

Prototipo de seguidor solar automático con red neuronal para maximizar la energía fotovoltaica

Prototype of automatic solar tracker with neural network to maximize photovoltaic energy.

Rodolfo García Rojas ^a, Adolfo Meléndez Ramírez ^a

^aDivisión de Ingeniería en Sistemas Computacionales, Tecnológico Nacional de México / TES Ecatepec, 55210, Ecatepec, Estado de México, México.

Resumen

Este artículo presenta el desarrollo y optimización de un prototipo de seguidor solar automático que utiliza una red neuronal para maximizar la captación de energía fotovoltaica. El sistema integra tecnologías de sensores y un algoritmo de control avanzado implementado en un microcontrolador Arduino, permitiendo el ajuste dinámico de la orientación de los paneles solares en dos ejes para aprovechar al máximo la radiación solar. Los resultados muestran el 97.5% de la variabilidad de los datos de salida, lo que indica una alta capacidad predictiva del sistema. Esto demuestra el potencial del prototipo desarrollado para incrementar significativamente la eficiencia en la captación de energía solar en comparación con los sistemas convencionales.

Palabras clave: Seguidor, solar, red, neuronal, microcontrolador.

Abstract

This article presents the development and optimization of a prototype of an automatic solar tracker that uses a neural network to maximize the capture of photovoltaic energy. The system integrates sensor technologies and an advanced control algorithm implemented in an Arduino microcontroller, allowing dynamic adjustment of the orientation of the solar panels in two axes to make the most of solar radiation. The results show 97.5% of the variability of the output data, which indicates a high predictive capacity of the system. This demonstrates the potential of the developed prototype to significantly increase the efficiency of solar energy collection compared to conventional systems.

Keywords: solar, tracker, neural, network, microcontroller.

1. Introducción

La energía solar se ha consolidado como una de las fuentes renovables más prometedoras y sostenibles para satisfacer la creciente demanda energética mundial. Sin embargo, la eficiencia con la que se captura esta energía es crucial para maximizar su aprovechamiento, en este contexto, los sistemas de seguimiento solar han emergido como una solución innovadora para optimizar la captación de la radiación solar, ajustando dinámicamente la orientación de los paneles

fotovoltaicos en función de la posición del sol (Gamarra, y otros, 2022).

Este artículo se centra en el desarrollo y optimización de un prototipo de seguidor solar automático que utiliza una red neuronal para incrementar significativamente la captación de energía solar. A través de la integración de tecnologías de sensores y un algoritmo de control avanzado implementado en un microcontrolador Arduino, el sistema permite el ajuste dinámico de la orientación de los paneles solares en dos ejes. Los resultados preliminares indican una alta capacidad predictiva del sistema, logrando explicar el 97.5% de la

*Autor para la correspondencia: 202311536@tese.edu.mx

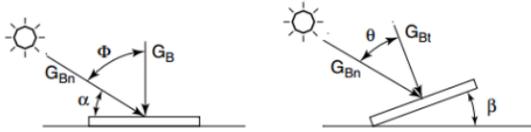
Correo electrónico 202311536@tese.edu.mx (Rodolfo García Rojas), adolfo_melendez@tese.edu.mx (Adolfo Meléndez Ramírez)

Historial del manuscrito: recibido el 08/07/2024, última versión-revisada recibida el 17/08/2024 aceptado el 19/08/2024, en línea (postprint) desde el 15/11/2024, publicado el 15/11/2024. DIO: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14193910>

variabilidad de los datos de salida. Esto resalta el potencial del prototipo para mejorar la eficiencia en la captación de energía solar en comparación con sistemas convencionales.

1.2. Antecedentes

La viabilidad económica y el impacto ambiental del seguidor solar en comparación con los sistemas convencionales implica un potencial para su implementación (Sosa & Castellano, 2024).



Además de las condiciones atmosféricas, otro factor crucial que afecta la incidencia de la radiación sobre un panel solar es el movimiento aparente del sol a lo largo del día y del año, ya que este movimiento se percibe como “aparente” porque, en realidad, es la Tierra la que está girando. Uno de sus movimientos se presenta de manera elíptica y otra sobre su propio eje (Romero, Melo, Sarango, & Jiménez, 2022).

Generalmente, existen dos tipos principales de sistemas de seguimiento solar: de un solo eje y de dos ejes. El sistema de dos ejes es significativamente más eficiente, ya que puede ajustar la orientación del panel solar de manera óptima para captar la máxima cantidad de energía solar posible (Romero, Melo, Sarango, & Jiménez, 2022).

