

SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO ASISTIDO POR SOFTWARE ASTRONÓMICO STELLARIUM

PHOTOVOLTAIC SOLAR SYSTEM ASSISTED BY STELLARIUM ASTRONOMICAL SOFTWARE

Lennin Enrique Amador Castro

Tecnológico Nacional de México / IT de Los Mochis, México
lennin.ac@mochis.tecnm.mx

Marte Alberto Valdez García

Tecnológico Nacional de México / IT de Los Mochis, México
marte.vg@mochis.tecnm.mx

Hugo Castillo Meza

Tecnológico Nacional de México / IT de Los Mochis, México
hugo.cm@mochis.tecnm.mx

Mario Adrián Curiel Bañuelos

Tecnológico Nacional de México / IT de Los Mochis, México
L17440406@mochis.tecnm.mx

Marycruz Salas Perea

Tecnológico Nacional de México / IT de Los Mochis, México
L20441315@mochis.tecnm.mx

Francisco Xavier Torres Méndez

Tecnológico Nacional de México / IT de Los Mochis, México
L19441186@mochis.tecnm.mx

Luis Antonio Reyes Bajo

Tecnológico Nacional de México / IT de Los Mochis, México
L19440577@mochis.tecnm.mx

Mario Cuadras Cabanillas

Tecnológico Nacional de México / IT de Los Mochis, México
L17440413@mochis.tecnm.mx

Recepción: 21/noviembre/2023

Aceptación: 2/febrero/2024

Resumen

Este proyecto se centra en el diseño e implementación de un sistema solar fotovoltaico automatizado utilizando un panel solar montado en una base móvil. La base móvil se encuentra equipada con dos servomotores permitiendo que el panel

siga la trayectoria del sol durante el día. Para determinar la ubicación precisa del sol en el cielo en todo momento, se empleó el software astronómico de código abierto llamado *Stellarium*. Este software proporciona los datos en tiempo real sobre la posición del sol, lo que permite al sistema ajustar continuamente la orientación del panel para optimizar la captura de energía solar, garantizando la máxima eficiencia en la generación de energía al permitir que el panel esté siempre alineado con la fuente de luz más intensa, el sol. Esto tiene un gran potencial para aumentar la producción de energía y mejorar la sostenibilidad de las instalaciones solares. El uso de software de código abierto hace que el proyecto sea accesible y asequible, lo que lo convierte en una solución atractiva para aplicaciones de energía solar en diversos entornos. El seguimiento solar automatizado tiene el potencial de aumentar significativamente la eficiencia de la energía solar y contribuir a la reducción de la dependencia de fuentes de energía no renovables.

Palabras Clave: Energía renovable, energía solar, sistema fotovoltaico.

Abstract

This project focuses on the design and implementation of an automated solar photovoltaic system using a solar panel mounted on a mobile base. The mobile base is equipped with servomotors to allow the solar panel to follow the sun's path during the day. To always determine the precise location of the sun in the sky, open-source astronomical software called Stellarium was employed. This software provides real-time data on the position of the sun, allowing the system to continually adjust the panel orientation to optimize solar energy capture, ensuring maximum efficiency in solar power generation by allowing the panel always to be aligned with the most intense light source, the sun. This has an enormous potential to increase energy production and improve the sustainability of solar installations. The use of open-source software makes the project accessible and affordable, making it an attractive solution for solar energy applications in various environments. Automated solar tracking has the potential to significantly increase the efficiency of solar energy and contribute to the reduction of dependence on non-renewable energy sources.

Keywords: Renewable energy, solar energy, photovoltaic system.

1. Introducción

La energía solar se ha convertido en una fuente de energía cada vez más crucial en la búsqueda de alternativas sostenibles y limpias para nuestras necesidades energéticas. Aprovechar la luz del sol y convertirla en electricidad mediante paneles solares es una tecnología en constante evolución que promete un futuro más limpio y sostenible. Sin embargo, uno de los desafíos clave en la generación de energía solar es asegurar una captura óptima de la luz solar a lo largo del día.

