

## Una revisión del desarrollo de los modelos matemáticos para la estimación de la potencia eléctrica generada en un sistema fotovoltaico

**Jorge Gabriel Checa Burgos**<sup>1</sup>

[jorgecheca@itscv.edu.ec](mailto:jorgecheca@itscv.edu.ec)

<https://orcid.org/0000-0001-8322-3872>

Instituto Superior Tecnológico Ciudad de Valencia  
Quevedo, Ecuador

**Freddy Jeovanny Fares Vargas**

[freddyfares@itscv.edu.ec](mailto:freddyfares@itscv.edu.ec)

<https://orcid.org/0000-0003-1400-6676>

Instituto Superior Tecnológico Ciudad de  
Valencia  
Quevedo, Ecuador

**Alberto Ricardo Delgado Revilla**

[albertodelgado@itscv.edu.ec](mailto:albertodelgado@itscv.edu.ec)

<https://orcid.org/0009-0003-0747-1286>

Instituto Superior Tecnológico Ciudad de Valencia  
Quevedo, Ecuador

**Carlos Hugo Lozada Cabrera**

[carloslozada@itscv.edu.ec](mailto:carloslozada@itscv.edu.ec)

<https://orcid.org/0000-0002-2087-6806>

Instituto Superior Tecnológico Ciudad de  
Valencia  
Quevedo, Ecuador

**Luis Antonio Sandoval Almeida**

[luissandoval@itscv.edu.ec](mailto:luissandoval@itscv.edu.ec)

<https://orcid.org/0009-0000-5401-510X>

Instituto Superior Tecnológico Ciudad de Valencia  
Quevedo, Ecuador

### RESUMEN

En el presente proyecto se presentan los resultados de la revisión de los modelos matemáticos desarrollados para la predicción de energía eléctrica disponible en un sistema fotovoltaico, en los últimos 5 años. La metodología utilizada permitió establecer los resultados obtenidos en las diferentes investigaciones seleccionadas, presentando resultados de predicción en cada uno de ellos, como el modelo matemático utilizado, las variables climatológicas y magnitudes eléctricas utilizadas para la elaboración del modelo predictivo. Esto permite tener un punto de vista claro y un punto de partida para la predicción de energía eléctrica disponible. La predicción ayuda a mejorar la eficiencia, esto debido a que permite evaluar la cantidad de energía generada en días nublados.

**Palabras clave:** *modelos matemáticos; eficiencia; modelo predictivo; sistema fotovoltaico; energía eléctrica.*

---

<sup>1</sup> Autor principal.

Correspondencia: [jorgecheca@itscv.edu.ec](mailto:jorgecheca@itscv.edu.ec)

# **A review of the development of mathematical models for the estimation of the electrical power generated in a photovoltaic system**

## **ABSTRACT**

This project presents the results of the review of the mathematical models developed for the prediction of electrical energy available in a photovoltaic system in the last 5 years. The methodology used allowed to establish the results obtained in the different selected researches, presenting prediction results in each one of them, such as the mathematical model used, the climatological variables and electrical magnitudes used for the elaboration of the predictive model. This allows one to have a clear point of view and a starting point for the prediction of available electric energy. The prediction helps to improve efficiency, since it allows us to evaluate the amount of energy generated on cloudy days.

**Keywords:** *mathematical models, efficiency; predictive model; photovoltaic system; electric power.*

*Artículo recibido 20 mayo 2023*

*Aceptado para publicación: 20 junio 2023*

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad el suministro de energía eléctrica, una parte importante de la generación de energía eléctrica es plantas de generación térmica lo que implica el uso de combustibles no renovables, por lo que energías limpias se abren camino para cambiar este panorama, la generación de energía fotovoltaica es una tecnología madura, pese a que tiene retos como lo es el de trabajar autónomamente en ausencia del sol; siendo el principal inconveniente que presentan los sistemas fotovoltaicos que dependen de las condiciones climáticas, que resultan en muchos casos ser impredecibles, por lo que un sistema que sea capaz de predecir patrones de comportamiento de la generación de energía es muy útil para estas tecnologías.