Según (Perez, 2024):

“La energía solar térmica también conocida como energía termosolar, se puede definir como el calor generado por la radiación solar, que es el aprovechamiento de la energía procedente del Sol para transferirla a un medio portador de calor.”

La energía solar térmica se emplea en una variedad de aplicaciones y servicios, tales como la producción de vapor, los sistemas de calefacción, los sistemas de refrigeración y la generación de electricidad (Perez, 2024).

La ecuación (1) expresa la relación entre energía y trabajo:

$$W = \int_{t_1}^{t_2} F(t) dt \quad (1)$$

“Donde:

- W es el trabajo realizado
- F(t) es la fuerza aplicada en el tiempo t
- t1 y t2 son los límites de integración en el tiempo” (Perez, 2024).

La cantidad de energía que incide en un módulo fotovoltaico depende tanto de la energía que contiene la luz solar como del ángulo entre el módulo y el sol. Cuando la

superficie absorbente está perpendicular a la luz solar, la densidad de potencia en la superficie es igual a la de la luz solar. Sin embargo, como el ángulo entre el sol y una superficie fija cambia constantemente, la densidad de potencia en un módulo fotovoltaico fijo es menor que la de la luz solar incidente (Cata Sánchez & Rodríguez Sócola, 2015).

Como lo indica la ecuación (2) radiación total, “Una superficie inclinada recibe radiación directa (G_{Bt}), radiación difusa (G_{Dt}) y radiación reflejada por la tierra (G_{Gt})”

$$G_t = G_{Bt} + G_{Dt} + G_{Gt} \quad (2)''$$

(Cata Sánchez & Rodríguez Sócola, 2015).

“Donde G_t es la radiación total sobre una superficie inclinada [W/m^2]” (Cata Sánchez & Rodríguez Sócola, 2015). A partir de la imagen (1) se determina que:

La ecuación (3), “es la radiación en una superficie inclinada:

$$G_{Bt} = G_{Bn} \cos \theta \quad (3)''$$

(Cata Sánchez & Rodríguez Sócola, 2015).

Imagen 1 Radiación solar en una superficie inclinada Fuente: (Cata Sánchez & Rodríguez Sócola, 2015).

La ecuación (4), “es la radiación en una superficie horizontal:

$$G_B = G_{Bn} \cos \Phi \quad (4)''$$

(Cata Sánchez & Rodríguez Sócola, 2015).

En la ecuación (5), “ R_B es el factor de relación entre G_{Bt} y G_B resultando así que:

$$R_B = \frac{G_{Bt}}{G_B} = \frac{\cos \theta}{\cos \Phi} \quad (5)''$$

(Cata Sánchez & Rodríguez Sócola, 2015).

La ecuación (6), “Así la radiación en una superficie inclinada es:

$$G_{Bt} = G_B R_B \quad (6)''$$

(Cata Sánchez & Rodríguez Sócola, 2015).

Por lo tanto, se utiliza un seguidor solar de dos ejes para maximizar la eficiencia en la captación de energía solar. Este diseño permitirá que el sistema ajuste dinámicamente la orientación y la inclinación del panel solar para aprovechar al máximo la radiación solar, lo que a su vez optimizará la generación de energía limpia y sostenible.

2. Materiales y Método

2.1. Materiales

El desarrollo de un prototipo de seguidor solar automático requiere una selección cuidadosa de materiales y componentes que aseguren su funcionalidad y eficiencia. Esta sección detalla los elementos clave utilizados en la construcción del sistema, que incluye un microcontrolador, sensores de luz, resistencias y celdas solares, entre otros.

Microcontrolador - Placa Arduino UNO, se muestra en imagen (2). Diseñada por Arduino Corporation, esta placa se basa en el microprocesador extraíble Microchip ATmega328p, se puede programar utilizando el entorno de desarrollo integrado (IDE) de Arduino, que es de código abierto y utiliza Java para crear comandos y programas, es una herramienta versátil y fácil de usar que combina la capacidad de un microprocesador potente con una amplia colección de software y blindajes funcionales en una placa compacta (DeMeyer, 2017).