En este contexto, se presenta la idea de un sistema innovador: el seguimiento solar con un panel solar montado en una base móvil. La esencia de esta propuesta radica en la capacidad de seguir la trayectoria del sol a medida que se desplaza a lo largo del cielo. Al hacerlo, el panel solar puede mantenerse constantemente alineado con la fuente de luz más intensa, maximizando así la exposición a los rayos solares y, por ende, la producción de electricidad.

Este proyecto explora la aplicación de una base móvil equipada con dos motores que permiten que el panel solar se ajuste automáticamente para seguir al sol a lo largo del día. Esta solución tiene un gran potencial para aumentar la eficiencia y la producción de energía de los paneles solares, lo que a su vez puede contribuir significativamente a la generación de electricidad limpia y sostenible. En las siguientes secciones, se analizan los componentes y el funcionamiento de este sistema de seguimiento solar, así como su importancia en el contexto de la energía solar.

La energía solar fotovoltaica a diferencia de otras energías renovables representa una de las alternativas más relevantes debido a su importancia, sostenibilidad y costo asequible, así como también una fuente primordial de electricidad de bajas emisiones proporcionando un funcionamiento óptimo de la red eléctrica [Amador, Parra y Castro, 2021]. Debido a que los costos de las energías solares fotovoltaicas han caído en contraste con el precio de los combustibles fósiles, es importante apostar por la inversión de fuentes de energías renovables. Tan solo las emisiones a nivel mundial de CO₂ relacionadas con la energía aumentaron 1.6% en 2017, esto significa que la contaminación del aire relacionada con la energía siga provocando muertes prematuras cada año [IEA, 2018].

Por lo anterior, es necesario establecer estrategias que contrarresten los efectos adversos del cambio climático. Por lo tanto, una contribución directa será desarrollar sistemas que permitan optimizar el consumo de energía, disminuyendo las emisiones de carbono, así como garantizar el acceso a una energía asequible, sostenible y no contaminante, de acuerdo con las metas establecidas en el objetivo 7 de la Agenda 2030.

Celdas fotovoltaicas

Las celdas fotovoltaicas convierten directamente parte de la luz solar en electricidad. Algunos materiales presentan una propiedad conocida como efecto fotoeléctrico en su forma más simple, estos materiales se componen de un ánodo y un cátodo recubierto de un material fotosensible. La luz que incide sobre el cátodo libera electrones que son atraídos hacia el ánodo, de carga positiva, originando un flujo de corriente proporcional a la intensidad de la radiación, que hace que absorban fotones de luz y emitan electrones.

Las celdas fotovoltaicas, llamadas también celdas solares, están compuestas de la misma clase de materiales semiconductores que se usan en la industria microelectrónica, como por ejemplo el silicio. Una delgada lámina semiconductor, especialmente tratada, forma un campo eléctrico, positivo en un lado y negativo en el otro. Cuando incide energía luminosa sobre ella, los electrones son excitados y extraídos de los átomos del material semiconductor, cuando se disponen conductores eléctricos en forma de una rejilla que cubre ambas caras del semiconductor, los electrones circulan para formar una corriente eléctrica que aporta energía [Balderas y Teón, 2016].

Energía solar fotovoltaica

En las celdas solares la radiación solar no se transforma en calor, sino que se convierte directamente en electricidad, mediante el llamado efecto fotovoltaico, cuyo principio consiste en que la luz puede generar una corriente eléctrica al iluminar ciertos materiales semiconductores. Éstos se caracterizan porque conducen la electricidad mejor que un aislante y menos efectivamente que un metal, pero sobre

todo porque mejoran su capacidad para conducir la electricidad al ser iluminados. Cuando incide luz sobre un semiconductor, la energía suministrada ayuda a darle mayor movilidad a algunos de los electrones presentes en el material, por lo que su capacidad para conducir la electricidad aumenta. Sin embargo, para producir el efecto fotovoltaico no basta con liberar electrones, es necesario que aparezca un voltaje que mueva a estos electrones en una dirección preferencial, generando una corriente eléctrica. La forma más común de lograr esto es unir dos materiales semiconductores de características electrónicas diferentes: uno de ellos debe ser capaz de ceder parte de sus electrones con facilidad (material tipo N), mientras que el otro debe aceptar fácilmente electrones adicionales (material tipo P). El efecto fotovoltaico se produce precisamente al iluminar la superficie de unión entre los dos diferentes materiales [Arancibia y Best, 2010].