Existen varios trabajos que se desarrollaron modelos matemáticos para la predicción de energía o escenarios que permitan estimarla, como el uso de técnicas de minería de datos, utilizando Random forest que permite crear varios árboles de decisión para usarlos en las variables de radiación solar, el ángulo de inclinación de los paneles, la humedad relativa, el viento, entre otras. Esto permite que la predicción de la potencia eléctrica sea más precisa y su tiempo de respuesta sea corto, logrando más confiabilidad en el sistema y este tipo de tecnologías se siga desarrollando para beneficio de los usuarios (Fabara et al., 2019).

Por otra parte, la obtención de un modelo matemático para predecir la potencia generada en un sistema fotovoltaico empleando internet de las cosas (IoT), a partir del uso de datos climatológicos obtenidos de una API o de portales web, son utilizados para la generación del modelo y por medio de una regresión multivariable usando el software SPSS de IBM se realiza la validación de dicho modelo matemático, para de esta forma evaluar su desempeño en la estimación de energía eléctrica (Ortega et al., 2021).

El uso de modelos de regresión es otro método utilizado para la predicción de energía, en el que se considera varios parámetros para predecir la potencia del sistema como son: la altura del sol, la posición, el envejecimiento del sistema, las nubes, el ángulo de inclinación del sistema fotovoltaico, entre otros. La validación del modelo se realiza con la recopilación de datos en tiempo real durante las 24 horas del día en intervalos de 15 minutos, con estos datos se procede a ingresar los valores obtenidos, y se obtiene el parámetro de cobertura de nubes, que se compone de la potencia real generada y el valor de la potencia estimada, y así obtener los valores que el sistema fotovoltaico puede generar (Rasheed et al., 2021).

Según diversos documentos, se presentan diferentes enfoques para la predicción y mejora del rendimiento de los sistemas fotovoltaicos. Un estudio propone un modelo de predicción basado en diferentes tecnologías de silicio, utilizando algoritmos para calcular parámetros de irradiancia y temperatura, y comparando curvas características para identificar el sistema más eficiente. Otro enfoque utiliza métodos estadísticos y funciones armónicas para recopilar datos meteorológicos y determinar la generación de electricidad en forma de funciones armónicas y mediante un modelo ARIMA (Eraso et al., 2019).

Además, se presenta el diseño de un módulo fotovoltaico utilizando el software Simulink, que utiliza algoritmos de regresión de aprendizaje automático para predecir la potencia y controlar el voltaje del sistema. Otro estudio se centra en la implementación de algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) y compara diferentes enfoques para mejorar la eficiencia (Panda & Behera, 2020), utilizando variables y parámetros para detectar cambios en la radiación solar (Bektas et al., 2019). Por último, se describe una plataforma en Matlab que combina técnicas de redes neuronales y cálculos de radiación para pronosticar la potencia generada por un sistema fotovoltaico.

La generación de energía eléctrica mediante sistemas fotovoltaicos ha dado un cambio de paradigma en el sector energético, por tal razón es importante contar con alternativas que permitan estimar de la cantidad de energía eléctrica que son capaces de generar, es por eso que se necesita obtener variables que permitan un correcto funcionamiento de dicho sistema, por esta razón, en la presente investigación se presentan una revisión de los modelos matemáticos que permitan predecir la potencia eléctrica de un sistema de generación fotovoltaica.