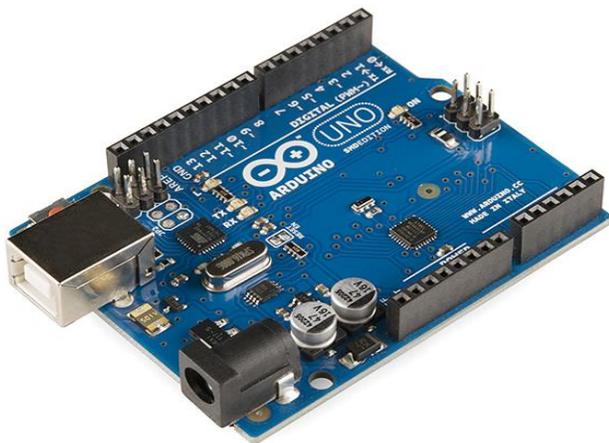


Imagen 2 Arduino Uno Fuente: (Arduino, 2024)

LDR sensor de luz, como se muestra en imagen (3). Una fotorresistencia o LDR (Light Depending Resistor, o resistencia dependiente de la luz) consta de un material semiconductor que cambia su resistencia eléctrica cuando es expuesto a diferentes niveles de luz, cuando la luz incide sobre el sensor, el material semiconductor cambia su estructura electrónica, lo que altera su resistencia, así la resistencia del sensor disminuye cuando la luz es más intensa y aumenta cuando la luz es más débil (Macho, 2024).



Imagen 3 Sensor de luz Fuente: (Macho, 2024)

Resistencia, como se muestra en imagen (4). La resistencia es una medida de la oposición al flujo de corriente en un

circuito eléctrico, se mide en ohmios, que se simbolizan con la letra griega omega (Ω), cuanto mayor la resistencia, menor es el flujo de corriente, de igual manera cuanto menor sea la resistencia, mayor será el flujo de corriente (Mazur, 2024).

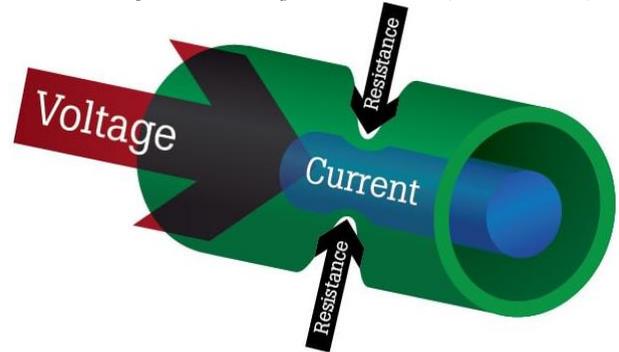


Imagen 4 Resistencia Fuente: (Mazur, 2024)

Celda solar. Es un dispositivo capaz de convertir la energía de la radiación solar en eléctrica. Una Celda Solar es una combinación de dos capas diferentes de silicio que han sido especialmente tratadas para que permitan que la electricidad fluya a través de ellas de una manera particular. La capa inferior está dopada por lo que tiene ligeramente pocos electrones (Dexen, 2024). Se muestra en la imagen (5) la estructura de una celda solar:

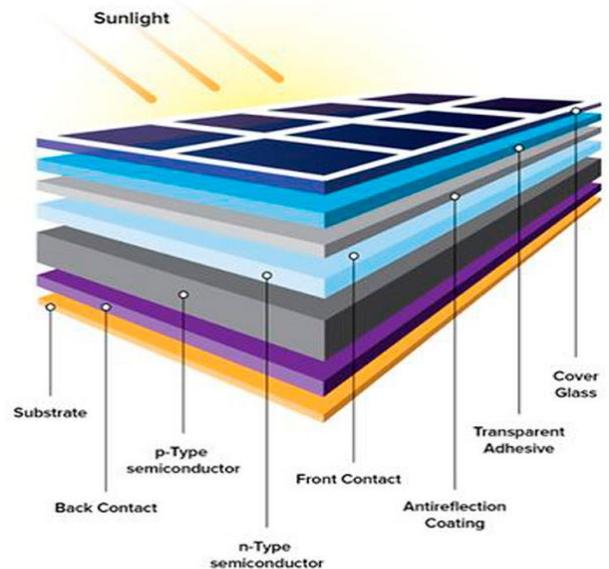


Imagen 5 Celda solar Fuente: (Dexen, 2024)

2.2. Prototipo Digital

A través de la plataforma Fritzing, se creó un prototipo digital que se muestra en la imagen (6) la cual simula el funcionamiento del seguidor solar, permitiendo la visualización y ajuste de los componentes electrónicos y la configuración de la orientación de los paneles solares. Este prototipo digital permitió una mayor flexibilidad y eficiencia en el diseño y pruebas del sistema, ya que se podían realizar cambios y ajustes rápidamente sin necesidad de fabricar prototipos físicos.

