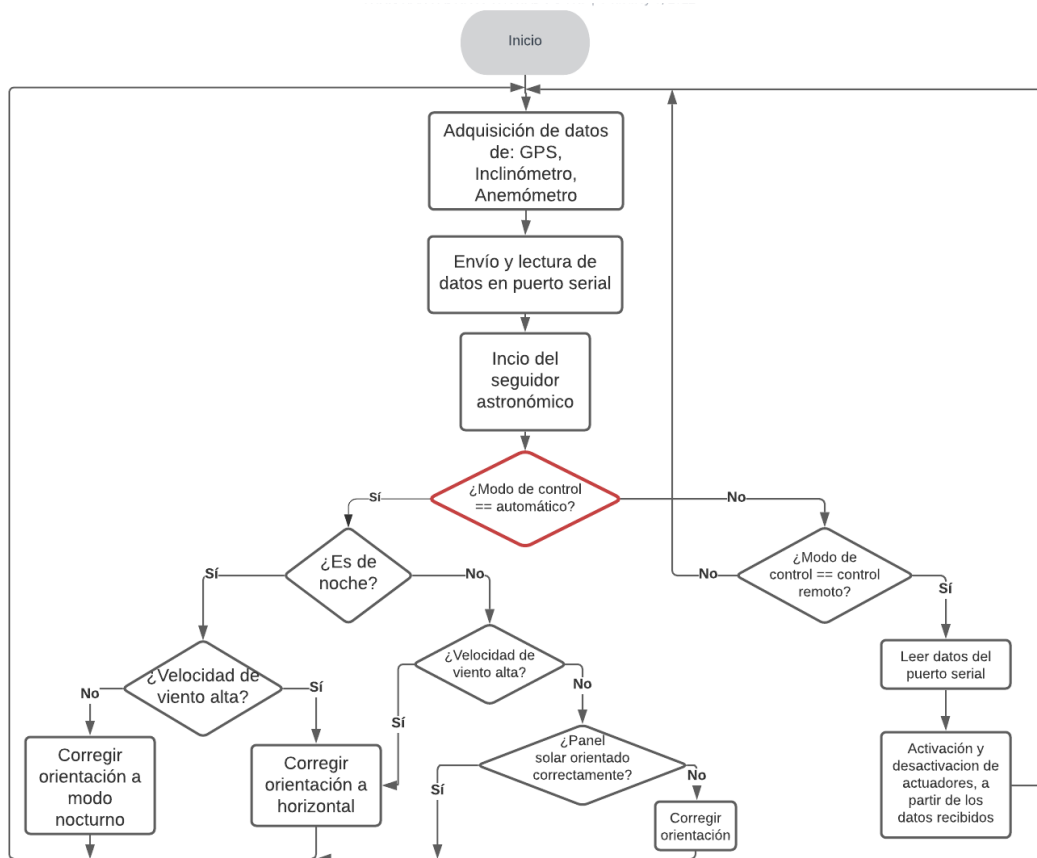


Figura 4.6 Diagrama de flujo del controlador por programación astronómica

### 4.6 ANÁLISIS PARA LA SELECCIÓN DEL ACTUADOR LINEAL

Se tiene en cuenta la masa de los 4 paneles solares los cuales tiene 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.

$$P = m \cdot g$$

$$P = (16Kg \cdot 4) \cdot 9,81 m/s^2$$

$$P = 627,84 N$$

Por otra parte, debido a la investigación requerida, ayudó a determinar la carrera del actuador lineal la cual es de 700mm para lograr el movimiento en el sentido Este-Oeste, a continuación, se muestra una tabla donde se presentan las características del actuador lineal eléctrico seleccionado.

**Tabla 4.4** Característica del actuador lineal (ANEXO 3)

<b>Actuador lineal</b>	
Carrera	700mm
Velocidad	5 mm/s
Fuerza	2500 N
Tensión	12 V
Corriente	4 A
IP	65

#### **4.7 DESARROLLO DE LA INTERFAZ**

El objetivo del programa desarrollado en LabVIEW (versión estudiantil), es la función de una interfaz gráfica, la cual permite monitorear parámetros durante el funcionamiento del sistema de control del seguidor solar.

Algunos de los requisitos que debe cumplir el software son:

- Recibir los datos en tiempo real del controlador y mostrarlos de manera intuitiva en la interfaz.
- Mostrar el valor del ángulo azimutal, este permite interpretar la desviación del sol referente a la línea del punto cardinal norte.
- Mostrar el valor del ángulo de elevación, permite interpretar el ángulo entre la horizontal del lugar y la altura del sol.
- Mostrar coordenadas geográficas de la ubicación actual de la estación fotovoltaica.



- Tener un icono para activar el modo automático del seguimiento solar.
- Tener un icono de modo manual, y sus respectivos controles para el movimiento en sentido (sur-norte y este-oeste) de manera remota.
- Botón Stop Programa, para detener la ejecución del programa que se está procesando en la computadora.

#### 4.7.1 Desarrollo

El sistema adopta el protocolo de comunicación estándar Modbus, RS 485, por lo que es posible implementar la arquitectura maestro-esclavo, mediante una comunicación serial y una transmisión que cubre una distancia hasta de 1.2Km, lo cual es suficiente de acuerdo con la necesidad del proyecto.

Se usa el módulo *Datalogging and Supervisory Control* (DSC), este incluye herramienta permite conectar en red objetivos de LabVIEW Real-Time y dispositivos OPC, este último es un método fiable para acceder a los datos del dispositivo de campo.

- En primer lugar, se inicia “NI OPC server *Configuration*” accediendo a la carpeta “*National Instrument*”, aquí se crea un canal para establecer la comunicación, se le asigna el nombre de “Canal solar”, en el apartado “*Device driver*” se selecciona el protocolo de comunicación “Modbus RTU Serial”, a continuación, se configura el número de puerto del PC donde está conectado el equipo, y parámetros de comunicación del dispositivo, que se muestra a continuación.

**Tabla 4.5** Parámetros de configuración del equipo en OPC

<b>Protocolo de comunicación</b>	<b>MODBUS - RTU</b>
Tasa de baudios	9600
Paridad	-----
Bits de datos	8
Bit de parada	1

- Seguidamente, se crea un dispositivo con el nombre “control solar”, se reduda en la selección del protocolo Modbus, ingresamos el número ID del equipo “el valor 1 en

decimal para nuestro caso”, y se deja la demás configuración preestablecidas en el OPC.

- Después se configura los “Tags”, asignando un nombre, tipo de dato, y lo más importante, la dirección de registro de los datos ( *Holding registers*) que se necesita leer o escribir, esto se encuentran en el dispositivo, y se accede a ellos basándose en la siguiente tabla.

**Tabla 4.6** Definición y dirección de los registros.

Nombre de la señal	Dirección de registro	Byte	Valor por defecto	Rango de datos	Tipo de datos	Unidad	Exactitud	Propiedades Leer/escribir	Observaciones
Hora del sistema Año	40008	1	N/A	0-99	UINT16	Año	1	R/W	Hora local
Hora del sistema. mes	40009	1	N/A	1-12	UINT16	Mes	1	R/W	Hora local
Hora del sistema. Día	40010	1	N/A	1-31	UINT16	Día	1	R/W	Hora local
Hora del sistema. Hora	40011	1	N/A	0-23	UINT16	Hora	1	R/W	Hora local
Hora del sistema. Minuto	40012	1	N/A	0-59	UINT16	Minuto	1	R/W	Hora local
Hora del sistema. Segundos	40013	1	N/A	0-59	UINT16	Segundos	1	R/W	Hora local
Longitud de instalación	40014	1	N/A	-18000, +18000	INT 16	Grados	0.01	R/W	Este: longitud positiva Oeste: Longitud negativa
Latitud de instalación	40015	1	N/A	-9000, +9000	INT 16	Grados	0.01	R/W	Norte: Latitud positiva, Sur: Latitud negativa
Velocidad del viento en tiempo real	40041	1	N/A	0 – 62	UINT 16	m/s	1	R/O	Velocidad del viento en tiempo real del

									anemómetro m/s
Modo de operación	40074	1	N/A	0: Modo automático. 1: Modo manual. 7: Modo control remoto 12: Modo noche	ENUM 16	N/A	N/A	R/W	La rotación en las direcciones XY, puede ser cambiado después de configurar el control remoto
Eje X, coordenada solar	40075	1	N/A	-18000, +18000	INT 16	Grados	0.01	R/O	
Eje Y, coordenada solar	40076	1	N/A	-9000, +9000	INT 16	Grados	0.01	R/O	
Ángulo de movimiento eje X	40079	1	N/A	-18000, +18000	INT 16	Grados	0.01	R/O	
Ángulo de movimiento eje Y	40080	1	N/A	-9000, +9000	INT 16	Grados	0.01	R/O	
Dirección del eje X, rotación positiva	40081	1	0	Bit: 0: stop 1: rotar	UNIT 16	NA	N/A	R/W	Puede escribir cuando el modo de operación es control remoto
Dirección del eje X, rotación reversa	40082	1	0	Bit: 0: stop 1: rotar	UNIT 16	NA	N/A	R/W	Puede escribir cuando el modo de operación es control remoto
Dirección del eje Y, rotación positiva	40083	1	0	Bit: 0: stop 1: rotar	UNIT 16	NA	N/A	R/W	Puede escribir cuando el modo de operación es control remoto
Dirección del eje X, rotación reversa	40084	1	0	Bit: 0: stop 1: rotar	UNIT 16	NA	N/A	R/W	Puede escribir cuando el modo de operación es control remoto

- Vale aclarar que, al configurar los tags con las direcciones de registro antes mostradas, es necesario añadir un número 4 al inicio de cada registro y sumar un valor de uno para dar con la dirección de registro correcta como se muestra a continuación.

Tag Name	Address	Data Type	Scan Rate	Scaling	Description
Año	440009	Short	100	None	
Mes	440010	Short	100	None	
Día	440011	Short	100	None	
Hora	440012	Short	100	None	
Minuto	440013	Short	100	None	
Segundos	440014	Short	100	None	
Longitud	440015	Short	100	None	
Latitud	440016	Short	100	None	
Vel_viento	440042	Short	100	None	
Modo_control	440075	Word	100	None	
Azmut	440076	Short	100	None	
Elevacion	440077	Short	100	None	
Inclinacion_X	440080	Short	100	None	
Inclinación_Y	440081	Short	100	None	
Positiv_X_O	440082	Word	100	None	
Revers_X_E	440083	Word	100	None	
Positiv_Y_N	440084	Word	100	None	
Revers_Y_S	440085	Word	100	None	

**Figura 4.7** Configuración de tags en OPC

- En LabVIEW (Versión estudiantil) se crea una interfaz llamada “I/O Server” donde se selecciona OPC Client, y por consiguiente “NI OPC Server V5”
- Sobre la librería que se genera automáticamente, se crean las variables compartidas accediendo a OPC y posteriormente añadiendo todas las variables previamente reconfiguradas en OPC.
- Por último, las variables compartidas antes configuradas, se las arrastra al diagrama de bloque de LabVIEW, donde se las parametriza y programa para que se ejecute la aplicación, además se realiza un panel frontal como se muestra en la figura 4.8.

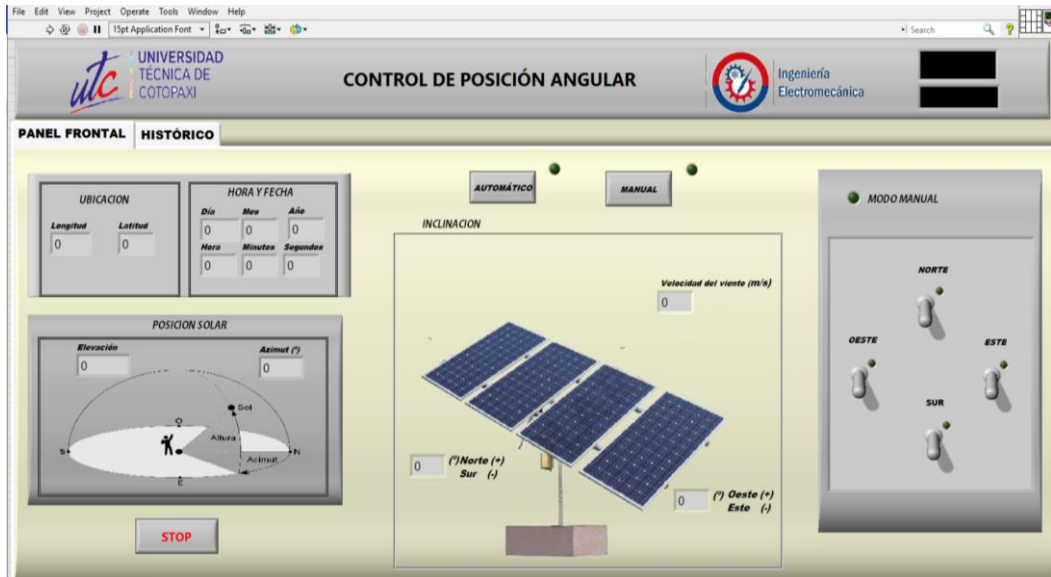


Figura 4.8 Panel frontal del sistema SCADA

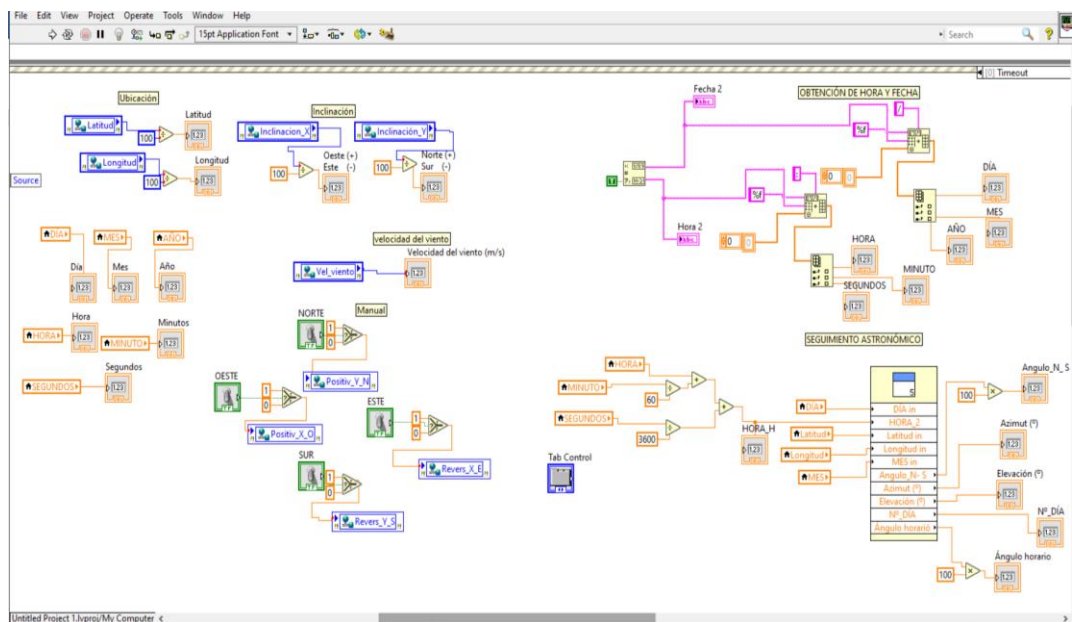
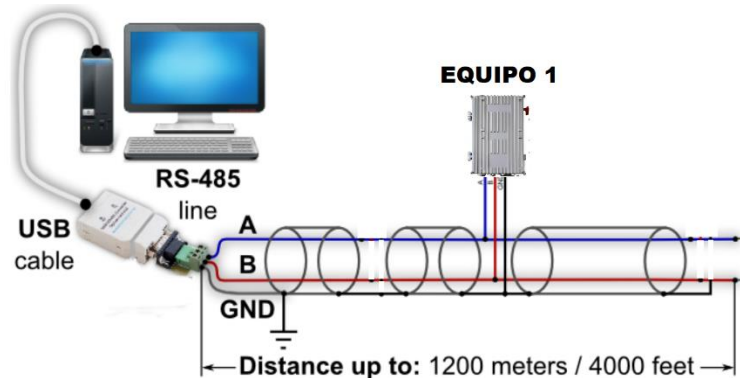


Figura 4.9 Diagrama de bloques

#### 4.8 CONEXIÓN EN LA RED RS485

La red RS485 está compuesta de una estructura maestro/esclavo, donde el maestro hace solicitudes a un esclavo y este último responde en un periodo de tiempo adecuado, el papel de maestro lo desempeña la PC, y el papel de esclavo lo tiene el controlador de seguimiento solar, la red RS485 es un bus de 2 hilos compuesta por un cable UTP categoría 5, que se extiende desde el laboratorio donde está ubicado la PC con la interfaz HMI hasta el controlador de seguimiento solar ubicado en campo, a una distancia aproximada de 10m, además, se utiliza un

conversor serial RS485 a USB con el fin de que el computador tenga la capacidad enviar y adquirir datos procedentes del controlador, como se muestra en la siguiente figura.



**Figura 4.10** Conexión en la red RS485.

## 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 radiación, tensión, corriente 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 4.7** 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.

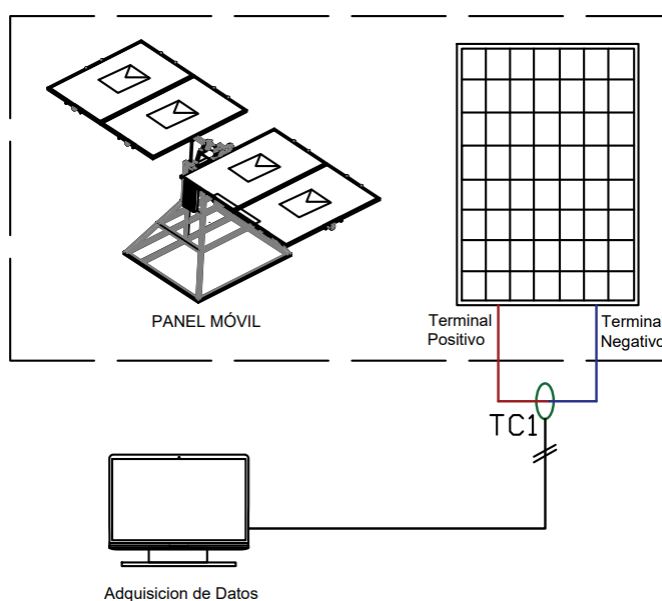
#### 4.10 DISEÑO DEL EXPERIMENTO PRÁCTICO

Al tener a disposición dos tipos de sistemas fotovoltaicos (fijo y móvil) se pretende realizar pruebas de generación de cada uno de ellos en las siguientes configuraciones.

- Se conecta en cortocircuito los terminales de los paneles solares de la estructura fija y del móvil.
- Mediante la configuración mencionada, también es importante conectar los transformadores de corriente (TC's) que nos permita visualizar la corriente máxima de generación tanto del panel fijo como del móvil.

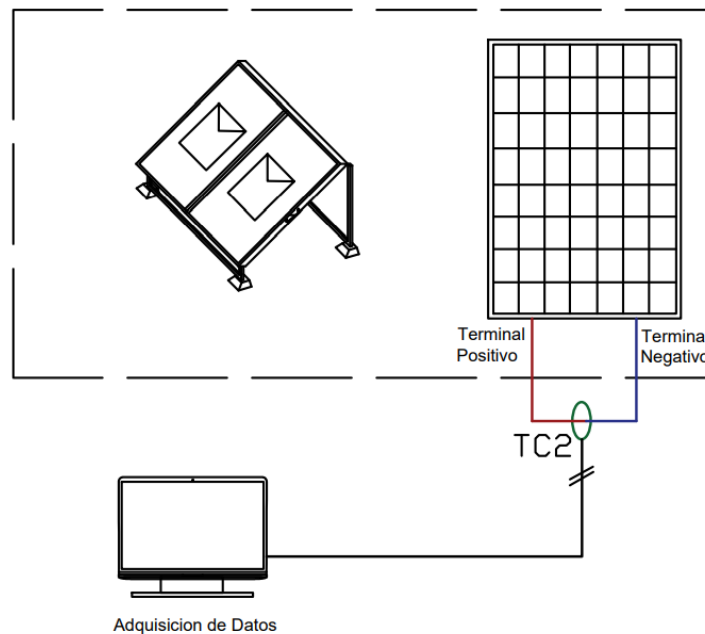
En las figuras que se presentan a continuación se muestran las conexiones realizadas para cada panel (ANEXO 4).

En la figura 4.11 se muestra el modo de conexión de los terminales del panel y su respectivo TC ubicado en la estructura móvil con lo cual se realiza el experimento.



**Figura 4.11** Conexión en cortocircuito del panel móvil.

En la figura 4.12 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 4.12** Conexión en cortocircuito del panel fijo.

## 5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Para la implementación del sistema de control de posición angular, mediante el algoritmo de seguimiento con programación astronómica y el dimensionamiento de actuadores, partiendo desde la validación del algoritmo de seguimiento escogido, se adquiere los equipos necesarios que cumplan con los parámetros analizados y dimensionados en el capítulo anterior, después se los implementa en la estación fotovoltaica y para finalizar se demuestra el funcionamiento, comparando la posición de los paneles con los datos respecto al software de posición solar, además de realizar el análisis de irradiación solar tanto de la estación fotovoltaica fija como del sistema de control de posición, cuando entra en funcionamiento.

### 5.1 VALIDACIÓN DE FUNCIONAMIENTO

Una vez desarrollado el algoritmo de seguimiento se describió el sistema de control y conexión con sus diferentes equipos de operación (ANEXO 5), para ilustrar la trayectoria solar del



sistema fotovoltaico del proyecto se han grabado varios videos superponiendo la visión de la interfaz en los momentos que se enviaban las órdenes. Es importante mencionar que la realización de los videos sirve para demostrar el funcionamiento de forma conceptual, puesto que su realización fue anterior a la finalización del proyecto.



**Figura 5.1** Sistema de control implementado

## 5.2 SIMULACIÓN DEL ALGORITMO DE SEGUIMIENTO.

En primer lugar, al introducir los datos de latitud, longitud, fecha y hora, el algoritmo desarrollado calcula la posición del sol en tiempo real, dando como resultado el vector solar es decir en ángulo acimutal y la altura solar, a continuación de muestra una tabla en la que se muestra valores de altura solar, ángulo acimut, calculados como para la fecha de (20 de marzo del 2022, correspondiente al día 79 del año), la cual corresponde al equinoccio, 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.

**Tabla 5.1** Resultados del algoritmo astronómico de posicionamiento

DATOS		
Latitud	( $\varphi$ )	-0,917342
Longitud	( $\lambda$ )	-78,633058
Diferencia horaria	( $\Delta$ _GMT)	-5
Nº de día del año	(1 - 365)	79

	Corrección del tiempo	Declinación solar	Ángulo horario	Elevación solar	Azimut
Hora	(EoT)	( $\delta$ )	(HRA)	( $\beta$ )	(Az)
5	-8,153	-0,5046	-110,671	-20,659	90,885
6	-8,153	-0,5046	-95,671	-5,662	90,598
7	-8,153	-0,5046	-80,671	9,336	90,361
8	-8,153	-0,5046	-65,671	24,334	90,139
9	-8,153	-0,5046	-50,671	39,332	89,901
10	-8,153	-0,5046	-35,671	54,33	89,587
11	-8,153	-0,5046	-20,671	69,327	88,998
12	-8,153	-0,5046	-5,671	84,314	85,876
13	-8,153	-0,5046	9,329	80,663	272,47
14	-8,153	-0,5046	24,329	65,669	270,804
15	-8,153	-0,5046	39,329	50,672	270,323
16	-8,153	-0,5046	54,329	35,674	270,037
17	-8,153	-0,5046	69,329	20,676	269,807
18	-8,153	-0,5046	84,329	5,678	269,584
19	-8,153	-0,5046	99,329	-9,319	269,338
20	-8,153	-0,5046	114,329	-24,316	269,032

Se muestran los valores obtenidos para los mismos datos geográficos, fecha y hora, que fueron rescatados del software online “SunEarthTools.com” el cual calcula la posición solar.

**Tabla 5.2** Información que provee el software online SunEarthTools.com [32]

Fecha:	20/03/2022   GMT-5	
coordinar:	-0.917342, -78.633058	
ubicación:	-0.91734200, -78.63305800	
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°

Se puede apreciar en las dos tablas anteriores (Tabla 5.1 y Tabla 5.2) que se presenta similitud,

además de en la Tabla 5.1 se puede apreciar que el ángulo de declinación es cercano cero, tal y como se indica en el capítulo anterior debido a que la fecha corresponde al equinoccio, permitiendo así validar de esta manera el algoritmo desarrollado para su uso en el sistema de control de posición angular.

### 5.3 ANÁLISIS DE LA IRRADIACIÓN DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO FIJO Y EL MÓVIL

A continuación, se procede a analizar los datos obtenidos durante los 15 días de medición de la radiación solar, se analiza y compara la irradiación global obtenida durante un día cualquiera, que esté dentro de los días de medición.

#### 5.3.1 Análisis de la irradiación del sistema fotovoltaico fijo

En la figura 5.1 se muestra el nivel de irradiación por unidad de tiempo captado por un panel fijo esto debido a que permanece en un ángulo de inclinación de 15°.

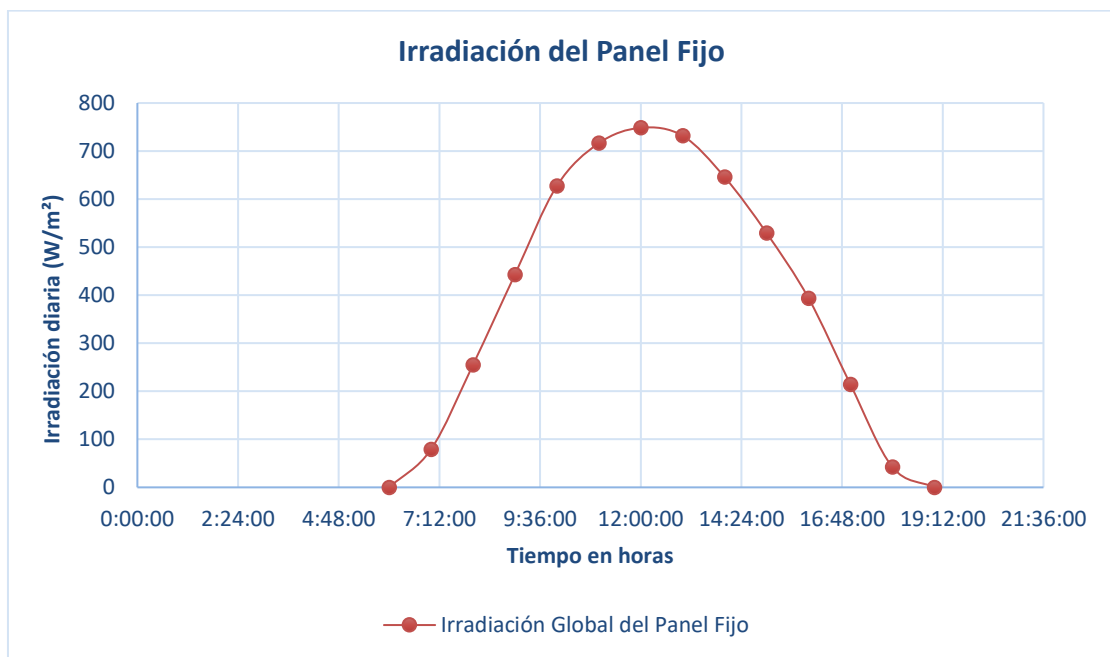
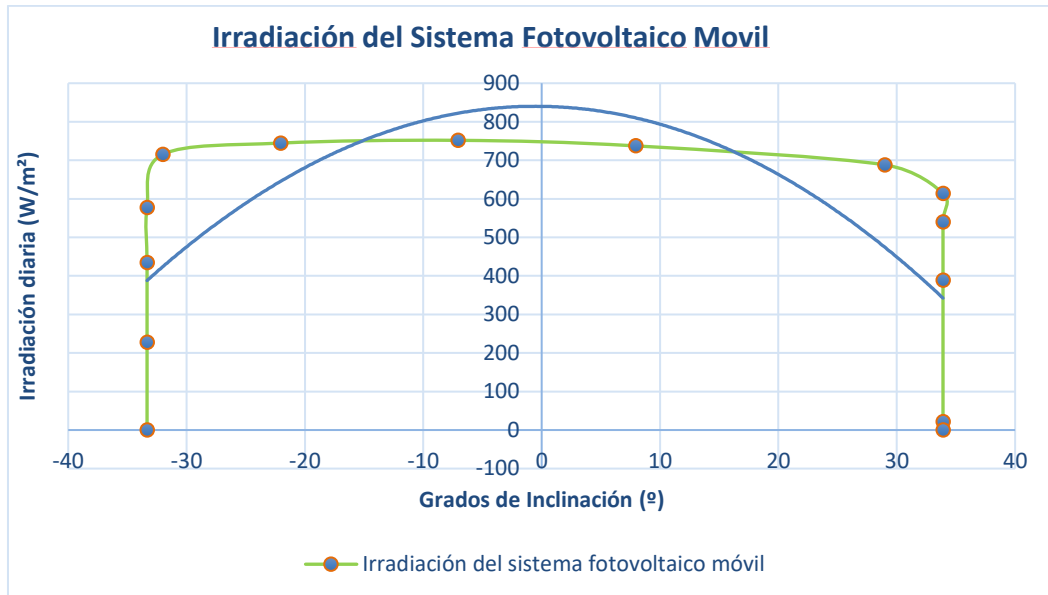


Figura 5.2 Irradiación sistema fotovoltaico fijo

#### 5.3.2 Análisis de la irradiación del sistema fotovoltaico móvil

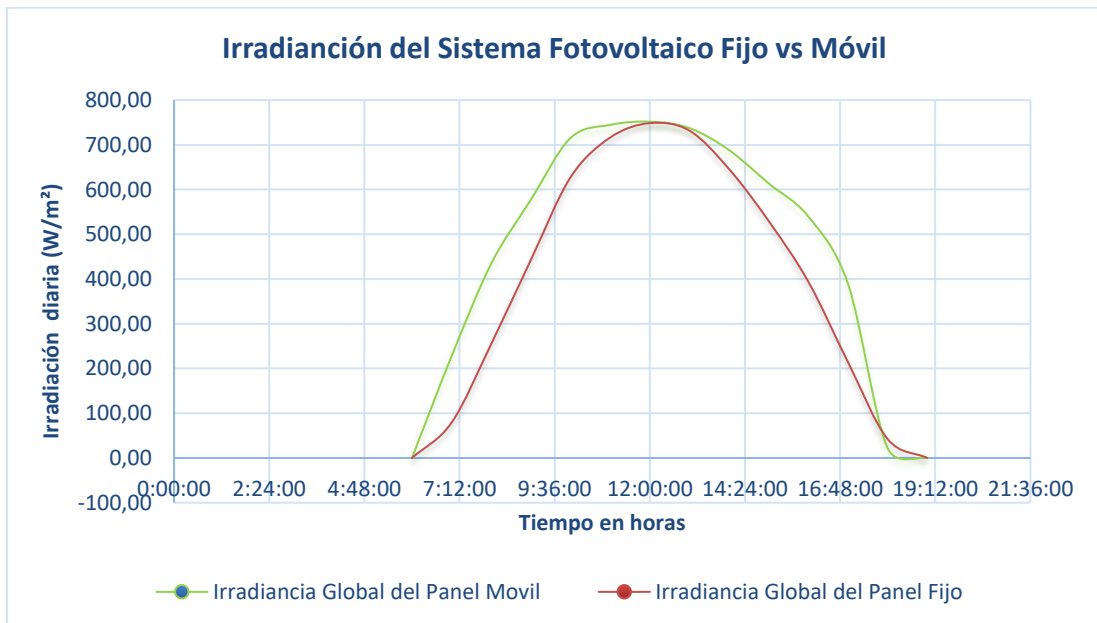
En la figura 5.2 se muestra el nivel de irradiación medido por el sistema fotovoltaico móvil, mediante el cual se aprecia claramente un nivel de energía solar más elevado que el sistema fijo, esto al poseer grados de inclinación con respecto al sol.



**Figura 5.3** Irradiancia del sistema fotovoltaico móvil

Para una mejor visualización de captación de energía solar obtenida entre los dos sistemas fotovoltaicos se muestra la figura 5.3.

Donde se observa la diferencia de captación y aprovechamiento de la irradiación solar global, al tener un sistema fotovoltaico fijo y un sistema móvil.



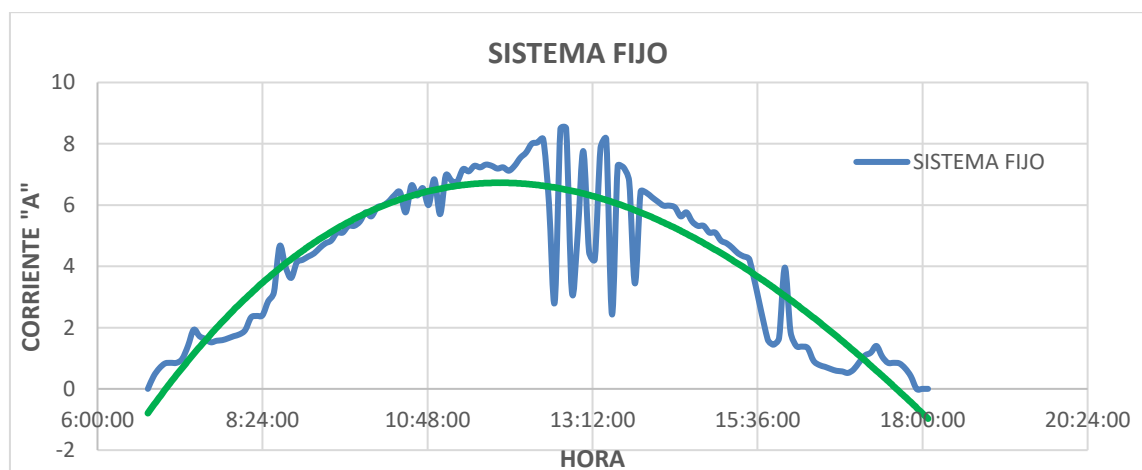
**Figura 5.4** Irradiación del sistema fotovoltaico fijo vs el móvil

## 5.4 ANÁLISIS DEL APROVECHAMIENTO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO FIJO Y MÓVIL

En el capítulo anterior se indicó las pruebas realizadas a los paneles solares tanto del sistema en configuración móvil como en configuración fija, en los dos casos se mide la corriente de cortocircuito o corriente máxima que puede entregar el panel, ambas configuraciones de paneles se probaron en un día soleado escogido aleatoriamente, como resultado de este experimento se tienen una base de datos en la PC que serán usados para este análisis.

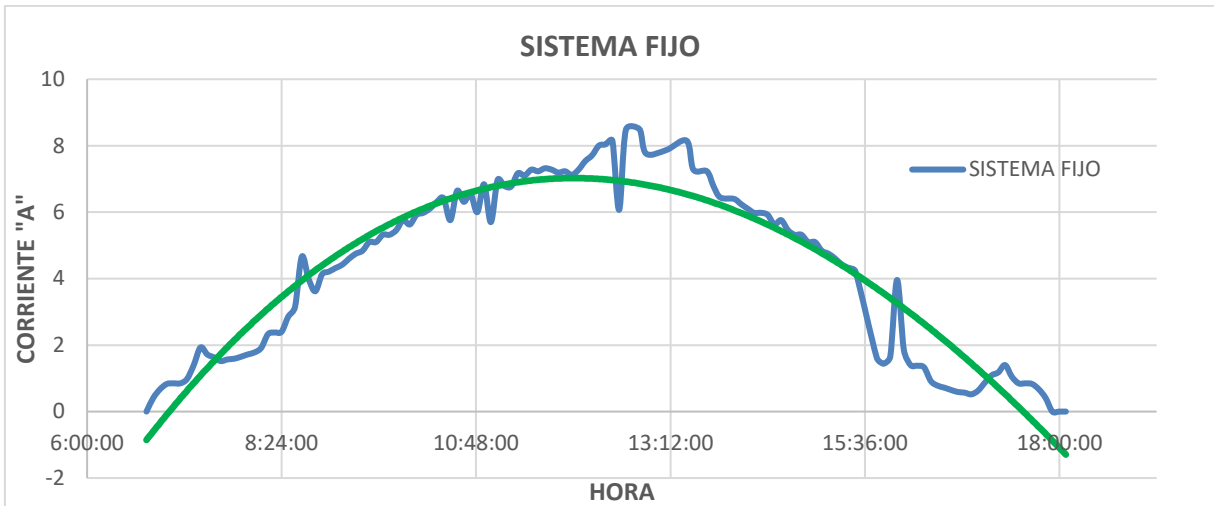
### 5.4.1 Sistema fotovoltaico fijo

Las pruebas están realizadas a paneles solares individuales, la siguiente figura corresponde a la generación de corriente eléctrica durante 1 día en un sistema fotovoltaico fijo, en las coordenadas  $-0.917342^{\circ}$  S,  $-78.6330581^{\circ}$  O.



**Figura 5.5** Generación de corriente del sistema fotovoltaico fijo

En la figura anterior se muestra el incremento de la corriente, a medida que llega el mediodía, el incremento es más notorio debido a que la incidencia de los rayos solares es más directa hacia la superficie de los paneles solares a diferencia de la mañana y la tarde, además se puede apreciar la existencia de picos de corriente, esto es debido a la presencia de nubes en el instante del registro del dato, por lo que con el fin de tener menos errores en la gráfica se opta por eliminar los picos donde la corriente decrece debido a la presencia de las nubes, teniendo la siguiente figura.

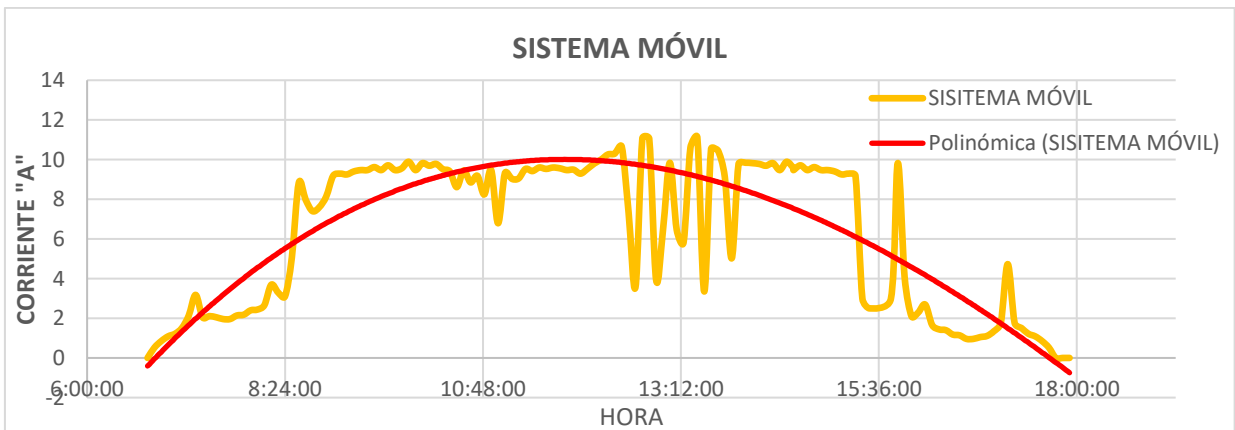


**Figura 5.6** Generación de corriente del sistema fotovoltaico fijo sin perturbaciones

En la figura anterior se aprecia que los errores o picos han sido eliminados con se logra suavizar las fluctuaciones de los datos, y la gráfica termina pareciéndose más a la línea de tendencia.

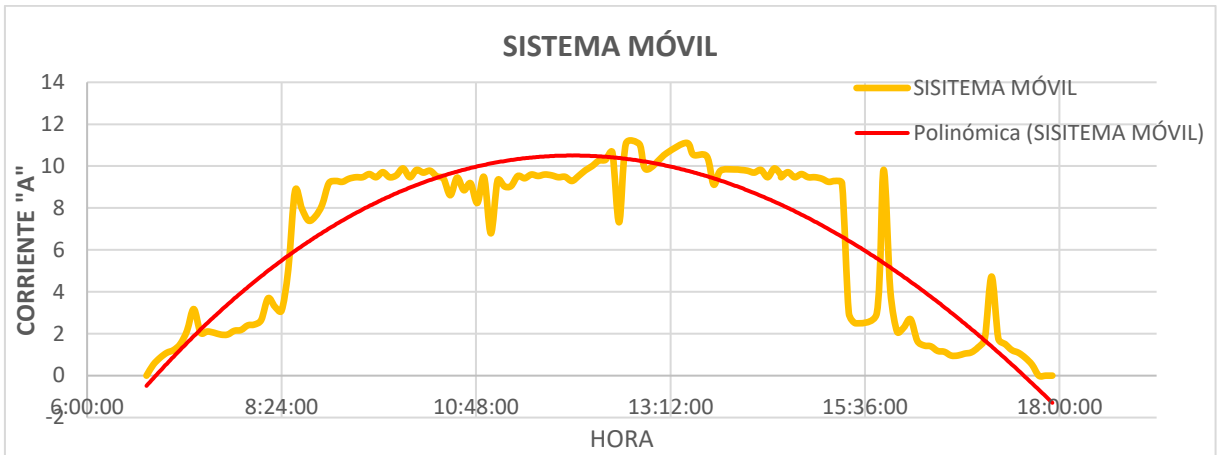
#### 5.4.2 Sistema fotovoltaico móvil

A continuación, se muestra la gráfica de generación de corriente del sistema móvil correspondiente al mismo día.



**Figura 5.7** Generación de corriente del sistema fotovoltaico móvil

Se puede evidenciar claramente que existe mayor generación de corriente a diferencia de la gráfica del sistema fijo, en la gráfica del sistema móvil en ciertos puntos llega superar los 10 Amperes, y en el sistema fijo durante todo el día no supera los 8,5 Amperes, además también se aprecia las perturbaciones muy parecidas a la gráfica del sistema fijo debido al paso de las nubes, por lo que se procede a eliminar estos picos, teniendo la siguiente figura.

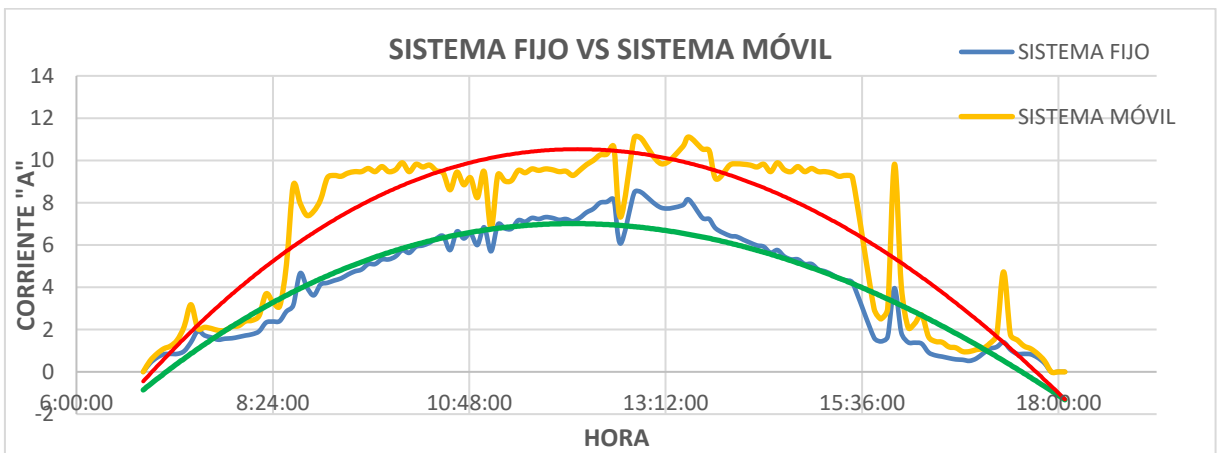


**Figura 5.8** Generación de corriente del sistema fotovoltaico móvil sin perturbaciones

Como resultado de la eliminación de los errores se tiene una gráfica con menos fluctuaciones en los datos, teniendo así una gráfica más parecida a la línea de tendencia.

#### 5.4.3 Sistema fotovoltaico fijo y móvil.

En la siguiente figura se muestra la gráfica correspondiente al sistema fijo y móvil con menos fluctuaciones en los datos, donde se puede apreciar un claro incremento de producción de corriente en el sistema fotovoltaico móvil donde en ciertos puntos la corriente aumenta hasta 4 Amperes, y el sistema fijo siempre tiene una menor producción menor que el móvil.



**Figura 5.9** Generación de corriente del sistema móvil y fijo

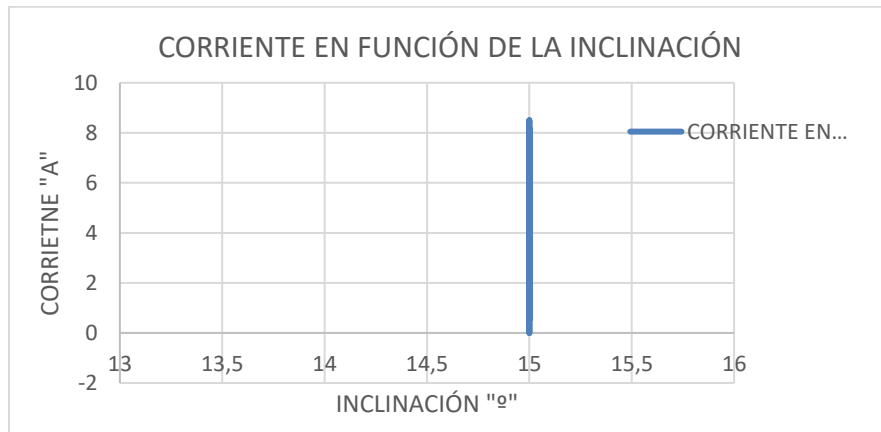
Para determinar de mejor manera el incremento de producción en manera porcentual se procede a realizar un promedio de todos los datos recogidos del sistema fijo y promedio de los datos del sistema móvil, después de esto se procede a determinar el incremento porcentual mediante la siguiente ecuación.

$$\text{Incremento porcentual} = \frac{\text{Valor final} - \text{Valor inicial}}{\text{Valor inicial}} * 100 \quad (5.1)$$

Al aplicar la ecuación 5.1 con los valores de corriente promedio del sistema fijo y móvil, se determinó que el incremento es de **19.85%** más que sistema fijo, comprobando que con el sistema de control de posición si existe un mayor aprovechamiento del recurso solar representado en el incremento de producción de corriente.

#### 5.4.4 Sistema fotovoltaico fijo en función de la inclinación

Además, se muestra el comportamiento de la corriente en función de la inclinación de los paneles solares, donde se puede apreciar que, en la configuración del sistema fijo, la gráfica indica una línea que llega hasta los 8 Amperes y debido a que la inclinación es constante toda la línea se grafica sobre los 15°.

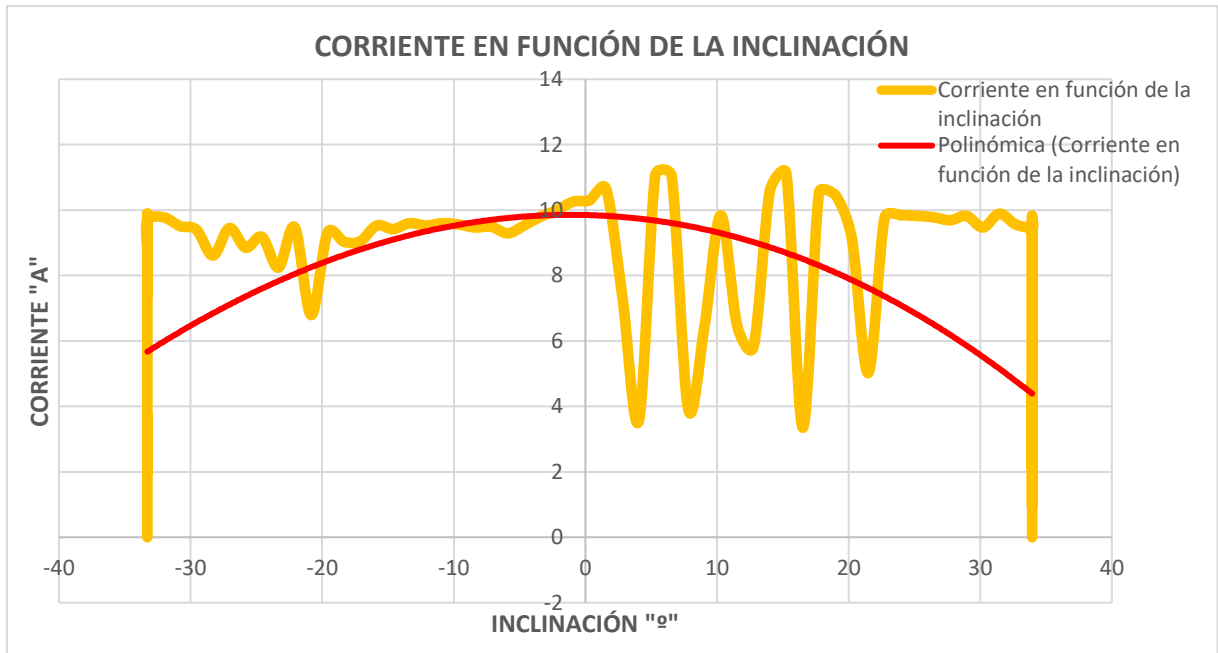


**Figura 5.10** Corriente del sistema fijo en función de la inclinación

#### 5.4.5 Sistema fotovoltaico móvil en función de la inclinación

Por otra parte, también se grafica la corriente del sistema fotovoltaico móvil en función de la inclinación en grados, donde se aprecia la variación de la corriente comienza por la parte negativa y termina en la parte positiva de la inclinación, esto es debido a que la inclinación hacia el este se representa de forma negativa y la inclinación al oeste de forma positiva, además, de que el sol sale por el este y se oculta por el oeste, por último se apreció que los límites en la inclinación es de 33° debido a las condiciones mecánicas de la estructura del seguidor.





**Figura 5.11** Corriente del sistema móvil en función de la inclinación

En la figura anterior se puede apreciar que a partir de los  $-33^\circ$  y hasta  $+33^\circ$  se registra una mayor producción de corriente, debido a que en este rango existe mayor control de movimiento sobre los paneles ya que está dentro de los límites mecánicos de la estructura del seguidor, y corresponde a horas durante el mediodía, y los límites corresponden a horas de la mañana y tarde donde la generación es menor.

## 5.5 TABULACIÓN DE RESULTADOS

En a la siguiente tabla se muestra la tabulación de los datos recogidos durante un día de producción, donde se aprecia la irradiancia, posición del sol, inclinación del sistema fotovoltaico móvil, corriente generada de los sistemas fijo y móvil, para cada hora del día, partiendo desde las 6:45 am hasta la 18:04 pm, además también de muestra la ubicación geográfica del sistema fotovoltaico, la diferencia horaria, y la fecha en la cual se realizó la prueba de funcionamiento.

**Tabla 5.3** Tabulación de datos del sistema fotovoltaico fijo y móvil

SISTEMA FOTOVOLTAICO FIJO Y MÓVIL								
	Latitud ( $\varphi$ )		-0,917342					
	Longitud ( $\lambda$ )		78,633058					
	Diferencia horaria ( $\Delta$ _GMT)		-5					
	Fecha		23/2/2022					
Hora	IRRADIANCIA (Wh/m <sup>2</sup> )		POSICIÓN DEL SOL (°)		INCLINACIÓN SISTEMA MÓVIL (°)		CORRIENTE (A)	
	Panel fijo	Panel móvil	Elevación ( $\beta$ )	Azimut (Az)	Elevación máxima N(+) S(-)	Ángulo horario E(-) W(+)	Sistema fijo	Sistema móvil
6:45:58	0,00	0,00	4,413	99,834	-8,957458	-33,286	0	0
7:45:58	352,81	527,43	19,128	100,136	-8,957458	-33,286	1,52	1,96
8:45:58	413,95	538,93	33,809	101,286	-8,957458	-33,286	4,66	7,98
9:45:58	442,96	577,30	48,396	103,903	-8,957458	-33,286	4,83	9,21
10:48:58	645,69	688,12	63,654	110,741	-8,957458	-24,915	6,55	9,18
11:48:58	716,32	744,62	76,634	132,42	-8,957458	-9,975	7,28	9,56
12:48:58	748,53	751,80	79,654	209,85	-8,957458	5,205	8,48	11,07
13:48:58	731,64	737,37	68,055	245,215	-8,957458	20,145	6,77	9,12
14:48:58	627,41	715,36	53,981	254,357	-8,957458	33,944	5,32	9,71
15:49:47	293,76	439,53	39,186	257,981	-8,957458	33,944	1,44	2,5
16:49:47	117,50	175,81	24,529	259,559	-8,957458	33,944	0,57	0,96
17:49:47	84,53	126,48	9,822	260,137	-8,957458	33,944	0,41	0,52
18:04:47	0,00	0,00	6,142	260,167	-8,957458	33,944	0	0

En la tabla anterior, la inclinación E-O, corresponde al ángulo horario de las ecuaciones de seguimiento astronómico, por la mañana (este) es negativo, al medio día es cero, en la tarde (oeste) es negativo, teniendo valores máximo de +33 y -33 debido a las prestaciones mecánicas del seguidor solar, en cambio la inclinación N-S corresponde a la elevación máxima del sol, la cual va variando durante todo el año desde (-23.45, +23.45), cuando el sol se posiciona al sur (solsticio de invierno) el ángulo de inclinación del sistema es negativo, en cambio al posicionarse al norte (solsticio de verano) de la estación fotovoltaico el ángulo es positivo, y al situarse por encima de la estación fotovoltaica (equinoccios) el ángulo tiene un valor de cero, por lo que los paneles se ubicaran de manera horizontal.

## 5.6 CONSUMO DE ENERGÍA DEL MOTOR COMPARADO CON EL AUMENTO DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA.

El objetivo es determinar si la energía consumida para dar movimiento a los paneles solares es menor a la energía adicional que se aprovecha debido al funcionamiento del sistema de control de posición, en primer lugar, se determina la potencia del motor que provoca el movimiento, el tiempo de funcionamiento durante el día en horas, lo cual conlleva a determinar la energía consumida por el motor durante un día de funcionamiento correspondiente a 10.36 Wh, como e muestra en la siguiente tabla.

**Tabla 5.4** Energía consumida por el motor

<b>Energía consumida</b>			
<b>Hora</b>	<b>Tiempo de funcionamiento (horas)</b>	<b>Potencia del motor (W)</b>	<b>Energía consumida (Wh)</b>
6:00:00	0,0392	48	1,8816
7:00:00	0,0125	48	0,6
8:00:00	0,0125	48	0,6
9:00:00	0,0125	48	0,6
10:00:00	0,0125	48	0,6
11:00:00	0,0125	48	0,6
12:00:00	0,0125	48	0,6
13:00:00	0,0125	48	0,6
14:00:00	0,0125	48	0,6
15:00:00	0,0125	48	0,6
16:00:00	0,0125	48	0,6
17:00:00	0,0125	48	0,6
18:00:00	0,0392	48	1,8816
	<b>ENERGÍA TOTAL CONSUMIDA EN UN DÍA</b>		<b>10,36</b>

Al disponer de un sistema de control de posicionamiento solar, la generación de energía eléctrica de los paneles solares móviles aumenta en base al movimiento, por tal motivo se muestra el valor de generación del panel al permanecer perpendicular al sol.

La potencia de generación de cada panel es de 140 W, el tiempo que el sol permanece presente en la Tierra es de 12 horas, entonces la generación de energía del sistema solar con seguimiento es de 1.6 KWh, de este valor se obtiene el 18.85% que representa el aprovechamiento adicional, y se resta la energía consumida por el motor la cual es menos del 1% de la energía que genera el panel, como se muestra a continuación.

**Tabla 5.5** Energía aprovechada

Energía aprovechada real				
Concepto	Valor	Concepto	Energía (Wh)	%
Potencia panel (W)	118,90	Aprovechamiento (19,85%) en (Wh)	283,22	19,85%
Tiempo funcionamiento (Horas)	12	Consumo motor (Wh)	10,36	0,73%
Energía panel (Wh)	1426,84	Energía aprovechada	272,86	19,12%

### 5.7 PRESUPUESTO

Durante el desarrollo de la implementación han intervenido varios factores como: le valor de equipos, tiempo en programación y pruebas, entre otros por lo que infiere en costos que se muestran a continuación.

**Tabla 5.6** Gastos

DESCRIPCIÓN	VALOR
Materiales y suministros	1165 \$
Gastos indirectos	10 \$
Gastos imprevistos	290 \$
Mano de obra	800 \$
<b>Inversión total</b>	<b>2265 \$</b>

## **5.8 ANÁLISIS DE IMPACTO**

### **5.8.1 Impacto tecnológico**

La implementación de un sistema de control para un seguidor solar de dos ejes conlleva al conocimiento de nuevos recursos tecnológicos que permiten aprovechar la energía solar, en este caso en un 30% de irradiación incidente que resulta en un 19.85% de corriente de generación en los paneles móviles, lo que representa mayor irradiación incidente y corriente de generación que los paneles fijos.

### **5.8.2 Impacto ambiental**

El desarrollo de este sistema de control al ser implementado en un sistema de energía renovable aporta al cuidado del medio ambiente ya que utiliza directamente el recurso solar para la generación de energía, vale recalcar que los dispositivos utilizados para generar el movimiento en el seguidor solar no generan ruido en el medio ambiente.

## **6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **6.1 CONCLUSIONES**

- Mediante la revisión bibliográfica, se determina 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, a diferencia, en el caso del control por punto luminoso que presentan errores de posicionamiento en condiciones climáticas y fallas de los sensores de radiación.
- Al realizar el dimensionamiento de los equipos se tuvo como resultado que los actuadores lineales deben tener una fuerza mayor a 1000 N, una carrera de 700 mm y una velocidad de 5 mm/s, y un sensor inclinómetro con una resolución de 0.1°, lo que no permite tener mayor control de movimiento de los paneles, además cada equipo seleccionado tiene un grado de protección IP65.
- En la instalación del equipo se configuró los límites con un máximo de  $-33^\circ$  de inclinación en sentido este, y  $33^\circ$  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 corriente se eleva en un 19.85% más que el panel solar en configuración fija.

## **6.2 RECOMENDACIONES**

- Se recomienda comparar el tipo de control implementado (ON-OFF) con otros diferentes tipos de control existentes como: PID, u otros, que permitirán demostrar cual de estos sistemas genera un mejor control sobre los actuadores.
- Al realizar otro tipo de algoritmo de seguimiento como por ejemplo el algoritmo por punto luminoso o híbrido, se podría constatar cuál de ellos genera más aprovechamiento del recurso solar en la zona al igual que la diferencia en precios de instalación y mantenimiento.
- Al establecer la comunicación entre la PC y el controlador, es necesario verificar los registros de memoria donde se va a leer o escribir, de manera que no interfiera en la configuración del equipo provocando fallas en el sistema.
- Se recomienda realizar nuevos experimentos, cuyos datos permitan el análisis del comportamiento de generación de los paneles al estar conectados a una carga, mientras el sistema de control de posición está en funcionamiento.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

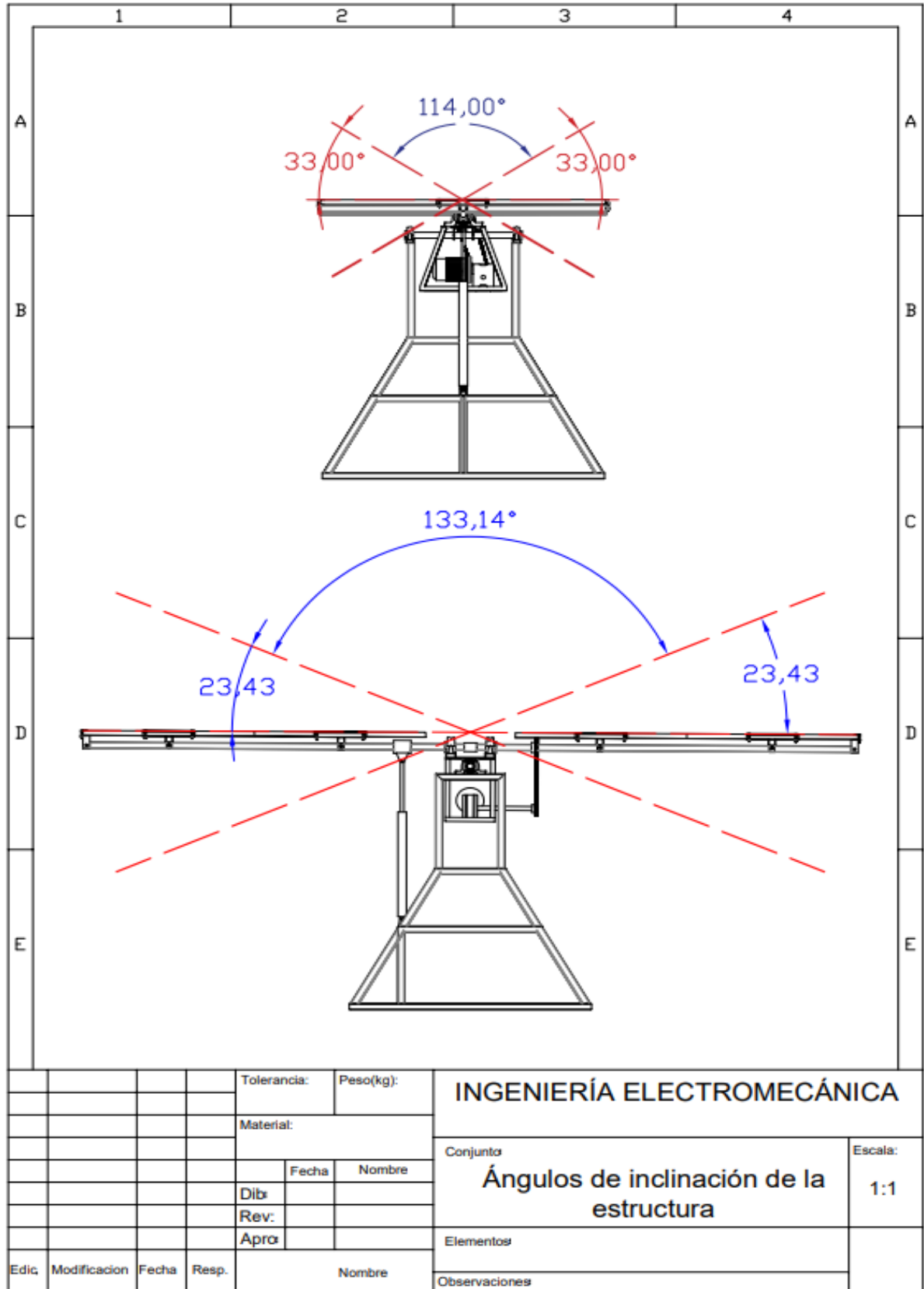
- [1] N. Machado Toranzo, A. Lussó Cervantes, L. L. Oro Carralero, J. Bonzon Henríquez y O. Escalona Costa, «Seguidor Solar, optimizando el aprovechamiento de la energía solar,» *SCIELO*, vol. 36, n° 2, 2015.
- [2] D. E. M.J. Clifford, «Diseño de un novedoso seguidor solar pasivo,» *ELSEVIER*, vol. 77, n° 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, n° 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, n° 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*, n° 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-sol-2.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*, Méxoco, 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].



## 8. ANEXOS

### Anexo 1. Inclinaciones máximas de la estructura del seguidor.



## Anexo 2. Ficha técnica del controlador

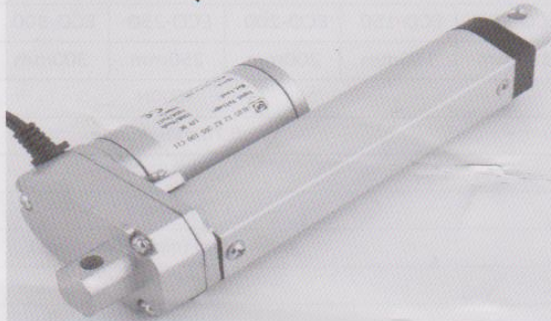
### TECHNICAL SPECIFICATIONS

Tracking method	Single axis solar tracker	Dual axis solar tracker
Horizontal axis tracking range (°)	MAX: -80°~+80°	MAX: -160°~+160°
Pitch axis tracking range (°)	Fixed: 0°~ 60°	MAX: 0°~ 80°
Control algorithm	GPS + Astronomical algorithm	
Tracking accuracy	≤ 1°	
Tracking range (°)	-80°~+80°	
Data storage protection	Yes	
Debugging software	Yes	
Back tracking	Yes	
Manual function	Yes	
Remote function	Remote wind and snow protection, manual, reset, etc.	
Limit protection	Software and hardware limit protection	
Over limit fault warning	Yes	
Motor or actuator fault warning	Yes	
Inclination position feedback	Yes	
<b>Input</b>		
Input Voltage Range	85~264VAC/180~264VAC	
Rated Input Voltage	110/220VAC	
Max. Rated Input Current	MAX:3.6A (110V) /1.8A (220V)	
Input Frequency Range	47~63HZ	
Power isolation	Yes	
Power surge protection	Yes	
<b>Output</b>		
Rated Output Voltage	Default: 24VDC; Optional: 12/24/48VDC or 110/220VAC	
Max. Rated Output Current	MAX:14A	
Overload protection	Rated power105~135%,Automatic recovery after abnormal removal.	
<b>Communication</b>		
Display	LED Indicators	
RS485-MODBUS	Yes	
Wireless	LoRa/Zigbee	
<b>General</b>		

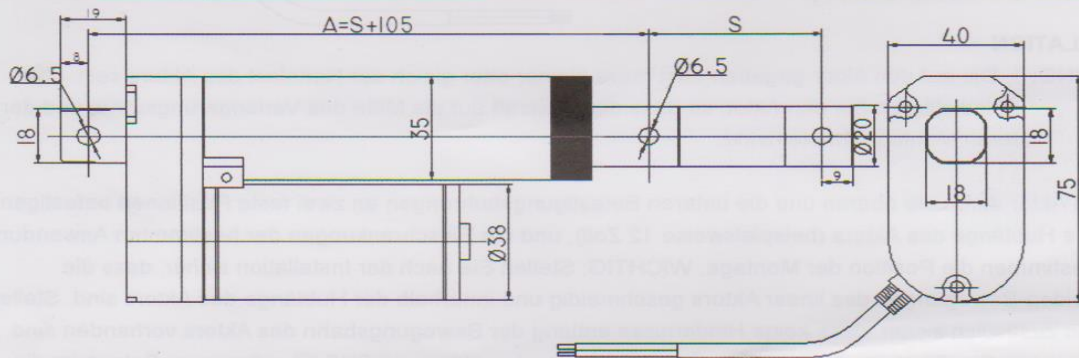
<b>Processor</b>	<b>32-bits DSP core digital processor</b>
<b>GPS global Positioning</b>	<b>Optional</b>
<b>Wind sensor</b>	<b>Optional</b>
<b>Emergency Stop Switch</b>	<b>Yes (Brand: ABB)</b>
<b>Controller Dimensions (W x H x D)</b>	<b>400 x 300 x 200 mm (15.8 x 11.9 x 7.9 inch)</b>
<b>Package Dimensions (W x H x D)</b>	<b>580 x 440 x 260 mm (22.9 x 17.4 x 10.3 inch)</b>
<b>Device Weight</b>	<b>8 kg (17.7 lb.)</b>
<b>Package Weight</b>	<b>13 kg (28.7 lb.)</b>
<b>Operating Environment</b>	<b>-40°C ~ +70°C (-40°F ~ 158°F) 0 ~ 100% Non-condensing</b>
<b>Max. Operating Altitude</b>	<b>4,500 m (14,763 ft.)</b>
<b>Connector</b>	<b>Waterproof aviation plug</b>
<b>Protection Degree</b>	<b>IP65</b>
<b>Self-consumption (No load)</b>	<b>≤6W</b>
<b>Certificate</b>	<b>ISO9001,CE</b>

## Anexo 3. Ficha técnica del actuador lineal

### ECO-WORTHY LINEAR ACTUATOR



SPECIFICATIONS	ECO-50	ECO-100	ECO-150	ECO-200	ECO-250	ECO-300	ECO-350	ECO-400	ECO-450
Stroke Length	50mm	100mm	150mm	200mm	250mm	300mm	350mm	400mm	450mm
Rated Load	1500N								
Travel Speed (Max)	5.7mm/second								
Rated Voltage	12VDC								
Rated Current	3Amps								
Limit Switches	Fixed Inner ( not Adjustable )								
Operation Temperature	-20°C to +65°C								
Protection Class	IP65								
Duty Cycle	25%								
Noise Level	<=50dB								



#### INSTALLATION

**WARNING:** 1. The load added onto the actuator must be less than or equal to the rated load of actuator.

2. Install actuator so the force of the load acts in the center of the extension tube and the rear mounting adapter.

1. Mount the actuator by securing the top and bottom mounting holes to two fixed positions. The stroke length of the actuator (e.g. 12 inches) and the limitations of the particular application will determine the location of the fixed mounting positions.

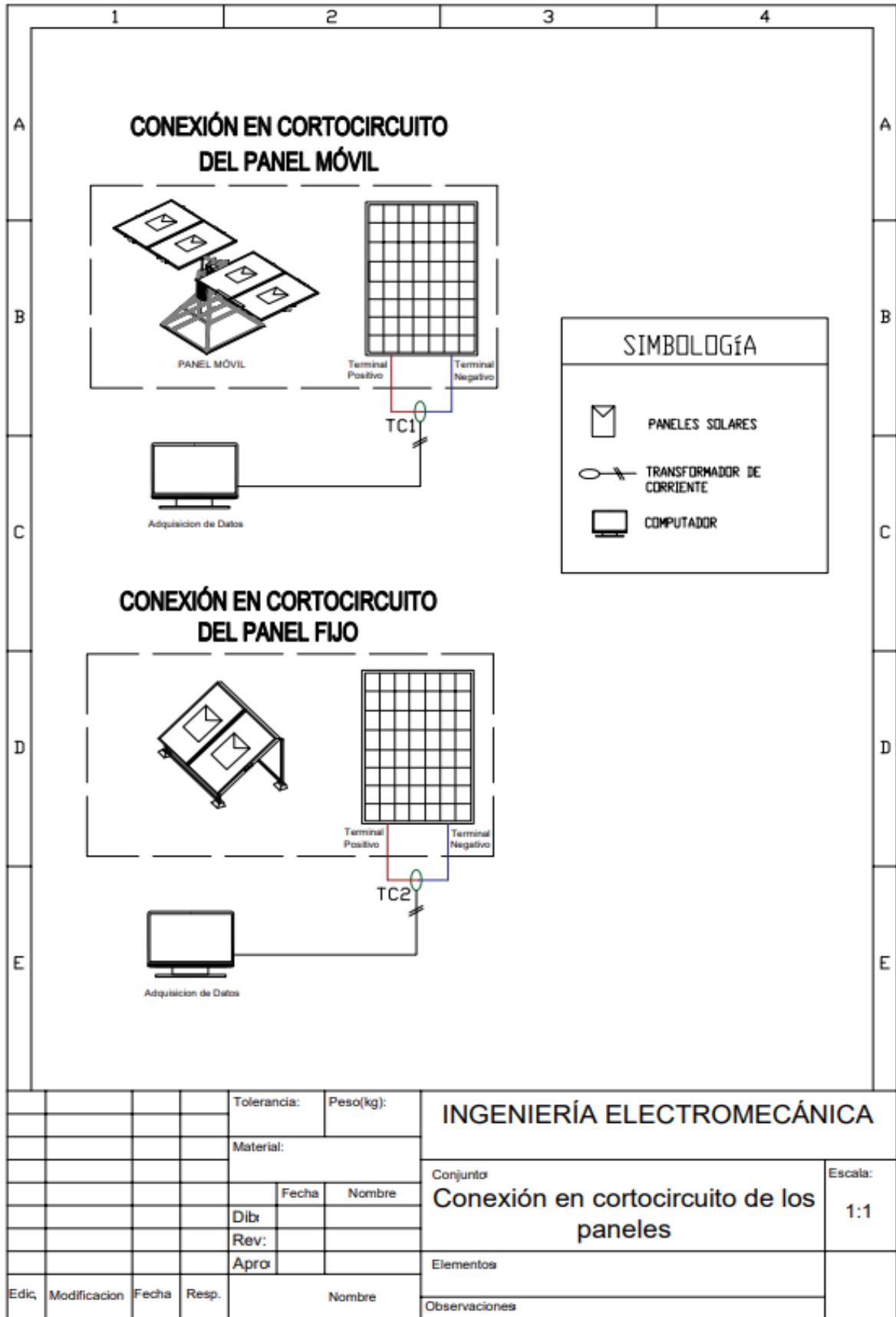
**IMPORTANT:** Confirm that the two-way movement of the linear actuator is smooth and within the actuator's stroke length after it has been installed. Additionally, confirm that no obstacles exist along the travel path of the actuator.

2. Secure the top and bottom mounting holes of the linear actuator onto the two mounting fixtures using 5/16" diameter bolts.
3. Connect the red wire to the positive post and the black wire to negative post of the DC power supply.
4. The operation of the linear actuator should be tested manually after the installation is completed.

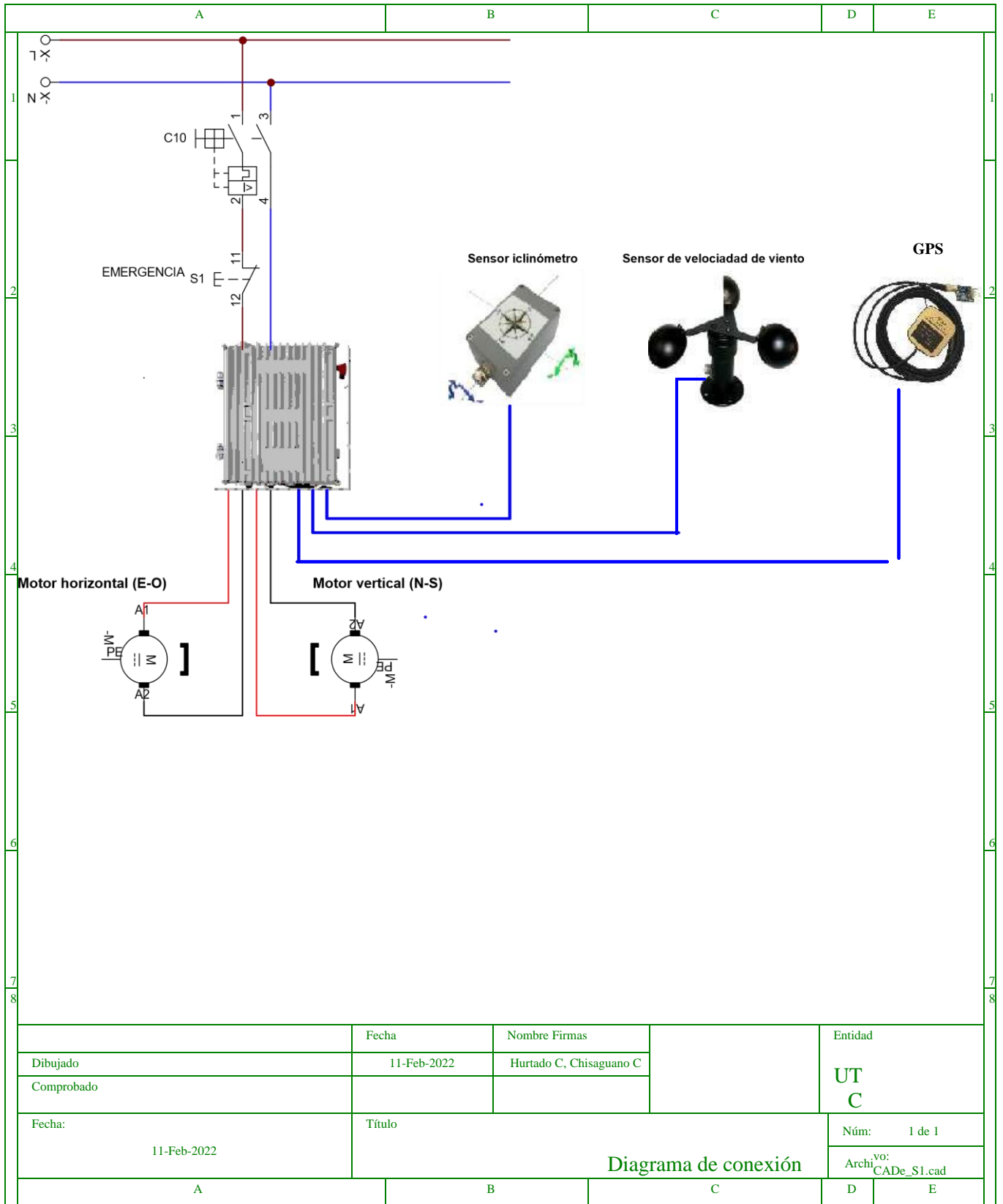
Users should use caution to ensure that:

- The travel distance of the actuator satisfies the requirement of the structural design.
- The extended and retracted limit switches operate normally (The limit switches should stop the motor when the extension tube is fully retracted or fully extended)
- If the motor runs too slow or does not give full force, (1) the power supply is insufficient and needs to be increased or (2) the load being applied to the actuator is too great and needs to be reduced to less than or equal to 330 lbs.

Anexo 4. Conexión de cortocircuito de los paneles solares.



## Anexo 5. Conexión



## Anexo 6. Interfaz HMI en funcionamiento