## **METODOLOGÍA**

Para el presente trabajo se utilizó la investigación bibliográfica para la obtención de la información necesario a través de artículos científicos, conferencias, congresos, sección de libros, tesis de pregrado y posgrado, esto permite al investigador comprender mejor y ver desde varios puntos de vista las diferentes soluciones presentadas en las investigaciones realizadas por los diferentes autores. Para el análisis de los artículos seleccionados se dividió en tres fases, primero determinar el tema de estudio, segunda búsqueda de información y tercera organización de la información. Esto permitió estructurar de mejor manera el enfoque de la investigación, para un mejor entendimiento y extracción de los

resultados obtenidos. Para el análisis de datos se utilizó el método analítico y deductivo, el cual permite filtrar, ordenar y clasificar la información de acuerdo a la relevancia de los resultados obtenidos en cada una de las investigaciones seleccionadas. Mediante la investigación descriptiva se presentan diferentes datos que permitirán comprender de mejor manera los resultados obtenidos por los diferentes autores. Para establecer una comparativa de modelos matemáticos, y ver los beneficios de cada uno de ellos, para en un futuro si se lo quiere aplicar a un caso de estudio o aplicación real, se realizó esta tabla de revisión y selección de varios temas relacionados, donde se determina el modelo a utilizar y si se empleó o no alguna simulación. De esta forma se puede elegir de mejor manera el método más adecuado para predicción de energía en un sistema fotovoltaico.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Uno de los temas de investigación que presentan las plantas de energía fotovoltaica es la determinación de un modelo de pronóstico que minimice la variación en sus predicciones con respecto al valor real de la electricidad producida en los sistemas de generación fotovoltaico. Para la búsqueda de información se recurrió a bases de datos como: Latindex, SciELO, SpringerLink, IEEEExplore, MDPI y Scopus. Para el análisis de los modelos en la investigación se seleccionó 15 investigaciones, de acuerdo con las siguientes condiciones: relación directa con el tema del trabajo y publicación realizada en los 5 últimos años.

### **Análisis de modelos predictivos**

Hasanain A.H., presenta en su trabajo el análisis de la nubosidad y el impacto de esta variable en los sistemas fotovoltaicos. Para esto utiliza dos modelos el coeficiente de correlación de Pearson y el modelo de Akinobu, las estimaciones de estos modelos se utilizan en conjunto puesto que una sola ecuación no predice la potencia de salida, por lo que se requiere varias estimaciones para que se realice correctamente la predicción, además calcula la irradiación máxima que se podría obtener. Los resultados obtenidos mostraron que las variables aleatorias provocadas por el paso de las nubes, mediante el análisis de Person indica el ajuste para la estimación de 8 días, donde interviene la dirección del tiempo, dando que es una función exponencial se determina la velocidad de la nube en m/s variando entre 1.52 m/s y 20 m/s. Al utilizar un piranómetro (medidor de radiación solar para superficie terrestre) podemos verificar la potencia real de salida, es decir el flujo de radiación en kilovatios por metro cuadrado (Al-

Hilfi et al., 2020).

Batsala Y. presenta en su investigación el desarrollo de un modelo de delo de promedio móvil integrado autorregresivo denominado ARIMA, el cual es utilizado para la predicción de energía disponible en una estación fotovoltaica, el modelo utiliza valores anteriores para iniciar el proceso aleatorio discreto, que consiste en la operación mediante ecuaciones matemáticas para establecer una serie lineal y establecer el error de estimación, a partir de datos meteorológicos (Elvira-Ortiz et al., 2020). Este modelo es utilizado en sistemas fotovoltaicos y considera datos estadísticos de años anteriores, su precisión depende del aumento de número de horas y la calidad de datos meteorológicos utilizados (Batsala et al., 2021).