Stellarium

Es un programa que permite a las personas simular un planetario en su computadora personal, el cual está disponible para los principales sistemas operativos: Linux, Windows y Mac OS. Stellarium calcula la posición del sol, la luna, planetas, constelaciones y estrellas; además, simula el cielo según la localización y tiempo del observador, así como algunos fenómenos astronómicos como lluvias de meteoros, eclipses lunares y solares [Mendoza y Méndez, 2018].

Control de mano NexStar

Este control de mano tiene algunos de los procedimientos básicos para el funcionamiento del trípode, estos procedimientos están divididos en tres categorías: alineación, configuración y utilidades. La sección sobre la alineación consiste en la alineación inicial de la montura junto con la búsqueda de objetos en el firmamento; la sección de configuración trata sobre los parámetros que cambian en las condiciones iniciales del alineamiento, tales como el modo y velocidad del seguimiento; finalmente, la última sección revisa todas las funciones de utilidad, tales como el ajuste de los límites de movimiento de la montura y la compensación del desajuste [Celestron, 2006].

2. Métodos

Este proyecto requirió una serie de procesos los cuales constan desde los materiales utilizados, el acoplamiento de la montura y el panel solar, así como las pruebas realizadas para comprobar la diferencia entre un panel solar fijo y otro que se desplaza siguiendo el movimiento del sol.

Materiales utilizados

Para este trabajo de investigación se utilizó un panel solar marca *Duralast* con las características eléctricas presentadas en la tabla 1.

Tabla 1 Características del panel Duralast.

| | |
|------------------------------|----------------------|
| Watts | 2.5 W |
| Voltaje en potencia máxima | 17 V |
| Corriente en potencia máxima | 200 mA |
| Voltaje en circuito abierto | 22 V |
| Tipo de panel solar | Amorfo |
| Medidas | 31.7 x 16.2 x 2.2 cm |
| Peso | 648 g |

Fuente: Elaboración propia.

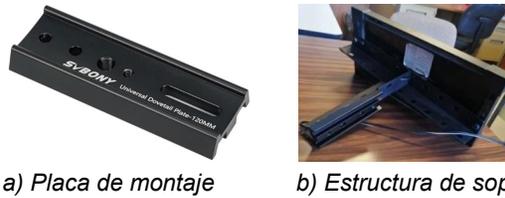


Fuente: Elaboración propia.

Figura 1 Panel solar de marca Duralast.

Acoplamiento del panel solar a la montura

Además, para acoplar la montura con el panel solar se empleó una placa de montaje cola de milano de 120 x 40 mm marca SVBONY, SV219. De esta manera, el panel se adaptó a una estructura de soporte el cual fue diseñado de acuerdo con las características y peso del panel solar empleado, figura 2. Para acoplar la estructura del panel solar fotovoltaico se empleó la montura azimutal Celestron NexStar 130 SLT, permitiendo con esto, llevar a cabo el seguidor solar durante su trayectoria, figura 3.



a) Placa de montaje

b) Estructura de soporte.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 2 Placa de montaje cola de milano adaptada a la estructura montada al panel.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3 Adaptación del panel solar Duralast a la montura NexStar 130 SLT Celestron.

Pruebas con el panel solar

El control y seguimiento del panel solar se realizó utilizando una computadora Acer Aspire 3, con un procesador AMD A9-9420e RADEON R5 y 8GB de memoria RAM, todo a través del programa astronómico Stellarium 23.2 y la conexión USB Tipo A-mini USB Tipo B por medio del Hand Control NexStar 130 SLT de la marca Celestron, cuya función es servir como interfaz entre la estructura del panel adaptada a la montura y el computador. La figura 4 muestra las conexiones utilizadas entre la montura y el panel *Duralast* con el fin de facilitar la alineación y seguimiento del sol. Lo anterior permitió realizar las mediciones de voltaje y corriente en circuito abierto durante el seguimiento del panel solar fotovoltaico.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4 Conexiones entre la montura y la laptop.