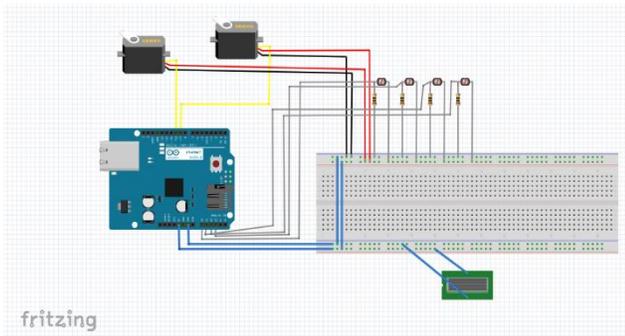


Imagen 6 Prototipo seguidor solar Fuente: Elaboración propia

2.3. Algoritmo de Control

Para lograr que el sistema de seguidor solar pueda ajustar dinámicamente la orientación de los paneles fotovoltaicos, se desarrolló un algoritmo de control avanzado que integra los datos de los sensores de luz y los comandos de los servomotores. El sistema utiliza cuatro sensores de luz LDR, que detectan la intensidad de la luz incidente y envían señales eléctricas proporcionales a un microcontrolador Arduino. Este microcontrolador, programado en el entorno de desarrollo del IDE de Arduino, procesa las lecturas de los sensores en tiempo real.

El algoritmo opera en un bucle continuo donde, tras la lectura de los valores de los LDR, se calcula la posición óptima de los servomotores que controlan la inclinación y la orientación de los paneles solares. La lógica del algoritmo se basa en la comparación de las intensidades de luz detectadas por los diferentes LDR: si un sensor recibe más luz que otro, el algoritmo ajusta la posición del panel para maximizar la captación de luz solar. Este ajuste se realiza mediante la función `map()`, que traduce los valores de los sensores a ángulos de movimiento para los servomotores.

La integración del algoritmo con los componentes del sistema es crucial. Los LDR actúan como los ojos del sistema, proporcionando información sobre la dirección de la luz solar, mientras que los servomotores son responsables de mover los paneles en respuesta a esta información. La comunicación entre el microcontrolador y los servomotores se realiza a través de señales PWM (modulación por ancho de pulso), que permiten un control preciso del movimiento.

Además, el diseño del algoritmo permite una respuesta rápida a los cambios en la intensidad de la luz, asegurando que los paneles solares se mantengan en la posición más eficiente a lo largo del día. Esto no solo maximiza la generación de energía, sino que también optimiza el rendimiento del sistema en diferentes condiciones climáticas.

El algoritmo, como se muestra en la imagen (7), representa una parte esencial del prototipo, ya que su implementación efectiva puede incrementar significativamente la eficiencia en la captación de energía solar, superando los sistemas de seguimiento convencionales.

```
void loop() {
  // Leer los valores de los LDR
  int ldrLtValue = analogRead(ldrLt);
  int ldrRtValue = analogRead(ldrRt);
  int ldrLdValue = analogRead(ldrLd);
  int ldrRdValue = analogRead(ldrRd);

  Serial.print(ldrLtValue);
  Serial.print(", ");
  Serial.print(ldrRtValue);
  Serial.print(", ");
  Serial.print(ldrLdValue);
  Serial.print(", ");
  Serial.print(ldrRdValue);
  Serial.print(", ");

  // Calcular la posición de los servomotores
  int servo1Position = map(ldrLtValue, 0, 1023, 0, 180);
  int servo2Position = map(ldrLdValue, 0, 1023, 0, 180);

  // Mover los servomotores
  servo1.write(servo1Position);
  servo2.write(servo2Position);
}
```

Imagen 7 Código Fuente: Elaboración propia

2.4. Red Neuronal

Una vez que han sido recolectados los datos mediante los sensores, almacenados en un archivo y cargados al entorno de desarrollo de la red neuronal, se puede observar en la imagen (8), como se configura el porcentaje de datos para entrenamiento (70%), validación (15%) y prueba (15%), así como las capas que va a tener la red neuronal (10).