Sibel C. en su investigación desarrolla una Red Neuronal (RN) en Matlab para la predicción, mediante el cual se predice la radiación solar en el eje horizontal y el cálculo de radiación solar sobre el panel fotovoltaico, donde se considera el ángulo de inclinación. Además, se considera el uso de una interfaz gráfica destinada para la visualización de datos a los usuarios, los datos calculados mediante la RN se evalúan con el error porcentual absoluto medio. Es importante señalar que el cálculo del error porcentual permite determinar el MAPE cuando es más pequeño realiza estimaciones más precisas y la correlación se aproxima a 1 (Pandiarajan & Muthu, 2011). La RN al recopilar información por 21 días de los datos de radiación solar, para predicciones en días despejados, se obtuvo mayor porcentaje de error, frente a días con variación en días de lluvia y de nubosidad, el error porcentual es de 16.22 y el coeficiente de correlación es de 0.88, por lo que podemos decir que existe bastante porcentaje de error, la precisión del modelo es de 4.90 y 30.28 (Bektas et al., 2019).

Los métodos probabilísticos han sido empleados para el análisis de potencia eficaz de sistemas fotovoltaicos, teniendo la capacidad de crear escenarios de confianza para la toma de decisiones. Este método consta de un conjunto de regresores sensibles y potenciales, siendo la regresión de cuantiles un enfoque estadístico simplificado para el pronóstico probabilístico. Para esto utiliza conjuntos de cuantiles para formar intervalos de predicción con tasas de cobertura nominales, presenta bajos tiempos de simulación. El potencial de la regresión cuantil está en cuantificar los cambios en los cuantiles de respuesta, como en cualquier modelo matemático tiene propiedades como: solidez frente a valores típicos, compensación a la transformación monótona, comparación de eficiencia y distribución de

errores gaussianas. La simulación en el software Matlab se realiza mediante observaciones de datos históricos de generación fotovoltaica, los datos se actualizan con valores anteriores recientes. Para esto se consideran horas del día arbitrariamente para la simulación como 8 am, 10 am, mediodía, 2 pm y 4 pm (Alghamdi et al., 2021). Los resultados de los cuantiles pronosticados, se establece en un valor de error máximo del 8%, por lo que los cuantiles pronosticados se ven en semejanza a los cuantiles teóricos, el modelo funciona correctamente dando valores para cada día y mes del año, teniendo errores bajos, el ajuste de densidad es equivalente a 1 (Manna & Akella, 2021).

Agarwal D. en su trabajo propone un modelo basado en el aprendizaje automático para predecir la potencia eléctrica generada en un sistema fotovoltaico por hora. El modelo incluye el efecto de la posición del sol, el ángulo de inclinación del conjunto, el efecto de envejecimiento del panel fotovoltaico y la nubosidad en el medio. La eficacia se establece a través de simulaciones para determinar la precisión del modelo matemático con presencia de nubes y sin presencia de nubes. Para esto los autores realizan la comparación de las variables de tres ciudades para entrenar el modelo, los resultados mostraron que la precisión en un periodo de tiempo de 1 a 2 horas no es muy exacta y para tiempos de 3 horas en adelante mostraron una mayor precisión (Agarwal et al., 2020).

Eraso F. desarrolla en su investigación un modelo para evaluar la potencia generada por módulos fotovoltaicos de silicio, para esto recolectan datos de irradiancia, temperatura, voltaje y la corriente del sistema fotovoltaico. Estos datos se utilizaron para obtener el modelo matemático, este modelo es lineal lo cual no puede ser resuelto, pero con la ayuda del algoritmo Cuasi-Newton y los parámetros independientes se obtuvo la potencia eléctrica estimada. Para evaluar los resultados se realizaron mediciones durante un año y se compararon los valores proyectados por el modelo y los valores reales en donde se obtuvo mejores resultados con las celdas monocristalinas, con los datos se realizó la curva de densidad de corriente y voltaje que se obtuvo en el lugar de medición (Eraso et al., 2019). Por medio de este estudio se determinó que los sistemas que mejores resultados dieron son monocristalinos y policristalinos (Batsala et al., 2021).

Panda P. en su proyecto realiza la implementación de un algoritmo de predicción de un módulo fotovoltaico en Simulink, por medio del algoritmo de regresión automático y mediante el software R se realiza la predicción, utilizando para predecir las variables dependientes (corriente, voltaje y potencia)

y usando las variables independientes (temperatura e irradiancia) (Akinsipe et al., 2021). Para la predicción inicialmente se debe entrenar el modelo mediante la recopilación de datos de las variables antes mencionadas. Los valores de los índices de rendimiento indicaron que se encuentran en valores cercano a 1 y 0, por tal razón el algoritmo de regresión funciona y es lo suficientemente preciso para utilizarlo en aplicaciones reales (Panda & Behera, 2020).

El estudio realizado por King M. utiliza modelos matemáticos para analizar el rendimiento de un sistema fotovoltaico (PV) mejorado mediante el uso de aire comprimido para la limpieza y enfriamiento de paneles solares. El modelo matemático propuesto se implementa en Simulink y combina varios componentes del sistema propuesto. El estudio analiza diferentes escenarios para determinar los beneficios potenciales de implementar el sistema de enfriamiento y limpieza mediante aire comprimido en la generación de energía solar, principalmente en dos escenarios, con PV sucios y limpios. Además, para este análisis se utilizaron datos de irradiación solar medidos localmente, para realizar las simulaciones en Matlab. Por medio de este método se destaca la importancia de realizar mantenimiento al PV con el fin de optimizar los recursos energéticos para mejorar la eficiencia energética del sistema. Los resultados obtenidos muestran una mejora en la eficiencia de los sistemas de energía solar fotovoltaica mediante el uso de aire comprimido para la limpieza y enfriamiento de los paneles solares (King et al., 2021).

Wang M. realiza en su investigación la evaluación de modelos simplistas de predicción para sistemas fotovoltaicos, para esto utiliza variables climatológicas y eléctricas. El estudio se realiza en 5 módulos fotovoltaicos diferentes (mono-Si, poli-Si, a-Si, CIGS y CdTe) y se evalúa mediante un modelo simple que consiste en la corrección de temperatura y el modelo de un diodo. La evaluación de la precisión de los modelos se llevó a cabo por tres indicadores: el coeficiente de determinación, el error de sesgo medio y error cuadrático medio, los resultados obtenidos mostraron que existe una sobrestimación de generación de energía en el modelo de temperatura, pero es aceptable el error para uso como predictor, mientras que el modelo de diodo demostró ser más preciso para predecir la potencia de salida de un PV (Wang et al., 2021).

Premkumara M. presenta en su investigación un análisis de un modelo equivalente basado en un solo diodo solar fotovoltaico. El modelo se deriva de un circuito equivalente de la celda fotovoltaica y se

extiende al panel fotovoltaico, para formar un arreglo. Se utiliza para pronosticar con precisión las características fotovoltaicas, como el voltaje de circuito abierto, la corriente de cortocircuito y el punto de máxima potencia (MPP), bajo diferentes condiciones de temperatura e irradiación solar. El modelo es aplicable tanto a sistemas conectados en serie como en paralelo y se simula utilizando Matlab/Simulink. Se examina en condiciones de sombreado parcial para encontrar la configuración óptima. El modelo propuesto logra una alta precisión en la producción de la máxima potencia de salida, similar a los datos del fabricante (Premkumar et al., 2020).

## RESULTADOS OBTENIDOS

El documento también proporciona información sobre la fuente de datos utilizada en el estudio y la capacidad instalada del sistema PV utilizado en la prueba. En general, el documento presenta un enfoque interesante para abordar los desafíos de predecir la producción de energía fotovoltaica en cielo despejado. Los métodos propuestos pueden ser útiles para mejorar la eficiencia en la gestión y programación de la capacidad de producción de energía PV. Sin embargo, el documento se centra en un caso de estudio específico y puede ser necesario realizar más investigaciones para evaluar la aplicabilidad de los métodos propuestos en diferentes contextos y condiciones climáticas.

**Tabla 1:**

*Modelos matematicos que mostraron mejor desempeño en la predicción de energía eléctrica*

Proyecto	Algoritmo predictor	Resultados	Sugerencias del autor
Generation Prediction for a Photovoltaic System through the application of Data Mining techniques.	Ramdon Forest,cross-validation	Se obtiene un error medio cuadrático (RMSE) de 31.65 y un error porcentual absoluto medio (MAPE) de 4.27%	Los valores de predicción y reales son similares dando a entender que el sistema de minería de datos tiene muy buena confiabilidad
Obtaining a Mathematical Model to Predict the Power of a Photovoltaic System Using IoT	datos de la API en la página web Meteomatics, datos de la web con la estación meteorológica INIFAP-CEBAJ	Parámetro de R2 del modelo se validó correctamente, este es un parámetro que otorga el programa SPSS	Para obtener el modelo matemático se utilizó el programa SPSS de IBM
Data-driven model of Photovoltaic Module by Machine Learning Regression for Power Maximization	$I_0 = I_{rs} * \left[ \frac{T}{T_n} \right]^{-3} e^{\left[ \frac{q * E_g}{nK} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_n} \right) \right]}$	La irradiación que se obtuvo es de 100W/m2 la cual es muy baja para generar potencia	La irradiancia varia, esto por la estación climática anual lo cual complica la predicción de potencia

Comparative analysis of various P & O MPPT algorithm for PV system under varying radiation condition	Usa Simulink para aplicar el método MPPT que permite validar datos de las salidas de los algoritmos planteados	El mejor resultado es el algoritmo P&O sin deriva ya que reduce la pérdida de energía.	La radiación tiene un tiempo de simulación de 4 segundos a 25 °C
Design of a MATLAB GUI for Day Ahead Forecasting of PV Panel Power	Datos obtenidos de la estación meteorológica “Davis Vantage Pro 2”, Con estos datos optaron por el modelo ANN	Error conceptual medio MAPE de 16.22 y el coeficiente de correlación de 0.88.	El modelo fue entrenado 21 días para cielos despejados y este pronóstico resulto ser más preciso que otros días que son nublados o con lluvia

**Fuente:** Elaboración propia

## CONCLUSIONES

Mediante la recopilación de datos bibliográficos se pudo comprobar la importancia de la implementación de un modelo matemático para la producción de energía eléctrica en sistemas fotovoltaicos, debido a que permite conocer cómo varía la potencia en función de diferentes variables como radiación, temperatura, humedad, radiación, entre otras.

Muchos de los modelos matemáticos o algoritmos que se presentan en la investigación requieren de datos almacenados en un periodo de tiempo mínimo de 1 día para realizar la predicción, o incluso en 1 año para lograr obtener una mejor precisión en la estimación de la potencia eléctrica en sistemas fotovoltaicos.

Para comparar la eficiencia del sistema fotovoltaico, se utilizan valores recopilados de estaciones meteorológicas lo que permite tener valores reales, con los cuales se puede predecir el error porcentual que tendrá el programa.

## LISTA DE REFERENCIAS

- Agarwal, D., Gupta, V., Jaiswal, D., & Mandpura, A. K. (2020). A Machine Learning-Based Approach for PV Power Forecasting. *2020 International Conference for Emerging Technology (INCET)*, 1-4. <https://doi.org/10.1109/INCET49848.2020.9154131>
- Akinsipe, O. C., Moya, D., & Kaparaju, P. (2021). Design and economic analysis of off-grid solar PV system in Jos-Nigeria. *Journal of Cleaner Production*, 287, 125055.

