

Optimization of Solar Capture Using a Dual-Axis Tracker Based on an Astronomical Algorithm in a Small-Scale Photovoltaic Station

Optimización de la Captación Solar mediante un Seguidor de Doble Eje Basado en Algoritmo Astronómico en una Estación Fotovoltaica de Pequeña Escala

C.F. Gallardo¹ 0009-0007-3706-8892L.R. Cruz¹ 0000-0003-3618-8853

¹Universidad Técnica de Cotopaxi, Cotopaxi, Latacunga, Ecuador
E-mail: cristian.gallardo@utc.edu.ec, luís.cruz@utc.edu.ec

Abstract

This paper presents the design, implementation, and evaluation of a dual-axis solar tracking system based on an intermediate-resolution astronomical algorithm. The system was installed on the rooftop of Block B at the Technical University of Cotopaxi and consists exclusively of photovoltaic modules, with no inverters or loads, allowing safe measurement of short-circuit current (I_{sc}) as an indicator of energy capture. Two calibrated photovoltaic reference cells were used to record the incident irradiance on both a mobile and a fixed array (inclined at 15° north). The astronomical algorithm calculates solar elevation and azimuth angles in real time, triggering actuator movement when angular deviation exceeds $\pm 1^\circ$. Results show a 19.85% average increase in irradiance captured by the mobile system compared to the fixed system. Additionally, the correlation between inclination angle and irradiance is analyzed, and the solar path model is validated. This research constitutes the first phase of a broader project that will integrate hybrid control strategies and economic analysis in future stages.

Resumen

Este trabajo presenta el diseño, implementación y evaluación de un sistema de seguimiento solar de doble eje basado en un algoritmo astronómico de resolución intermedia. El sistema fue instalado en la terraza del Bloque B de la Universidad Técnica de Cotopaxi, y se conforma exclusivamente por módulos fotovoltaicos, sin inversores ni cargas, permitiendo así la medición segura de la corriente de cortocircuito (I_{sc}) como variable de análisis. Se emplearon dos celdas fotovoltaicas calibradas para registrar la irradiancia incidente en un sistema móvil y otro fijo (inclinado a 15° hacia el norte). El algoritmo astronómico calcula en tiempo real los ángulos de elevación y acimut, activando el movimiento cuando la diferencia angular supera $\pm 1^\circ$. Los resultados indican un incremento promedio del 19.85 % en la irradiancia captada por el sistema móvil respecto al fijo. Se incluye además un análisis de correlación entre el ángulo de inclinación y la irradiancia, así como validación de la trayectoria solar calculada. Esta investigación representa la primera fase de un proyecto que integrará control híbrido y análisis económico en etapas futuras.

Index terms— Dual-axis tracking, Photovoltaic system, Position control, Solar resource optimization

Palabras clave— Seguimiento de doble eje, sistemas fotovoltaicos, control de posición, optimización del recurso solar.

Recibido: 04-05-2025, Aprobado tras revisión: 04-07-2025

Forma sugerida de citación: Gallardo, C.; Cruz, L. (2025). "Optimización de la Captación Solar mediante un Seguidor de Doble Eje Basado en Algoritmo Astronómico en una Estación Fotovoltaica de Pequeña Escala". Revista Técnica "energía". No. 22, Issue I, Pp. 70-79.

ISSN On-line: 2602-8492 - ISSN Impreso: 1390-5074

Doi: <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v21.n2.2025.711>

© 2025 Autores



Esta publicación está bajo una licencia internacional Creative Commons Reconocimiento – No Comercial 4.0



1. INTRODUCCIÓN

La creciente demanda energética mundial y la necesidad de reducir el impacto ambiental asociado a la generación de electricidad han impulsado el desarrollo de tecnologías basadas en fuentes renovables. Entre ellas, la energía solar fotovoltaica destaca por su disponibilidad global, su carácter limpio y su potencial de escalabilidad tanto en aplicaciones residenciales como industriales [1].

Aunque los costos de los módulos fotovoltaicos han disminuido de manera significativa en la última década, mejorar la eficiencia de captación de la radiación solar sigue siendo un desafío técnico relevante [2]. Tradicionalmente, los sistemas fotovoltaicos de instalación fija aprovechan solo una fracción de la energía solar disponible, debido a la variación diaria y estacional de la posición del sol respecto a la superficie terrestre.

En respuesta a esta limitación, el uso de sistemas de seguimiento solar se ha consolidado como una estrategia efectiva para incrementar la captación de energía. Los seguidores solares de doble eje permiten que los módulos fotovoltaicos mantengan una orientación casi perpendicular a los rayos solares a lo largo del día y del año, optimizando así el rendimiento del sistema. Estudios reportan incrementos de hasta un 40 % en la generación anual de energía en comparación con instalaciones fijas, dependiendo de la ubicación geográfica y las condiciones climáticas locales [3][4].

En el contexto ecuatoriano, caracterizado por altos niveles de irradiación solar y una ubicación geográfica privilegiada, la implementación de sistemas de seguimiento solar representa una oportunidad estratégica para maximizar el aprovechamiento del recurso solar [5]. Sin embargo, el desarrollo de tecnologías de seguimiento de bajo costo, confiables y adaptables a sistemas de pequeña escala aún enfrenta desafíos técnicos y de integración.

Este trabajo presenta la implementación de un sistema de seguimiento solar de doble eje en una estación fotovoltaica de 560 Wp ubicada en Latacunga, Ecuador. El sistema utiliza un algoritmo astronómico para determinar en tiempo real la posición del sol, combinado con un esquema de control ON-OFF basado en la comparación entre los ángulos calculados y los medidos por un inclinómetro digital. Se evalúa experimentalmente el desempeño del sistema en comparación con una instalación fija, analizando la mejora en la captación de irradiancia diaria.

2. ANTECEDENTES DE INVESTIGACIÓN

El seguimiento solar ha sido ampliamente investigado como estrategia para incrementar la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos, particularmente en regiones con altos niveles de irradiancia. De acuerdo con estudios recientes, un sistema de seguimiento solar de doble eje puede incrementar la captación de energía entre un 30 %

y un 50 % en comparación con instalaciones de inclinación fija [3][4].

Los sistemas de seguimiento se clasifican según sus grados de libertad y la tecnología de rastreo utilizada.

Dentro de los grados de libertad, los sistemas de un solo eje permiten el movimiento de los paneles en una dirección (usualmente este-oeste), mientras que los de doble eje ajustan simultáneamente la elevación y el acimut, manteniendo de manera más precisa la perpendicularidad de los módulos respecto a los rayos solares a lo largo del día y del año [6].

En cuanto a la tecnología de rastreo, se identifican:

- Sistemas pasivos, que se activan por efectos térmicos y no requieren electrónica, aunque su ganancia energética es menor.
- Sistemas activos, que usan motores eléctricos y estrategias de control más precisas.
- Sistemas ópticos, basados en sensores de luz (LDR), con buena respuesta en condiciones de cielo despejado.
- Sistemas astronómicos, que emplean algoritmos de cálculo solar en función de fecha, hora y coordenadas geográficas, y presentan mayor robustez en condiciones variables del clima.
- Sistemas híbridos (astronómico + óptico), optimizan su comportamiento al considerar variables medidas de nubosidad e irradiancia disponible [7].

Tabla 1: Comparativa de Algoritmos Astronómicos

Algoritmo	Precisión	Complejidad	Ventajas principales	Fuente
SPA (Solar Position Algorithm)	$\pm 0.0003^\circ$	Alta	Alta precisión; base del NOAA; ideal para sistemas de concentración	[18]
Grena 1-5	0.2° a 0.0027°	Media-Alta	Adaptable según necesidad de precisión y carga computacional	[18]
SG2 (Blanc & Wald)	± 10 arcsec	Baja	Velocidad computacional muy alta; útil en grandes bases de datos	[18]
Michalsky	$\pm 0.01^\circ$	Alta	Precisión aceptable, pero no funciona bien en el hemisferio sur	[18]

La elección del algoritmo depende del tipo de aplicación: en sistemas de concentración solar se exige alta precisión (SPA o Grena 5), mientras que en sistemas fotovoltaicos comunes se toleran errores de hasta 1° sin pérdidas significativas [18].



El seguimiento astronómico ha demostrado ser particularmente efectivo en zonas con alta radiación directa y variabilidad atmosférica moderada, debido a su independencia de condiciones locales [8]. Además, su implementación resulta viable en proyectos de pequeña escala.

En el contexto ecuatoriano, estudios recientes muestran niveles de irradiación superiores a 4.5 kWh/m²/día en la región interandina [5]. Investigaciones locales indican que el uso de sistemas de seguimiento de doble eje puede aumentar la captación anual de energía solar en más de un 30 %, dependiendo de las condiciones específicas de la ubicación [9].

3. MÉTODOS Y MATERIALES

3.1 Descripción del Sistema Fotovoltaico

El sistema fotovoltaico objeto de estudio se encuentra ubicado en la terraza del Bloque B de la Universidad Técnica de Cotopaxi, campus matriz, en Latacunga, Ecuador (Latitud: -0.917342° , Longitud: -78.633058°). La instalación está compuesta por cuatro módulos solares policristalinos de 140 Wp cada uno, sumando una potencia total instalada de 560 Wp.

Los módulos están montados sobre una estructura metálica adaptada para permitir el movimiento en dos ejes: azimutal (Este-Oeste) y de elevación (Norte-Sur). El sistema opera de manera aislada y fue diseñado para la evaluación comparativa de la captación de energía bajo condiciones de seguimiento móvil y configuración fija. Cabe destacar que el sistema implementado no cuenta con inversores, almacenamiento ni cargas conectadas; está conformado únicamente por los paneles fotovoltaicos, lo que permitió realizar ensayos eléctricos en condiciones de cortocircuito para analizar directamente la captación de irradiancia mediante la corriente generada.

Adicionalmente, se montó un conjunto de referencia con módulos fijos inclinados a 15° hacia el norte, para comparar su captación de irradiancia con la del sistema móvil.

3.2 Diseño Mecánico y Eléctrico del Seguidor Solar

El sistema de seguimiento de doble eje está impulsado por dos actuadores lineales eléctricos de 12 VDC, diseñados para soportar el peso de los módulos y la estructura, con una carrera de 700 mm y una capacidad de carga superior a 1000 N.

El control de los actuadores se realiza mediante relés activados por un controlador lógico, alimentado a 110 VCA, con salidas de 12 VDC para accionar los motores. La medición de la posición angular se efectúa mediante un sensor inclinómetro digital con una resolución de $0,1^\circ$.

El sistema de seguimiento solar de doble eje fue diseñado y construido íntegramente para el presente

proyecto. La resolución angular en el diseño mecánico del sistema se estimó en aproximadamente 0.5° de corrección de la posición angular. Debido a que cada actuador cuenta con una carrera de 700 mm, y al estar articulado en un punto, se genera una variación de aproximadamente 14 mm que equivale a un desplazamiento angular cercana a 0.5° por cada desplazamiento incremental lineal del actuador.

En la Figura 1 se muestra el alcance angular del eje Norte-Sur, correspondiente al ajuste estacional, que permite un recorrido total de 46.86° , equivalente a $\pm 23.43^\circ$ desde la posición perpendicular, abarcando el rango solar entre los solsticios.

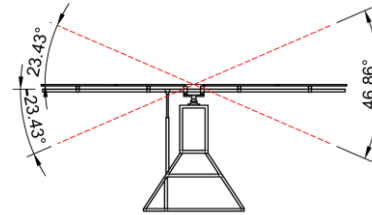


Figura 1: Alcance Angular del Eje de Inclinación Norte-Sur del Seguidor Solar de Doble Eje

Por su parte, el eje Este-Oeste, correspondiente al movimiento diario del Sol, el cual permite un giro útil de $\pm 33^\circ$, lo que corresponde a un rango total de 66° , como se ilustra en la Fig. 2.

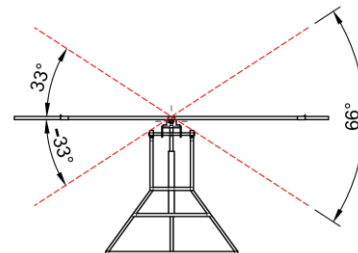


Figura 2: Alcance Angular del Eje de Orientación Este-Oeste del Seguidor Solar

La estructura metálica, de construcción robusta y soldada, se muestra implementada en la terraza del bloque B de la Universidad Técnica de Cotopaxi en la Fig. 3, evidenciando su funcionalidad completa y capacidad para soportar las condiciones climáticas locales.



Figura 3: Implementación Física del Sistema de Seguimiento Solar en la Terraza del Bloque B (UTC – Matriz)

3.3 Implementación del Algoritmo de Seguimiento Astronómico

En este proyecto se optó por implementar un algoritmo astronómico de resolución intermedia, basado en ecuaciones fundamentales de geometría solar que permiten calcular los ángulos de elevación y acimut solar en función de la fecha, la hora y la ubicación geográfica. Esta elección se debe a su bajo requerimiento computacional, independencia de las condiciones atmosféricas y precisión adecuada para sistemas de baja y media escala.

Aunque existen algoritmos más avanzados como el SPA (Solar Position Algorithm) o los modelos de Grena, se seleccionó una formulación inspirada en Spencer y refinada por Michalsky, ya que ofrece un balance óptimo entre exactitud (errores menores a 0.5°), velocidad de cálculo y facilidad de implementación en microcontroladores de bajo costo.

El objetivo principal del algoritmo es calcular en tiempo real la posición solar (elevación y acimut), considerando parámetros como latitud, longitud, fecha y hora locales. Estos valores son enviados al controlador, que los compara con las lecturas del inclinómetro digital. Si la diferencia angular supera el umbral definido, se activa la lógica ON-OFF que controla el movimiento de los actuadores lineales.

Las principales ecuaciones utilizadas incluyen:

La declinación solar (δ) es el ángulo que forma el eje polar terrestre con el eje de la elíptica que describe el movimiento de la tierra alrededor del sol, este ángulo varía entre -23.45° y $+23.45^\circ$ dependiendo de las estaciones del año. Se calcula mediante la ecuación (1).

$$\delta = 23.45 * \sin\left(\left(\frac{360}{365}\right)(d + 285)\right) \quad (1)$$

Donde d es el número de día del año.

El tiempo estándar del meridiano de Greenwich ($LSTM$) se calcula en función de la diferencia horaria entre la localidad (LT) y el meridiano Greenwich (GMT) representado por Δ_{GTM} . Esta diferencia se multiplica por 15° como se indica en (2), considerando positiva la diferencia al este de Greenwich y negativa al oeste. Para el caso de estudio $\Delta_{GTM} = -5$

$$LSTM = 15^\circ * \Delta_{GTM} \quad (2)$$

La corrección del tiempo por la excentricidad terrestre (EoT), expresada en minutos, permite ajustar el desfase producido por la forma elíptica de la órbita terrestre y su inclinación, según la ecuación (3).

$$EoT = 9.87 * \sin(2B) - 7.53 * \cos(B) - 1.5 * \sin(B) \quad (3)$$

Donde B es una función del día del año dada en grados y se calcula usando la ecuación (4).

$$B = \left(\frac{360}{365}\right)(d - 81) \quad (4)$$

El factor de corrección del tiempo (TC) se calcula tomando en cuenta la longitud geográfica de la localidad (λ), expresada en grados, el tiempo estándar del meridiano local ($LSTM$) calculado en (2), y la corrección por excentricidad terrestre (EoT) obtenida mediante (3). Esta corrección permite ajustar el tiempo solar local y se calcula con la ecuación (5).

$$TC = 4 * (\lambda - LSTM) + EoT \quad (5)$$

Con este valor se puede obtener el tiempo solar local (LST), ajustando el tiempo local con la corrección mencionada, como se indica en (6).

$$LST = LT + \frac{TC}{60} \quad (6)$$

El ángulo horario (HRA) representa el desplazamiento angular del sol respecto al medio día solar, en grados, y se determina a partir del tiempo solar local usando la ecuación (7). Por cada hora la tierra rota 15° , al medio día su valor es cero, en la mañana el valor es negativo y en la tarde es positivo.

$$HRA = 15 * (LST - 12) \quad (7)$$

La elevación solar (β) depende de la latitud (φ) de la localidad, la declinación solar (δ) y el ángulo horario (HRA), según la relación mostrada en (8).

$$\beta = \sin^{-1}(\sin(\delta) * \sin(\varphi) + \cos(\delta) * \cos(\delta) * \cos(HRA)) \quad (8)$$

A partir de ese valor, se puede estimar la elevación máxima (β_{max}) que alcanza el sol en el día, utilizando la ecuación (9), que depende exclusivamente de la latitud y la declinación solar.

$$\beta_{max} = 90 - |\varphi - \delta| \quad (9)$$

Finalmente, la dirección desde la que llegan los rayos solares se expresa como el acimut (Az), cuyo signo depende del valor de (HRA). Esta dirección se obtiene mediante la ecuación (10). El signo positivo corresponde para ($HRA > 0$), este ángulo aumenta en el sentido horario partiendo del norte geográfico.

$$Az = \cos^{-1}\left(\frac{\sin(\delta) - \cos(\varphi) - \cos(\delta) * \sin(\varphi) * \cos(HRA)}{\cos(\beta)}\right) \quad (10)$$

Al aplicar las ecuaciones previamente descritas, se implementa un algoritmo capaz de calcular el vector solar. Este procedimiento permite determinar con alta precisión la posición aparente del Sol en tiempo real, lo cual es fundamental para aplicaciones de seguimiento solar, simulación energética y control de sistemas fotovoltaicos.



3.4 Sistema de Control de Posición

Inicialmente se consideró implementar en la carrera de los actuadores una resolución angular de $\pm 0.5^\circ$, alineada con la precisión nominal del sensor inclinómetro. Sin embargo, durante las pruebas de campo se observó que dicha resolución provocaba activaciones frecuentes del sistema sin mejoras significativas en la captación energética. Por esta razón, se adoptó finalmente una resolución operativa de $\pm 1^\circ$, la cual permite reducir el consumo de energía del control ON-OFF.

El sistema de control adoptado es de tipo binario (ON-OFF), en el cual los actuadores se activan únicamente cuando la diferencia entre el ángulo solar calculado y el ángulo medido mediante el inclinómetro supera un umbral de $\pm 1^\circ$. Este esquema simple y efectivo minimiza las oscilaciones innecesarias, reduce el desgaste mecánico y prolonga la vida útil del sistema.

La arquitectura general del sistema incluye:

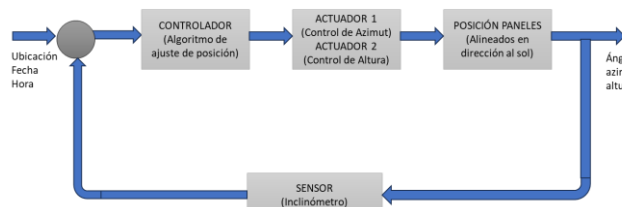


Figura 4: Diagrama de Bloques del Sistema de Control de Posición Angular para el Seguidor Solar

El sistema de control adopta una arquitectura de lazo cerrado, donde la señal de entrada corresponde al vector solar teórico calculado por el algoritmo astronómico, y la salida es la posición angular de los paneles solares. Esta señal es comparada con la medida entregada por un sensor inclinómetro digital, generando una señal de error que es utilizada por el controlador para activar los actuadores lineales.

El esquema de control se muestra en la Fig. 4, donde se identifican los bloques principales: cálculo del ángulo deseado, comparación con la posición real, activación de los motores y retroalimentación mediante el inclinómetro.

3.5 Sistema de Adquisición de Datos

Para la obtención de los parámetros eléctricos del sistema de seguimiento solar se empleó un equipo de medida para strings fotovoltaicos de la marca CIRCUTOR TR16-RS-485, el cual permite la medición de hasta 16 canales de corriente continua mediante sensores de efecto Hall y la lectura de tensiones hasta 1000 Vcc. Este equipo está diseñado específicamente para monitorear strings fotovoltaicos, permitiendo registrar corrientes de cortocircuito (I_{sc}) y tensiones por cada canal con alta precisión.

Las señales de corriente y tensión fueron registradas en tiempo real y transmitidas hacia un PC mediante el estándar de comunicación RS-485 bajo protocolo Modbus RTU. El sistema se configuró como esclavo de una red multi-slave que garantiza estabilidad en la captura de datos.

Por otro lado, la irradiancia fue registrada mediante celdas fotovoltaicas calibradas compensadas, montadas sobre la misma estructura de los módulos tanto fijos como móviles, lo que permite correlacionar la respuesta eléctrica frente a condiciones reales de captación solar. Estas celdas proporcionan una lectura confiable en W/m^2 , sin requerir correcciones por temperatura ni ángulo de incidencia, la Fig. 5 se describe el esquema de conexión empleado.

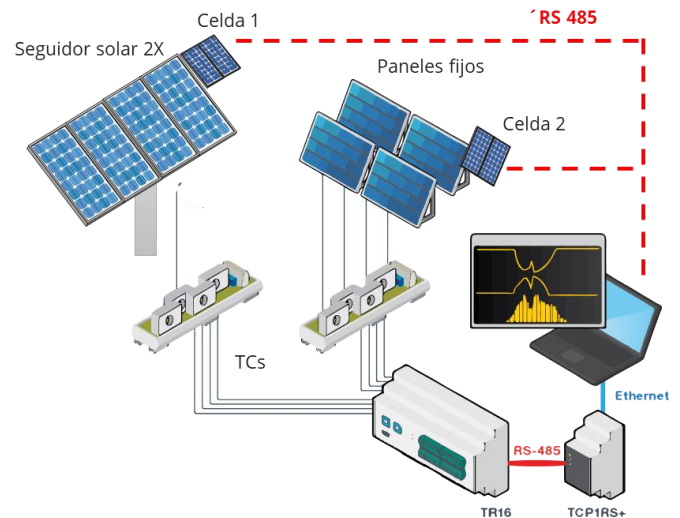


Figura 5: Esquema del Sistema de Adquisición de Datos

Con el fin de facilitar el monitoreo y la interacción con el sistema de seguimiento solar, se desarrolló una interfaz gráfica. Esta interfaz permite visualizar en tiempo real los parámetros relevantes del sistema, tanto en modo automático como en modo manual.

En la Fig. 6, se muestra el panel principal de control, donde el usuario puede:

- Visualizar la ubicación geográfica y datos horarios obtenidos mediante GPS.
- Supervisar los valores calculados de elevación y azimut solar.
- Visualizar en una representación 3D el ángulo actual de los paneles.
- Activar el modo automático basado en el algoritmo astronómico.
- Usar el modo manual, mediante controles direccionales individuales para ajuste Norte, Sur, Este y Oeste.
- Detener la ejecución del sistema en cualquier momento mediante el botón STOP.

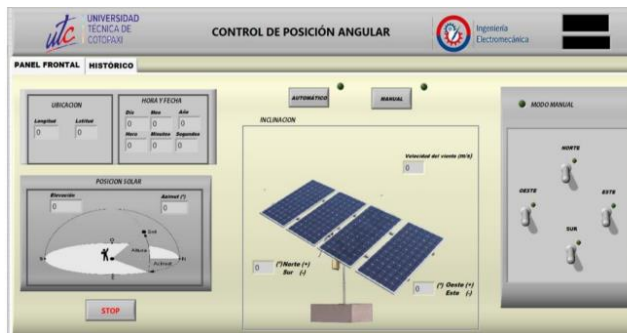


Figura 6: Panel de Control de Posición Angular Desarrollado para Supervisión del Sistema de Seguimiento Solar

Esta interfaz se comunica con el controlador mediante protocolo Modbus RTU sobre RS-485, permitiendo lectura y escritura de registros en tiempo real. Además, está preparada para futuras ampliaciones hacia un sistema SCADA completo con funcionalidades de registro histórico y alarmas.

3.6 Procedimiento Experimental

Dado que el sistema implementado está conformado únicamente por los paneles fotovoltaicos, sin inversores ni acumuladores, fue posible realizar ensayos eléctricos en condiciones de cortocircuito controlado. Esta característica permitió registrar directamente la corriente de cortocircuito (I_{sc}) como indicador proporcional de la irradiancia efectiva captada por los módulos, sin comprometer la seguridad ni el funcionamiento del sistema.

La evaluación del sistema se realizó comparando dos configuraciones:

- Sistema fijo, orientado al norte geográfico, con inclinación fija de 15° , determinada según la latitud de la zona.
- Sistema móvil, operando en modo automático mediante el seguimiento solar de doble eje.

Para ambas configuraciones, se midió:

- Irradiancia global utilizando una celda fotovoltaica compensada.
- Corriente de cortocircuito de los módulos, como indicador proporcional de la potencia generada.

Las mediciones se realizaron durante 15 días consecutivos en condiciones de cielo despejado, registrando valores cada minuto entre las 08:00 y 17:00 horas. Posteriormente, se integraron los datos para calcular la irradiancia media diaria y la corriente media generada en cada caso.

4. RESULTADOS

4.1 Validación del Algoritmo Astronómico

Para validar el algoritmo astronómico implementado, se comparó la trayectoria solar generada por el modelo

implementado en Matlab con la obtenida mediante la herramienta SunEarthTools.com para la ciudad de Latacunga (lat. -0.9174154 , lon. -78.633166) el 23 de junio de 2024, día cercano al solsticio de verano. La herramienta externa utiliza cálculos astronómicos validados ampliamente en estudios solares y proporciona una referencia fiable de los ángulos de elevación y acimut solar.

La Fig. 7 muestra la trayectoria solar diaria según SunEarthTools, mientras que la Fig. 8 presenta la curva generada por el algoritmo implementado en MATLAB. En ambas gráficas se observa un ángulo de elevación máximo de aproximadamente $66,9^\circ$ alcanzado cerca del mediodía, y ángulos de elevación mínimos cercanos a 0° al amanecer y atardecer.

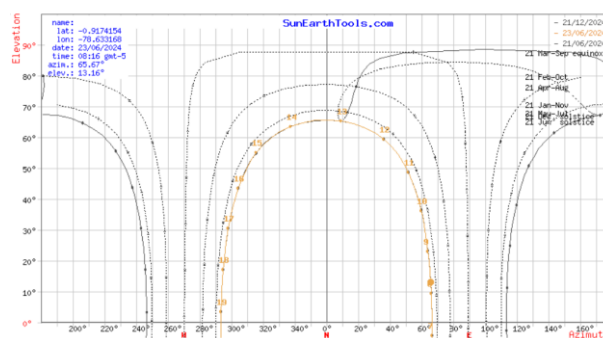


Figura 7: Trayectoria Solar Diaria Según SunEarthTool para el 23 de junio

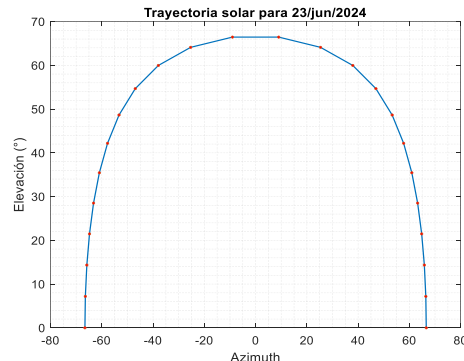


Figura 8: Trayectoria Solar Calculada con el Algoritmo Desarrollado para el 23 de junio

Los resultados mostraron una coincidencia superior al 98 % entre los valores generados por el algoritmo propio y los de la herramienta de referencia, confirmando la precisión del modelo matemático.

Como parte del análisis del comportamiento solar, se generó una representación tridimensional de la trayectoria solar para la ubicación geográfica del experimento (Latacunga, Ecuador). La Figura 9 muestra cómo varía el ángulo de elevación solar (β) a lo largo del año y del día. Esta información permitió validar que el algoritmo desarrollado genera resultados coherentes con la geometría solar teórica esperada, al reproducir la simetría de los solsticios y el patrón de máxima elevación en fechas cercanas a los equinoccios.

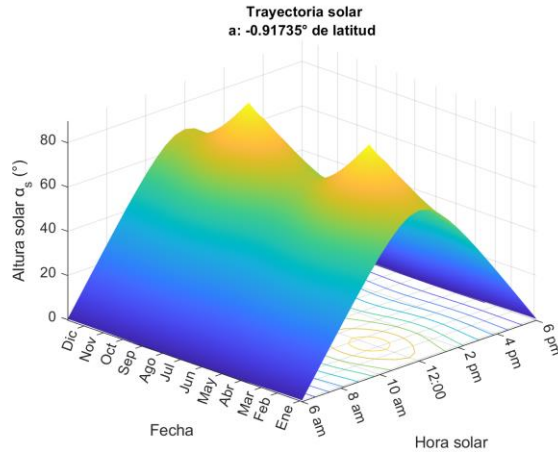


Figura 9: Trayectoria Solar Anual Simulada para Latacunga (Latitud -0,91735°)

4.2 Comparación de Irradiancia Captada: Sistema Fijo vs. Sistema Móvil

La captación de irradiancia se evaluó en condiciones de cielo despejado durante 15 días consecutivos. Para ello, se emplearon celdas fotovoltaicas compensadas, una montada sobre el plano móvil y otra fija con una inclinación de 15° hacia el norte. Esta disposición permitió comparar la irradiancia global incidente en ambas configuraciones.

La Fig. 10 muestra la variación de irradiancia en función del ángulo de seguimiento solar para el sistema móvil. La curva azul representa la irradiancia teórica que alcanzaría un sistema fijo perfectamente orientado, mientras que la curva naranja representa los datos reales obtenidos por el sistema de seguimiento.

- Se evidencia una alta concordancia entre la irradiancia teórica y la irradiancia medida por el seguidor solar, especialmente en el rango angular central ($\pm 20^\circ$).
- Las desviaciones en los extremos del ángulo ($\pm 30^\circ$ a $\pm 33^\circ$) indican leves pérdidas posiblemente atribuibles a errores de alineación, dispersión por nubosidad baja o limitaciones mecánicas del actuador.

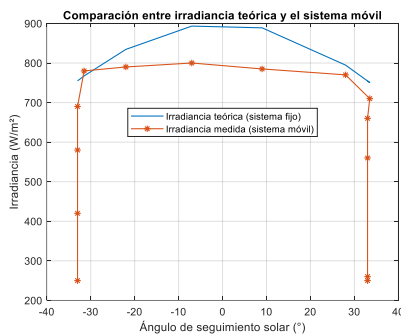


Figura 10: Perfil Horario de Irradiancia Promedio Registrada Manualmente en el Sistema Móvil Durante un Día Representativo

La Fig. 11 presenta la comparación directa entre los sistemas fijo y móvil en el mismo día. Se observa un incremento sustancial en la irradiancia captada por el sistema con seguimiento, especialmente durante las primeras y últimas horas del día, donde la orientación óptima proporciona una ventaja significativa.

Las dos gráficas permiten observar el comportamiento real de irradiancia durante días consecutivos (17 y 8 de abril de 2025).

- En ambos días, el sistema con seguimiento muestra irradiancias mayores en casi todo el rango horario respecto al sistema fijo.
- El incremento es especialmente pronunciado entre las 8:00 y 10:00, y después de las 15:30, donde el sistema fijo pierde eficiencia por su orientación fija, mientras que el móvil mantiene la captación.
- Durante las horas centrales (11:00–14:00), ambos sistemas convergen, lo cual es esperable dado que la orientación fija está cercana a la óptima en ese momento.
- El comportamiento con “picos” irregulares en los datos del día 17 sugiere variabilidad atmosférica o interferencia parcial por sombras o nubes intermitentes, mientras que el día 8 presenta una curva más limpia, ideal para análisis comparativo.

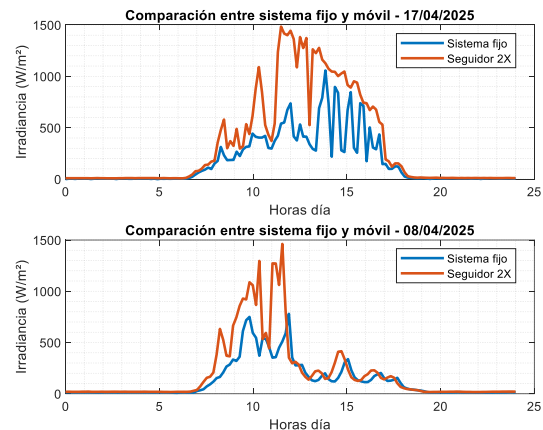


Figura 11: Comparación entre la Irradiancia Horaria Captada por el Sistema Fijo (15° Norte) y el Sistema Móvil.

El promedio de los valores diarios indica que el sistema de seguimiento incrementó la captación de irradiancia en un 19.85 % respecto al sistema fijo.

4.3 Producción de Corriente Eléctrica

Dado que el sistema está conformado únicamente por módulos fotovoltaicos, sin inversores ni acumuladores, fue posible realizar ensayos de corriente de cortocircuito (I_{sc}) de manera segura. Esto permitió caracterizar directamente el comportamiento de captación solar de los módulos en ambas configuraciones: fija y móvil.

Como indicador complementario, se midió la corriente de cortocircuito (I_{sc}) de ambos sistemas,

durante el día 8 de abril. Las Figs.s 12 y 13 presentan los perfiles horarios de corriente, voltaje e intensidad generados en cada configuración.

En el sistema fijo, la corriente máxima registrada fue de aproximadamente 16 A, con oscilaciones y caídas durante el mediodía atribuibles a la presencia de nubosidad transitoria. En contraste, el sistema móvil alcanzó picos de corriente superiores a 30 A y mantuvo un perfil más estable a lo largo del día, evidenciando una mejor captación de radiación solar.

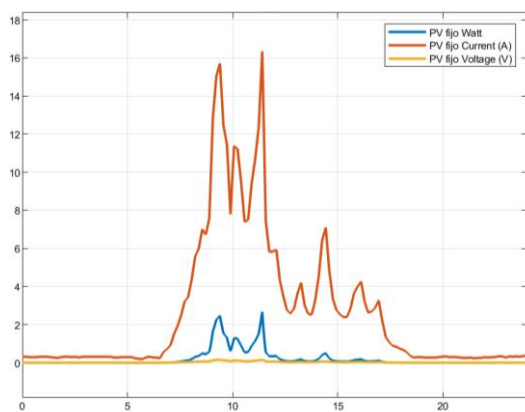


Figura 12: Perfil Horario de Corriente, Voltaje y Potencia Generados por el Sistema Fijo

La potencia generada (curva azul) también fue superior en el sistema móvil, lo que valida el impacto positivo del seguimiento solar de doble eje en el aprovechamiento energético. La diferencia entre las curvas también permite observar la correlación entre irradiancia y corriente operativa, y cómo la mayor exposición angular favorece al sistema móvil.

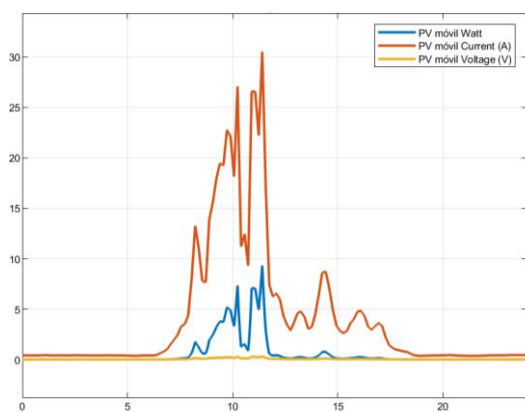


Figura 13: Perfil Horario de Corriente, Voltaje y Potencia Generados por el Sistema Móvil

Estos resultados confirman que el sistema con seguimiento solar no solo mejora la captación de irradiancia, sino que también incrementa notablemente la corriente y la potencia útil entregada por el generador fotovoltaico.

Las mediciones de corriente y tensión presentadas fueron obtenidas mediante el equipo CIRCUTOR TR16-RS-485 descrito en la Sección 3.5, comunicándose con la PC a través del protocolo Modbus RTU sobre RS-485.

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El presente desarrollo constituye la primera fase de una línea de trabajo planificada, que inicia con la implementación de un algoritmo astronómico básico acompañado de control ON-OFF para validar la viabilidad del sistema. En etapas posteriores, se prevé la integración de variables ambientales como la irradiancia real y la nubosidad, mediante sensores ópticos o fotométricos, con el fin de implementar esquemas de seguimiento híbrido que mejoren la eficiencia energética del sistema bajo condiciones atmosféricas variables.

Los resultados obtenidos demuestran que la implementación de un sistema de seguimiento solar de doble eje, basado en un algoritmo astronómico de resolución intermedia y controlado mediante lógica ON-OFF, permite incrementar significativamente la captación de irradiancia solar en una estación fotovoltaica de pequeña escala.

Durante la campaña experimental, se registraron datos de irradiancia con una celda fotovoltaica compensada solidaria al plano móvil, y otra fija a 15° hacia el norte. La irradiancia diaria integrada en el sistema móvil alcanzó un promedio de 6,41 kWh/m²/día, mientras que en el sistema fijo fue de 5,35 kWh/m²/día, lo que representa un incremento del 19,85 % en la captación solar a favor del sistema con seguimiento. Este resultado fue verificado a partir de la integración horaria de los datos recolectados durante 15 días consecutivos, en condiciones mayoritariamente despejadas.

Este incremento valida la hipótesis de que un sistema de seguimiento puede mejorar sustancialmente el aprovechamiento del recurso solar disponible, particularmente en regiones como la Sierra ecuatoriana, donde los niveles de irradiación global promedio se encuentran entre 4,5 y 6,5 kWh/m²/día [5], dependiendo de la época del año y altitud. En el sitio de estudio (Latacunga, 2800 m s.n.m.), los datos obtenidos se encuentran dentro de este rango superior.

Los resultados se alinean con investigaciones previas que reportan incrementos entre el 17 % y el 40 % en la producción energética mediante seguidores de doble eje [3][6]. La magnitud relativamente moderada del aumento observado (19,85 %) en este estudio puede atribuirse a factores como:

- El tamaño compacto del sistema (560 Wp), que reduce el impacto de pérdidas ópticas marginales.
- La pendiente y orientación específicas del sitio.
- La precisión mecánica del sistema y su resolución angular de control ($\pm 1^\circ$), ya que errores mayores tienden a reducir el beneficio del seguimiento.

Además, el análisis de la corriente de cortocircuito en función del ángulo de inclinación confirma que el sistema opera eficazmente dentro del rango de movimiento definido ($\pm 33^\circ$), maximizando la generación durante el período útil diario de irradiancia.

6. CONCLUSIONES

Se implementó con éxito un sistema de seguimiento solar de doble eje en una estación fotovoltaica de 560 Wp, utilizando un algoritmo astronómico para el cálculo de la posición solar en tiempo real y un esquema de control ON-OFF con retroalimentación de un inclinómetro digital.

El sistema construido permitió mantener la superficie de los paneles cercana a la perpendicular respecto a la radiación solar durante el recorrido diario y estacional del sol, dentro de los límites mecánicos definidos de $\pm 33^\circ$ (Este-Oeste) y $\pm 23.43^\circ$ (Norte-Sur).

La comparación experimental con una instalación fija evidenció un incremento del 19,85 % en la captación de irradiancia y corriente generada, lo que valida la efectividad del sistema de seguimiento solar en condiciones reales de operación.

El algoritmo astronómico implementado demostró alta precisión frente a herramientas de referencia, y su integración con sensores y actuadores permitió un control confiable y estable del sistema.

7. RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar una comparación futura entre distintos algoritmos de seguimiento (óptico, astronómico y mixto), para determinar cuál se adapta mejor a las condiciones atmosféricas locales.

Es aconsejable evaluar el comportamiento del sistema conectado a cargas reales o acoplado a un banco de baterías, con el fin de analizar su desempeño energético completo.

Se sugiere estudiar el reemplazo del control ON-OFF por técnicas más avanzadas como control PID o fuzzy logic, que podrían mejorar la eficiencia del posicionamiento y reducir el desgaste mecánico.

Para mejorar la operación en condiciones de alta nubosidad o viento, se recomienda integrar sensores de luminosidad y velocidad de viento con lógica de seguridad dinámica.

8. AGRADECIMIENTOS

Este artículo se deriva de un proyecto académico desarrollado en la Universidad Técnica de Cotopaxi, en el marco de la línea de investigación en energías renovables. El Ing. Luis Cruz, en calidad de coordinador general del proyecto, fue responsable de la planificación, definición del alcance técnico y validación de las

soluciones planteadas. La fase experimental fue desarrollada por estudiantes como parte de sus trabajos de titulación, bajo la supervisión académica del Ing. Cristian Gallardo. La fase de implementación práctica fue ejecutada por estudiantes de la carrera de Ingeniería Electromecánica, como parte de sus trabajos de titulación [10][11].

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] REN21, "Renewables 2022 Global Status Report," REN21 Secretariat, Paris, 2022.
- [2] IRENA, "Renewable Power Generation Costs in 2022," International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2023.
- [3] C.R. Batista Rodríguez, R.I. Urquiza Salgado, "Cálculo y análisis de la máxima eficiencia anual de los seguidores solares," Entre Ciencia e Ingeniería, 2019.
- [4] N.A. Kelly, T.L. Gibson, "Improved photovoltaic energy output for cloudy conditions with a solar tracking system," Solar Energy, vol. 83, pp. 2092-2102, 2009.
- [5] Atlas Solar del Ecuador, Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables, 2021.
- [6] A. Sabri Allw, I. Hameem Shallal, "Evaluation of photovoltaic solar power of a dual-axis tracking system," Journal of Southwest Jiaotong University, 2020.
- [7] J.M. Enrique et al., "A reliable, fast and low-cost maximum power point tracker for photovoltaic applications," Renewable Energy, 2009.
- [8] A. Escobar Mejía et al., "Diseño e implementación de un seguidor solar para la optimización de un sistema fotovoltaico," Scientia et Technica, 2010.
- [9] Estudio de Seguimiento Solar en Ecuador, Universidad Técnica Particular de Loja, 2020.
- [10] Vaca Padilla, G. P., & Vega Toaquiza, J. S. (2021). Implementación de un seguidor solar de 2 ejes para un sistema fotovoltaico de 560 W [Tesis de grado, Universidad Técnica de Cotopaxi]. Repositorio UTC. <https://repositorio.utc.edu.ec/items/fd71b602-cbd9-4d7a-8622-ab5d08700d1a>
- [11] Chisaguano Chicaiza, C. R., & Hurtado Buni, C. F. (2022). Implementación de un sistema de control de posición angular para una estación fotovoltaica de 560 W de 2 ejes [Tesis de grado, Universidad Técnica de Cotopaxi]. Repositorio UTC. <https://repositorio.utc.edu.ec/items/bd550748-55d5-480a-804f-c708cbdaa081>
- [12] N. Machado Toranzo, A. Lussó Cervantes, L. L. Oro Carralero, J. Bonzon Henríquez y O. Escalona Costa, «Seguidor Solar, optimizando el aprovechamiento de la energía solar,» SCIELO, vol. 36, nº 2, 2015.



- [13] D. E. M.J. Clifford, «Diseño de un novedoso seguidor solar pasivo,» ELSEVIER, vol. 77, n° 3, pp. 269-280, 2004.
- [14] 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.
- [15] T. Partridge, «Inter Press Service,» 03 02 2021. [En línea]. Available: <https://ipsnoticias.net/2021/02/proyecto-solar-aroma-reto-las-renovables-ecuador/>. [Último acceso: 04 12 2021].
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] J. Reda and A. Andreas, Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications, NREL Report No. TP-560-34302, Revised January 2008, National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, USA.



Luis Rolando Cruz. - Nació en Latacunga en 1980. Obtuvo el título de Ingeniero en Electromecánica por la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE en 2008. En 2010 completó el Diplomado Superior en Redes Digitales Industriales, y en 2013 obtuvo el título de Magíster en Gestión de Energías por la Universidad Técnica de Cotopaxi. Recientemente alcanzó el grado de Magíster en Electricidad con mención en Sistemas Eléctricos de Potencia por la Universidad Politécnica Salesiana del Ecuador. Ha trabajado en el sector energético, desempeñando funciones técnicas en generación eléctrica durante varios años. Actualmente es docente en los niveles de pregrado y posgrado en la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi.



Cristian Fabián Gallardo.- nació en Latacunga, Ecuador, en 1982. Obtuvo el título de Ingeniero Electromecánico en la Escuela Superior Politécnica del Ejército, sede Latacunga, en el año 2010. Posteriormente, alcanzó el grado de Magíster en Gestión de Energías

por la Universidad Técnica de Cotopaxi en 2014. Actualmente se desempeña como docente titular en la Universidad Técnica de Cotopaxi, y ha desarrollado importantes trabajos sobre sistemas fotovoltaicos en los lugares aislados de la red de las empresas eléctricas. Sus áreas de investigación se centran en la eficiencia energética y las energías renovables en la provincia de Cotopaxi. Desde el año 2021, ejerce como director de la carrera de Ingeniería Electromecánica en la cual se han impulsado proyectos de eficiencia energética y energías renovables.