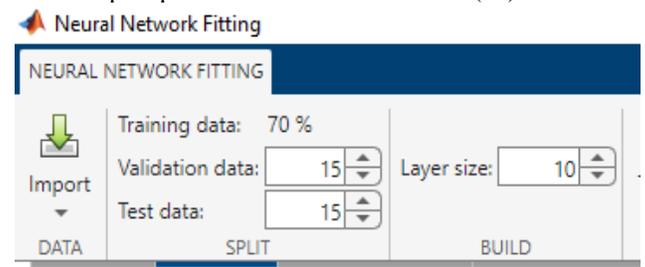


Imagen 8 Configuración de red neuronal Fuente: Elaboración propia

Para entrenar la red neuronal, simplemente se da clic en el botón "Train". Al hacerlo, se cargarán los datos de entrenamiento, inicializará aleatoriamente los pesos de la red neuronal, iterará a través de épocas de entrenamiento donde en cada una calculará la salida de la red, la comparará con la salida deseada y ajustará los pesos para minimizar el error entre la salida real y la deseada, una vez completado el entrenamiento, la red neuronal habrá aprendido a mapear los patrones de entrada a sus correspondientes salidas (MATLAB, 2024).

3. Resultados

3.1. Datos del modelo

En la imagen (9), se presenta información clave sobre la red neuronal utilizada en el prototipo, incluyendo la cantidad de datos utilizados para el entrenamiento (70% - 1303), la validación (15% - 279) y la prueba (15% - 279). El algoritmo de entrenamiento implementado fue Levenberg-Marquardt, conocido por su eficiencia en problemas de ajuste no lineal y en la optimización de redes neuronales.

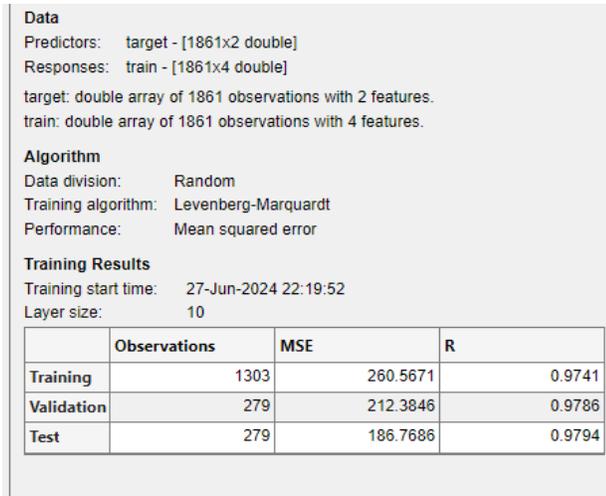


Imagen 9 Información de la red neuronal Fuente: Elaboración propia

3.2. Desempeño del modelo

La imagen (10) ilustra el número de épocas realizadas durante el entrenamiento (54), el tiempo de ejecución (00:00:02) y el rendimiento de la red neuronal (255), así como el gradiente (71.7). Estos parámetros son esenciales para evaluar la convergencia del modelo y su capacidad para minimizar el error durante el proceso de entrenamiento.

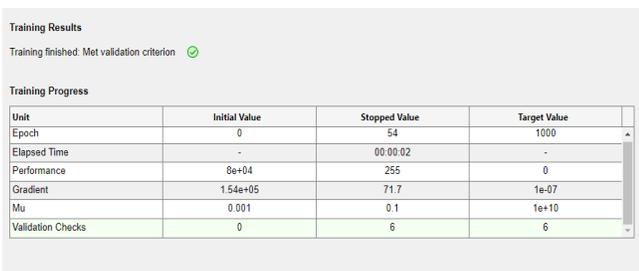


Imagen 10 Resultados de entrenamiento Fuente: Elaboración propia

3.3. Análisis de Regresión

Las gráficas de regresión, imagen (11), muestran el comportamiento de los datos, divididos en entrenamiento, validación, prueba y todas juntas. Los resultados de las gráficas obtenidas tras entrenar la red neuronal fueron favorables, con un coeficiente de determinación de 0.975. Esto indica que el modelo de red neuronal logró explicar el 97.5% de la variabilidad de los datos de salida.