- Alghamdi, M. A., Khan, M. F. N., Khan, A. K., Khan, I., Ahmed, A., Kiani, A. T., & Khan, M. A. (2021). PV model parameter estimation using modified FPA with dynamic switch probability and step size function. *IEEE Access*, *9*, 42027-42044.
- Al-Hilfi, H. A. H., Shahnia, F., & Abu-Siada, A. (2020). An Improved Technique to Estimate the Total Generated Power by Neighboring Photovoltaic Systems Using Single-Point Irradiance Measurement and Correlational Models. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, *16*(6), 3905-3917. <https://doi.org/10.1109/TII.2019.2941218>
- Batsala, Ya. V., Hlad, I. V., Yaremak, I. I., & Kiianiuk, O. I. (2021). Mathematical model for forecasting the process of electric power generation by photoelectric stations. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, *1*, 111-116. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-1/111>
- Bektas, S. C., Cakmak, R., & Altas, I. H. (2019). Design of a MATLAB GUI for Day Ahead Forecasting of PV Panel Power. *2019 Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU)*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/ASYU48272.2019.8946349>
- Elvira-Ortiz, D. A., Jaen-Cuellar, A. Y., Morinigo-Sotelo, D., Morales-Velazquez, L., Osornio-Rios, R. A., & Romero-Troncoso, R. de J. (2020). Genetic algorithm methodology for the estimation of generated power and harmonic content in photovoltaic generation. *Applied Sciences*, *10*(2), 542.
- Eraso, F. J., Erazo, O. F., Escobar, E., Eraso, F. J., Erazo, O. F., & Escobar, E. (2019). Modelo para la estimación de potencia eléctrica en módulos fotovoltaicos de tecnología basada en silicio. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, *27*(2), 188-196. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052019000200188>
- Fabara, C., Maldonado, D., Soria, M., & Tovar, A. (2019). Predicción de la Generación para un Sistema Fotovoltaico mediante la aplicación de técnicas de Minería de Datos. *Revista Técnica" energía"*, *16*(1), 70-78.
- King, M., Li, D., Dooner, M., Ghosh, S., Roy, J. N., Chakraborty, C., & Wang, J. (2021). Mathematical Modelling of a System for Solar PV Efficiency Improvement Using Compressed Air for Panel Cleaning and Cooling. *Energies*, *14*(14), 4072. <https://doi.org/10.3390/en14144072>

- Manna, S., & Akella, A. K. (2021). Comparative analysis of various P & O MPPT algorithm for PV system under varying radiation condition. *2021 1st International Conference on Power Electronics and Energy (ICPEE)*, 1-6.
- Ortega, V. M. S., Nolasco, J. J. M., & Rangel, D. C. (2021). Obtención de Modelo Matemático para Predecir la Potencia de un Sistema Fotovoltaico Empleando IoT. *Universo de la Tecnológica*.
- Panda, P., & Behera, S. (2020). Data-driven model of Photovoltaic Module by Machine Learning Regression for Power Maximization. *2020 IEEE International Symposium on Sustainable Energy, Signal Processing and Cyber Security (ISSSC)*, 1-5.  
<https://doi.org/10.1109/iSSSC50941.2020.9358893>
- Pandiarajan, N., & Muthu, R. (2011). Mathematical modeling of photovoltaic module with Simulink. *2011 1st International Conference on Electrical Energy Systems*, 258-263.
- Premkumar, M., Kumar, C., & Sowmya, R. (2020). Mathematical Modelling of Solar Photovoltaic Cell/Panel/Array based on the Physical Parameters from the Manufacturer's Datasheet. *International Journal of Renewable Energy Development*, 9(1), 7-22.  
<https://doi.org/10.14710/ijred.9.1.7-22>
- Rasheed, M., Mohammed, O. Y., Shihab, S., & Al-Adili, A. (2021). A comparative analysis of PV cell mathematical model. *Journal of Physics: Conference Series*, 1795(1), 012042.
- Wang, M., Peng, J., Luo, Y., Shen, Z., & Yang, H. (2021). Comparison of different simplistic prediction models for forecasting PV power output: Assessment with experimental measurements. *Energy*, 224, 120162. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120162>