3. Resultados

En la búsqueda constante de fuentes de energía sostenible, la energía solar se destaca como una opción prometedora. Los paneles solares con trayectoria automática al sol representan una innovación significativa, ya que optimizan la captación de luz solar a lo largo del día. Dos mediciones cruciales para evaluar la eficiencia de estos paneles son la intensidad de luz incidente y la producción de energía eléctrica.

La primera medida es la intensidad de luz incidente, que representa la cantidad de radiación solar que llega al panel en un momento dado. Los paneles solares convencionales pueden no recibir luz de manera uniforme a lo largo del día debido al movimiento del sol en el cielo. Sin embargo, los paneles con trayectoria automática al sol están diseñados para seguir la posición del sol, maximizando así la exposición directa a los rayos solares.

La medición de la intensidad de luz incidente se realiza mediante sensores de luz integrados en el panel. Estos sensores ajustan continuamente la orientación del panel para asegurar que esté alineado de manera óptima con la posición del sol. Las mediciones a lo largo del día revelan un aumento significativo en la intensidad de luz incidente en comparación con los paneles estáticos, lo que se traduce en una mayor eficiencia de conversión de energía solar en electricidad.

La segunda medida es la producción eléctrica (Watts, kilowatts-hora) del panel solar, por lo que este último parámetro es esencial para evaluar el rendimiento global del sistema. Los paneles solares con trayectoria automática al sol muestran mejoras notables en esta métrica en comparación con los paneles estáticos. Por lo tanto, los paneles con trayectoria automática pueden generar más electricidad al seguir la trayectoria del sol, asegurando un ángulo de incidencia óptimo en todo momento permitiendo el registro de la producción eléctrica constante a lo largo del día. Esta capacidad de adaptación se traduce en un aumento sostenido de la producción eléctrica, especialmente durante las horas pico de radiación solar.

Es importante mencionar que, para la realización de este trabajo, todas las mediciones en campo se desarrollaron en las instalaciones del Instituto Tecnológico de Los Mochis, por lo que a continuación se presentan los siguientes resultados:

Mediciones del panel con seguidor solar

La tabla 2 muestra las mediciones de voltaje y corriente en circuito abierto del panel solar realizadas en un lapso de 4 horas, con intervalos de 15 minutos. La potencia eléctrica se calculó utilizando la ecuación 1 con los valores previos de dichas mediciones [Boylestad, 2004].

Tabla 2 Mediciones del panel con seguimiento.

| Hora de Medición | Voltaje (V) | Corriente eléctrica (A) | Potencia eléctrica (W) |
|------------------|-------------|-------------------------|------------------------|
| 11:20 am | 21.13 | 0.2229 | 4.709877 |
| 11:35 am | 20.75 | 0.2237 | 4.641775 |
| 11:50 am | 20.67 | 0.2223 | 4.594941 |
| 12:10 pm | 20.45 | 0.2229 | 4.558305 |
| 12:25 pm | 20.63 | 0.2225 | 4.590175 |
| 12:40 pm | 20.58 | 0.2209 | 4.546122 |
| 12:55 pm | 20.38 | 0.2228 | 4.540664 |
| 1:10 pm | 20.41 | 0.2210 | 4.510610 |
| 1:25 pm | 20.43 | 0.2214 | 4.523202 |
| 1:40 pm | 20.47 | 0.2197 | 4.497259 |
| 1:55 pm | 20.5 | 0.2163 | 4.434150 |
| 2:10 pm | 20.52 | 0.2105 | 4.319460 |
| 2:25 pm | 20.75 | 0.2063 | 4.280725 |
| 2:40 pm | 17.79 | 0.0258 | 0.458982 |

Fuente: Elaboración propia.

La figura 5 representa los resultados obtenidos en las mediciones, tomando en consideración el seguimiento de la montura con respecto a la trayectoria del sol en tiempo real. Se puede observar que la potencia (Ecuación 1) permanece constante con un promedio de 4.2285 W.

$$P = V \times I \quad (1)$$

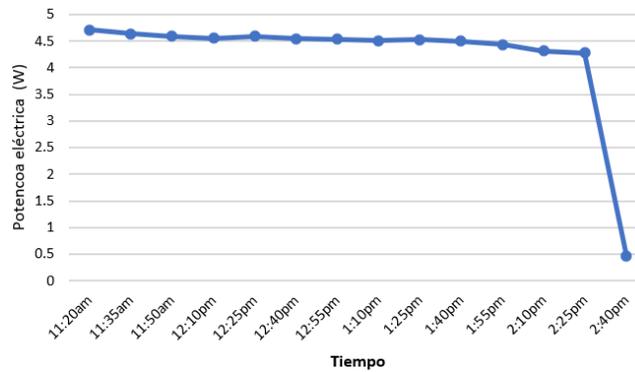
Donde:

P : Potencia eléctrica en Watts [W].

V : Voltaje en circuito abierto medido en el panel solar en Voltios [V].

I : Corriente eléctrica en circuito abierto medido en ampere [A].

Cabe señalar que, las estrellas como el sol están a una distancia enorme de la Tierra, su movimiento aparente puede considerarse nulo, por lo que su desplazamiento en el cielo está regido solamente por la rotación de la Tierra permitiendo la alineación con el seguidor solar.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5 Potencia eléctrica del panel solar con seguimiento.

Mediciones del panel sin seguimiento

Adicionalmente se recopilaron los datos obtenidos en la medición con el panel solar fotovoltaico fijo a la montura, con una inclinación con respecto a la horizontal de 23.8° sin ningún seguimiento, tabla 3. Las mediciones se realizaron en una ventana de 5 horas con intervalos de 15 minutos, y al igual que los datos obtenidos en la tabla 2 se utilizó la ecuación 1 para determinar la potencia eléctrica suministrada por el panel solar *Duralast*.

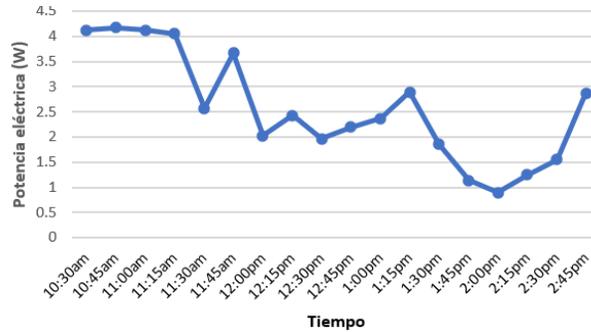
Tabla 3 Mediciones con el panel sin seguimiento.

| Hora de Medición | Voltaje (V) | Corriente eléctrica (A) | Potencia eléctrica (W) |
|------------------|-------------|-------------------------|------------------------|
| 10:30 am | 21.56 | 0.1910 | 4.1179 |
| 10:45 am | 20.54 | 0.2030 | 4.1696 |
| 11:00 am | 20.82 | 0.1979 | 4.1202 |
| 11:15 am | 20.76 | 0.1953 | 4.0544 |
| 11:30 am | 20.56 | 0.1250 | 2.5700 |
| 11:45 am | 20.74 | 0.1770 | 3.6709 |
| 12:00 pm | 19.50 | 0.1037 | 2.0221 |
| 12:15 pm | 20.22 | 0.1200 | 2.4264 |
| 12:30 pm | 20.36 | 0.0964 | 1.9627 |
| 12:45 pm | 20.41 | 0.1077 | 2.1981 |
| 1:00 pm | 20.40 | 0.1158 | 2.3623 |
| 1:15 pm | 20.57 | 0.1406 | 2.8921 |
| 1:30 pm | 20.22 | 0.0916 | 1.8531 |
| 1:45 pm | 19.80 | 0.0573 | 1.1345 |
| 2:00 pm | 19.50 | 0.0459 | 0.8952 |
| 2:15 pm | 20.00 | 0.0626 | 1.2520 |
| 2:30 pm | 20.50 | 0.0758 | 1.5539 |
| 2:45 pm | 20.64 | 0.1392 | 2.8730 |

Fuente: Elaboración propia

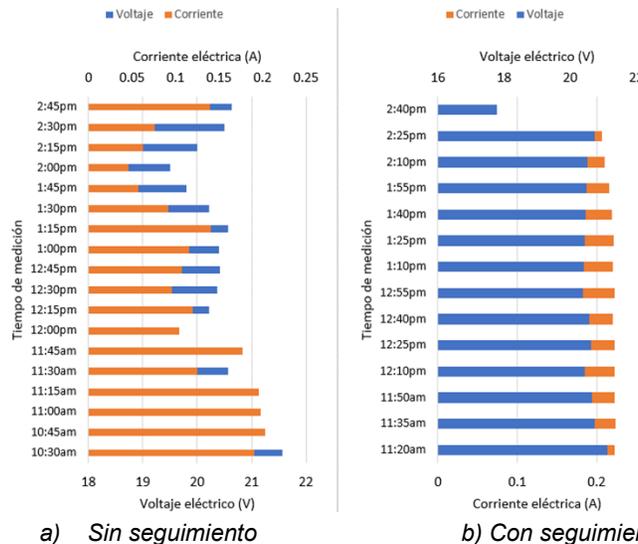
Por otro lado, la figura 6 representa la relación de voltaje-corriente de los resultados obtenidos en la tabla 3, los cuales muestran grandes variaciones si las comparamos

con la potencia eléctrica del panel con seguidor solar. Dado que en este caso no existe un control y seguimiento del panel fotovoltaico, es evidente apreciar las diferencias entre el voltaje y la corriente, mostrando variaciones en la potencia eléctrica al no permanecer constante. Sin embargo, en las mediciones del panel solar sin seguimiento, los valores de voltaje y corriente promedio en circuito abierto fueron 20.39 V y 125 mA , lo que representa que la potencia eléctrica en promedio disminuye 1.67 W con respecto al panel solar con seguimiento. La caída en la potencia repercute directamente en la disminución de la corriente eléctrica con un 39%, esto debido a que la corriente representa una variación que influye con la ecuación 1 utilizada para determinar la potencia eléctrica.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6 Potencia eléctrica del panel solar sin seguimiento.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 7 Relación Voltaje-corriente en circuito abierto del panel.

Al comparar la relación de los datos (Figura 7), se aprecia que el voltaje y la corriente en circuito abierto obtenidos durante la medición en el panel solar con seguimiento permanecen casi constantes, con un promedio de 20.39 V y 206 mA respectivamente durante el periodo de medición.

Para determinar la línea de tendencia y observar el comportamiento de la potencia eléctrica en ambos casos se utilizó la ecuación 2, la cual relaciona las dos variables matemáticamente para la estimación en el desarrollo de los patrones de cambio.

$$\hat{Y} = a + bX \quad (2)$$

Donde:

X : Valores de la variable independiente.

a : Ordenada Y.

\hat{Y} : Valores estimados de la regresión.

b : Pendiente de la recta.

De acuerdo con Levin y Rubin [2004], por medio de las ecuaciones 3 y 4 se determinaron los coeficientes de la recta de ajuste. Estas ecuaciones utilizan el método de mínimos cuadrados para reducir el margen de error en la estimación.

$$a = \bar{Y} - b\bar{X} \quad (3)$$

$$b = \frac{\sum XY - n\bar{X}\bar{Y}}{\sum X^2 - n\bar{X}^2} \quad (4)$$

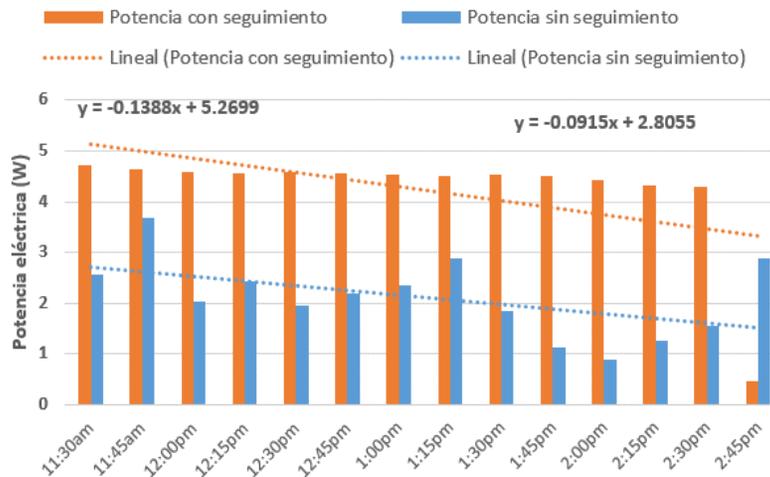
Donde:

\bar{X} : Media de los valores de la variable independiente.

n : Número de datos.

\bar{Y} : Media de los valores de la variable dependiente.

Por último, la figura 8 muestra la diferencia entre la potencia eléctrica calculada a partir de las mediciones realizadas para un panel con y sin seguimiento solar. Además, se indica la línea de tendencia para cada uno de los casos, por lo que a través de la ecuación 2 se encontró que existe una diferencia del 50.6% en la potencia eléctrica aproximadamente. Esto representa una marcada diferencia, por lo que el panel solar con seguidor solar muestra la máxima potencia eléctrica.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 8 Potencia eléctrica entre las mediciones con y sin seguimiento.

4. Discusión

Las tecnologías para el crecimiento de la energía solar siguen en aumento, algunas de ellas siguen siendo tema de estudio ya que podrían tener impactos relevantes en el futuro. Por lo tanto, la energía solar lejos de ser una opción poco costosa sigue siendo una de las opciones realistas para limitar la dependencia de los combustibles fósiles que acarrear importantes cambios ambientales. De esta manera, es importante considerar que se puede sostener una sociedad con los recursos de fuentes energías tomando en cuenta lo que pueda ocurrir después.

5. Conclusiones

Las mediciones de intensidad de luz incidente y producción eléctrica son vitales para evaluar la eficiencia de los paneles solares con trayectoria automática al sol. Estos sistemas no solo aprovechan al máximo la luz solar disponible, sino que también demuestran ser una solución avanzada y efectiva en la generación de energía renovable. Con un enfoque cada vez mayor en la sostenibilidad, estos paneles ofrecen un camino hacia un futuro energético más limpio y eficiente, se concluye que optimizar la energía solar a través de los paneles fotovoltaicos con seguimiento maximiza la potencia eléctrica, esto permite mejorar la eficiencia eléctrica contribuyendo a producir energía asequible y no contaminante de acuerdo

a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la agenda 2030 particularmente con el objetivo 7, que busca garantizar el acceso universal a servicios energéticos asequibles, aumentar considerablemente la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas, entre otras.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Amador, L., Parra, R., y Castro, C. (2021). Sistema fotovoltaico interconectado a la red eléctrica para el ahorro de energía y el cambio en los patrones de consumo ante el confinamiento del COVID-19. *Ra Ximhai*, 17(3), 331-353.
- [2] Arancibia, C. y Best, R. (2010). Energía del sol: https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/61_2/PDF/EnergiaSol.pdf.
- [3] Balderas S. y Teón A. (2016). La energía solar, una alternativa para la generación de energía renovable. *Revista de Investigación y Desarrollo*, 2(511-20), 13-14.
- [4] Boylestad R. (2004). *Introducción al análisis de circuitos*. Pearson Educación.
- [5] Celestron. (2006). *NexStar SLT Manual de Instrucciones: Funcionamiento del control de mano* (p. 13).
- [6] IEA. (2018). *World Energy Outlook, Executive Summary*. *International Energy Agency* (IEA). OCDE/AIE.
- [7] Levin, R., y Rubin, D. (2004). *Estadística para Administración y Economía*. México: Pearson Educación.
- [8] Mendoza, D. y Méndez, F. (2018). Stellarium, software que abre la mente de los niños al espacio: <https://unamglobal.unam.mx/stellarium-software-que-abre-la-mente-de-los-ninos-al-espacio/>.