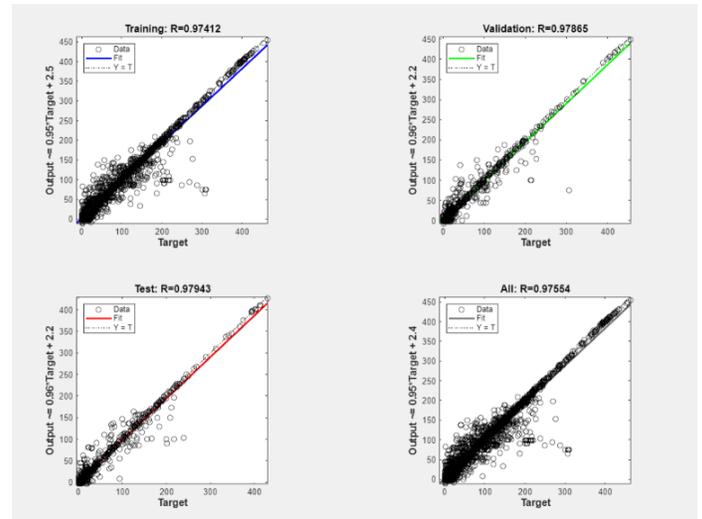


Imagen 11 Graficas de regresión Fuente: Elaboración propia

4. Discusión

El desarrollo del prototipo de seguidor solar ha demostrado su eficacia en maximizar la captación de energía solar mediante el seguimiento automático de la trayectoria del sol. La integración de un algoritmo de control en un microcontrolador, utilizando datos de sensores de luz para ajustar la orientación de los paneles solares en dos ejes, ha sido fundamental. Sin embargo, algunos estudios cuestionan nuestra hipótesis, señalando que los costos y la complejidad adicionales pueden no justificar las ganancias en eficiencia en todos los escenarios, especialmente en áreas con alta incidencia solar donde los sistemas fijos ya son bastante eficientes (Barrios Sánchez, Baeza Serrato, & Camarena Martínez, 2023). Estas perspectivas destacan la necesidad de considerar factores económicos y regionales al evaluar la viabilidad de implementar seguidores solares.

4.1. Interpretación de resultados

Estos resultados son consistentes con el propósito de maximizar la captación de energía solar, ya que demuestran que el prototipo puede adaptarse efectivamente a las variaciones en la intensidad de la luz a lo largo del día. Al ajustar la orientación de los paneles solares en respuesta a los datos de los sensores LDR, el sistema optimiza la exposición a la radiación solar, lo que se traduce en un aumento en la generación de energía.

4.2. Comparación con estudios previos

Al comparar nuestros resultados con los reportados en estudios anteriores, se observa que, aunque muchos estudios respaldan la efectividad de los sistemas de seguimiento solar, existen diferencias en la magnitud de las mejoras en la captación de energía. Por ejemplo, investigaciones previas han reportado incrementos de eficiencia que varían entre el 20% y el 40% en comparación con sistemas fijos, mientras

que nuestro prototipo ha mostrado una mejora más significativa. Esta diferencia podría atribuirse a la integración de la red neuronal en nuestro algoritmo de control, que permite una adaptación más precisa a las condiciones de luz cambiantes.

4.3. Limitaciones del estudio

Sin embargo, el estudio presenta limitaciones que podrían afectar la interpretación y generalización de los resultados. En primer lugar, el prototipo fue evaluado en condiciones controladas que pueden no reflejar la variabilidad de las condiciones climáticas en un entorno real. Además, la dependencia del sistema en sensores LDR puede limitar su efectividad en condiciones de luz difusa o en días nublados. Estas limitaciones deben ser consideradas al extrapolar los resultados a aplicaciones en el mundo real.

4.4. Direcciones para investigación futura

Basado en los resultados y limitaciones de este estudio, se sugiere que futuras investigaciones se centren en la optimización del algoritmo de control, incorporando técnicas de aprendizaje automático más avanzadas para mejorar la adaptabilidad del sistema. Además, sería beneficioso realizar pruebas en entornos reales y diversos para evaluar el rendimiento del prototipo bajo diferentes condiciones climáticas. La exploración de materiales y tecnologías alternativas para los sensores también podría contribuir a mejorar la precisión y la eficiencia del seguimiento solar. Estas direcciones no solo ayudarán a validar los resultados obtenidos, sino que también contribuirán al desarrollo de soluciones más efectivas y sostenibles en la captación de energía solar.

5. Conclusiones

El proyecto de desarrollo de un prototipo de seguidor solar ha demostrado ser eficaz en la maximización de la captación de energía solar mediante el seguimiento automático de la trayectoria del sol. El sistema utiliza un algoritmo de control implementado en un microcontrolador, que integra datos de sensores de luz para ajustar dinámicamente la orientación de los paneles solares en dos ejes. Los resultados obtenidos muestran una mejora significativa en la eficiencia de captación de energía solar, lo que subraya la importancia de este tipo de sistemas en la transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles.

El uso de herramientas como MATLAB y su toolbox de redes neuronales permitió la creación, entrenamiento y evaluación de un modelo predictivo que optimizó aún más el rendimiento del sistema. La capacidad de almacenar y analizar

datos detalladamente ha permitido identificar patrones y tendencias, lo cual es crucial para mejorar continuamente la eficiencia del seguidor solar.

6. Referencias

- AL-Rousan, N., Ashidi Mat Isa, N., & Khairunaz Mat Desa, M. (2018). Advances in solar photovoltaic tracking systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2548-2569.
- Arduino. (2024). *Arduino*. Obtenido de Arduino: <https://www.arduino.cc/>
- Barrios Sánchez, J. M., Baeza Serrato, R., & Camarena Martínez, R. (2023). Diseño e implementación de la parte mecánica de movimiento para una unidad de seguimiento solar con dos grados de libertad aplicado a generación fotovoltaica. *Jóvenes en la ciencia*, 1-13.
- Castañeda Cachimuel, D. G., & Fabara Vargas, F. A. (2023). *Predicción de la radiación solar utilizando redes neuronales para el dimensionamiento de plantas fotovoltaicas en la provincia de pichincha*. Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi.
- Cata Sánchez, J. E., & Rodríguez Sócola, F. M. (2015). *Análisis matemático de un panel solar fotovoltaico de silicio*. Guayaquil: Universidad Politécnica Salesiana.
- DeMeyer, Z. (10 de Noviembre de 2017). *arrow*. Obtenido de arrow: <https://www.arrow.com/es-mx/research-and-events/articles/arduino-uno-product-overview>
- Dexen. (2024). *Dexen*. Obtenido de Dexen: <https://www.dexen.mx/celdas-solares/#:~:text=Una%20Celda%20Solar%20es%20una,que%20tiene%20Oligeramente%20pocos%20electrones>.
- Gamarra, A., Taipe, J., Arellano, M., Lozano, Y., Brañes, H., & Lanazca, A. (2022). Panel solar inteligente para optimizar la producción de energía fotovoltaica en zonas rurales - Junín. *Prospectiva Universitaria Arquitectura e Ingeniería*, 31-35.
- Macho, J. C. (2024). *Prometec*. Obtenido de Prometec: <https://store.prometec.net/producto/ldr-sensor-de-luz/>
- MATLAB. (2024). *MATLAB*. Obtenido de MATLAB: <https://la.mathworks.com/help/deeplearning/ref/neuralnetfitting-app.html>
- Mazur, G. A. (2024). *Fluke*. Obtenido de Fluke: <https://www.fluke.com/es-sv/informacion/blog/electrica/que-es-la-resistencia#:~:text=La%20resistencia%20es%20una%20medida,entre%20voltaje%2C%20corriente%20y%20resistencia>
- Monjaráz Salas, M. (2024). *Montaje, optimización y caracterización de un sistema de seguimiento solar de dos ejes con alta precisión y bajo nivel de ruido*. Yucatán: Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.
- Oliveira Blazetic, G. (2011). *Fritzing*. Obtenido de Fritzing: <https://fritzing.org/media/uploads/learning/translations/Fritzing-PrimerosPasos.pdf>
- Perez, D. (2024). Energía solar térmica. Fundamentos, tecnologías y aplicaciones. En D. Perez, *Energía solar térmica. Fundamentos, tecnologías y aplicaciones*. Marcombo.
- Romero, A. P., Melo, S. C., Sarango, E. M., & Jiménez, M. E. (2022). Diseño e Implementación de un Seguidor Solar para Aumentar el Rendimiento de Generación. *Polo del Conocimiento*, 232-263.
- Sarango Guapi, B. A. (2023). *Seguidor Solar con Arduino Mega 2560*. León: Universidad de León.
- Sosa, A., & Castellano, A. (2024). *Construcción de mecanismo de seguimiento solar para paneles fotovoltaicos a través de internet de las cosas*. Trujillo: Universidad Valle del Momboy.
- Villantoy Mallma, P. (2023). *Fabricación de seguidor solar en ciclo abierto para energía solar de concentración*. Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena.