


# Comparación teórico-experimental de la potencia generada por un sistema fotovoltaico en México

*Theoretical-Experimental comparison of the power generated by a photovoltaic system in Mexico*

-  **Abraham Nava-Camargo** es alumno de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica del Tecnológico Nacional de México en Celaya (México) (m2303076@itcelaya.edu.mx) (<https://orcid.org/0009-0006-4467-0243>), Licenciado.
-  **Arnoldo Maeda-Sánchez** es profesor del departamento de Ingeniería Mecánica del Tecnológico Nacional de México en Celaya (México) (arnoldo.maeda@itcelaya.edu.mx) (<https://orcid.org/0000-0002-3679-0038>), Maestro.
-  **Nicolás Guerrero-Sánchez** es profesor del departamento de Ingeniería Mecánica del Tecnológico Nacional de México en Celaya (México) (nicolas.guerrero.chavez@gmail.com) (<https://orcid.org/0000-0001-6147-5200>), Doctor.

**Resumen:** El artículo aborda el uso de sistemas fotovoltaicos como una alternativa renovable para la generación de energía eléctrica en México. Se presenta un modelo teórico que utiliza una variedad fórmulas astronómicas con el objetivo de calcular la irradiación solar global sobre un plano inclinado, así como sus diferentes componentes (radiación directa, radiación difusa y radiación albedo). Para esto, se emplean datos meteorológicos, valores de latitud y se utiliza un programa creado en Excel para automatizar los cálculos. Por otro lado, el modelo experimental consistió en medir la potencia generada por un panel fotovoltaico instalado en las coordenadas 20.5375° N, -100.8158° O, utilizando medidores de voltaje, intensidad de corriente eléctrica y un sensor de irradiación solar. Las mediciones se realizaron cada 5 minutos durante casi 2 horas. Los resultados muestran una buena correlación entre los valores teóricos y experimentales de irradiación solar y potencia generada, con un error porcentual del 1.754%. Los datos indican una relación directa entre la irradiación y la potencia generada: a medida que aumenta la irradiación solar, también lo hace la potencia. Las fluctuaciones en la irradiación observadas fueron causadas por la variación de nubosidad en el cielo a lo largo del método experimental, lo cual afectó ligeramente los valores medidos. El análisis muestra que el sistema fotovoltaico responde adecuadamente a las variaciones de irradiación solar, con un comportamiento predecible. A pesar de las fluctuaciones debidas a la nubosidad, los valores de potencia e irradiación son consistentes con el modelo teórico.

**Palabras clave:** Energía solar, Sistemas fotovoltaicos, Radiación solar, Irradiación solar, Energías renovables.

**Cómo citar:** Nava-Camargo, A., Maeda-Sánchez, A. y Guerrero-Chávez, N. (2024). Comparación teórico-experimental de la potencia generada por un sistema fotovoltaico en México. *Tecnología, Ciencia y Estudios Organizacionales*, 6(12), pp. 5 –14. <https://doi.org/10.56913/teceo.6.12.5-14>

Recepción: 30-09-2024  
Aprobación: 23-10-2024

**Abstract:** The article addresses the use of photovoltaic systems as a renewable alternative for generating electrical energy in Mexico. A theoretical model is presented that utilizes various astronomical equations to calculate global solar irradiance on an inclined plane, as well as its different components (direct radiation, diffuse radiation, and albedo radiation). For this, meteorological data, latitude values, and a custom Excel program were employed to automate the calculations. On the other hand, the experimental model involved measuring the power generated by a photovoltaic panel installed at coordinates 20.5375° N, -100.8158° W, using voltage meters, electric current intensity meters, and a solar irradiance sensor. Measurements were taken every 5 minutes for nearly 2 hours. The results show a good correlation between the theoretical and experimental values of solar irradiance and generated power, with a percentage error of 1.754%. The data indicate a direct relationship between irradiance and power generation: as solar irradiance increases, so does the power. The fluctuations in irradiance observed were caused by variations in cloud cover throughout the experimental method, which slightly affected the measured values. The analysis shows that the photovoltaic system responds appropriately to variations in solar irradiance, with predictable behavior. Despite fluctuations due to cloud cover, the power and irradiance values are consistent with the theoretical model.

**Keywords:** Solar energy, Photovoltaic systems, Solar radiation, Solar irradiance, Renewable energy.

### Introducción

Dentro del territorio mexicano, la energía eléctrica utilizada es generada en su mayoría utilizando combustibles fósiles (SciELO, n.d.), como el carbón y otros productos derivados del petróleo, generando anualmente millones de toneladas de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), las cuales contribuyen al efecto invernadero y calentamiento global de nuestro planeta. A nivel mundial, la utilización de sistemas fotovoltaicos como fuentes de generación de energía eléctrica se ha incrementado exponencialmente debido a su contribución con el cuidado del medio ambiente (ONU, n.d.), hasta el punto de que hoy en día, es común encontrar parques solares, cuyo propósito es generar la mayor cantidad de electricidad con el área disponible, esto se logra a través de un proceso fotoeléctrico por medio de luz solar.

El carácter modular de la energía solar la hace accesible a personas y colectivos que les sea posible obtener energía eléctrica convencional en sus hogares. Esta misma característica junto con las propiedades estructurales de los sistemas fotovoltaicos hace que pueda integrarse en edificios y estructuras tanto de ciudades como en zonas de difícil acceso. Según la International Renewable Energy Agency (IRENA, 2015), México se encuentra en una región muy favorecida para la utilización recursos solares (Iberdrola México, n.d.), donde se reciben diariamente, en promedio, 5.5 kW-h/m<sup>2</sup> de radiación solar, por lo que es importante estudiar este factor para el aprovechamiento de los sistemas fotovoltaicos a corto plazo.

El objetivo principal de esta investigación consiste en comparar los valores teóricos y experimentales de la potencia generada por un sistema fotovoltaico, con la finalidad de poder aprovechar de mejor manera en un futuro inmediato la radiación solar para la producción de energía eléctrica en el territorio nacional mexicano, y así, poder contribuir a la disminución de dióxido de carbono. Este análisis fue desarrollado dentro de las instalaciones del Tecnológico Nacional de México en la Celaya, por lo que se utilizaron los datos de coordenadas y radiación solar obtenidos dentro de la misma institución.

## Método

Primeramente, con ayuda de la aplicación móvil de google maps se obtuvo el valor de la latitud ( $\varphi$ ) en un punto específico. El valor de la declinación solar ( $\delta$ ) varía estacionalmente debido a la inclinación de la Tierra sobre su eje y a la rotación del planeta alrededor del sol, por lo que los valores de radiación solar que podemos obtener se ven afectados a lo largo del año. Calculamos el valor de la declinación con la ecuación 1 (Duffie & Beckman, 2013, p. 13).

$$\delta = 23.45^\circ \sin \frac{360 (dn + 284)}{365} \quad (1)$$

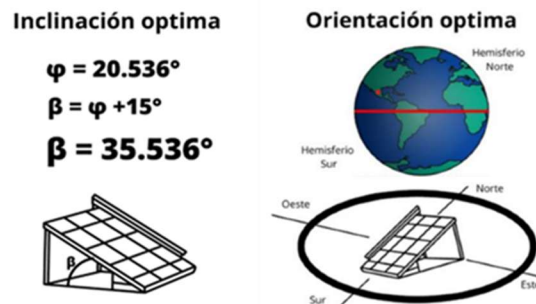
En un plano horizontal solo podemos percibir al sol en un máximo de  $180^\circ$ , sin embargo, no todas las 24 horas se percibe el sol, por ello, utilizamos la ecuación 2 (Duffie & Beckman, 2013, p. 17) para calcular el ángulo que el sol tendrá al amanecer y al atardecer ( $W_s$ ).

$$W_s = -\cos^{-1}(-\tan\delta * \tan\varphi) \quad (2)$$

Debido a que en ocasiones no se puede disponer de un panel solar en condiciones ideales de inclinación en el lugar de colocación, para evitar la mayor cantidad de pérdidas posibles se calculó la inclinación ( $\beta$ ) utilizando la ecuación 3 (Zang et al., 2016, p. 654), además, el panel solar se debe instalar en la posición contraria al hemisferio en el que se encuentra (Energy Education, n.d.). En la Figura 1 se muestra gráficamente el acomodo resultante de la ecuación tres y la posición del hemisferio.

$$\beta = \varphi + 15^\circ \quad (3)$$

**Figura 1.** Ejemplo de inclinación y orientación óptima en la colocación de un panel solar.



Debido a que la Tierra gira alrededor del sol en forma elíptica, ocasionando que su distancia al sol sea variable a lo largo del año, se debe definir el número del día anual ( $dn$ ) en la que se realizó la experimentación (valores de 1 a 366), esto para hacer uso de la ecuación 4 (Witmer, 2023) y así determinar el factor de excentricidad ( $\varepsilon_{(0)}$ ), que es la distancia tierra-sol en un determinado día del año con respecto a un valor promedio constante.

$$\varepsilon_{(0)} = 1 + 0.033 \cos \cos \left( \frac{360 * dn}{365} \right) \quad (4)$$

La constante solar  $B_0$ , obtenida según la escala de la World Meteorological Organization (WMO) (Newport, n.d.), es la energía total a todas las longitudes de onda incidente sobre una superficie normal a los rayos del Sol a una distancia de una unidad astronómica (1 UA), su valor es de 1,367 W/m<sup>2</sup>. La irradiancia solar extraterrestre  $B_{0d}(0)$ , que consiste en la irradiación que viaja en línea recta desde el sol, se calculó mediante la ecuación 5 (IntechOpen, n.d.) utilizando un tiempo  $T = 24$ hrs.

$$B_{0d}(0) = \left(\frac{T}{\pi}\right) B_0 \varepsilon_{(0)} \left[ - \left( \left(\frac{\pi}{180}\right) (W_s * \sin \sin \varphi * \sin \sin \delta) \right) - (\cos \cos \varphi * \cos \cos \delta * \sin \sin W_s) \right] \quad (5)$$

Los datos de la irradiación global promedio ( $G_{dm}(0)$ ), que es la radiación recibida de manera horizontal una vez los rayos del sol atravesaron la atmósfera, se obtuvieron de la base de datos “NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER)” (NASA, n.d.).

El índice de claridad ( $K_{Tm}$ ), que es la medida de transparencia entre la irradiación global y la irradiancia extraterrestre, se calculó mediante la ecuación 6 (IntechOpen, n.d.).

$$K_{Tm} = \frac{G_{dm}(0)}{B_{0d}(0)} \quad (6)$$

La radiación difusa [ $D_{dm}(0)$ ], es aquella que atravesando la atmósfera es reflejada por las nubes o absorbida por éstas, viajando en todas direcciones, no sólo de las nubes, sino también de las partículas de polvo atmosférico, árboles, edificios, montañas, el propio suelo, etc. Por otra parte, la fracción difusa ( $F_{Dm}$ ), que se presenta por mayor nubosidad o por muchas partículas en la atmósfera, por lo tanto, cuanto más clara sea la atmósfera, mayor será la radiación y menor será el contenido difuso. La fracción y radiación difusas fueron calculadas por las ecuaciones 7 y 8 respectivamente (IntechOpen, n.d.).

$$F_{Dm} = 1 - 1.13K_{Tm} \quad (7)$$

$$D_{dm}(0) = F_{Dm} * G_{dm}(0) \quad (8)$$

Para el cálculo de la irradiación directa sobre un panel horizontal se utilizó la ecuación 9 (IntechOpen, n.d.).

$$B_{dm}(0) = G_{dm}(0) - D_{dm}(0) \quad (9)$$

Se debe conocer el ángulo de salida que el sol tendrá al amanecer, pero ahora tomando en cuenta que este recae sobre una superficie inclinada, por lo que se toma en cuenta un valor máximo expresado en la ecuación 10 (Luque & Hegedus, 2003, p. 932).

$$W_{ss} = \text{Max}\{-(-\tan \tan \delta * \tan \tan (\varphi - \beta)); W_s\} \quad (10)$$

El factor de corrección de irradiación directa para una superficie inclinada (RB), es el valor de corrección que representa la relación entre las irradiaciones directas diarias sobre una superficie inclinada y sobre una superficie horizontal y puede aproximarse fijándola igual a la proporción correspondiente entre irradiaciones extraterrestres diarias sobre superficies similares. Para obtener el valor correcto de este factor, es necesario hacer uso de la función  $\text{sgn}(x)$ , cuyo valor matemático se obtiene con la ecuación 11 (Weisstein, n.d.).

$$\text{sgn}(\varphi) = \begin{cases} 1 & \text{si } \varphi > 0 \\ 0 & \text{si } \varphi = 0 \\ -1 & \text{si } \varphi < 0 \end{cases} \quad (11)$$

La ecuación 12 (Luque & Hegedus, 2003, p. 932), hace uso de la ecuación 11 para calcular el factor de corrección de irradiación directa para una superficie inclinada.

$$RB = \frac{\left( W_{ss} * \frac{\pi}{180} * \text{sgn}(\varphi) * \sin \delta * \sin (|\varphi| - \beta) \right) + (\cos \delta * \cos (|\varphi| - \beta)}{\left( W_s * \frac{\pi}{180} * \sin \delta * \sin \varphi \right) + (\cos \delta * \cos \varphi * \sin W} \quad (12)$$

Se utiliza la ecuación 13 (IntechOpen, n.d.) para calcular la irradiación directa sobre una superficie inclinada.

$$B_{dm}(\beta, \alpha) = B_{dm}(0) * RB \quad (13)$$

Continuando con la ecuación 14 (Luque & Hegedus, 2003, p. 930) para calcular la irradiación difusa, ahora en un plano inclinado.

$$D_{dm}(\beta, \alpha) = D_{dm}(0) * \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad (14)$$

Se debe obtener la irradiación albedo sobre un plano inclinado ( $R_{dm}(\beta, \alpha)$ ) calculada mediante la ecuación 15 (Luque & Hegedus, 2003, p. 931) y cómo el entorno donde se instalará el panel influye en este valor, se asume que los objetos que reflejan la luz lo hacen de forma uniforme en todas las direcciones. Para saber el nivel de reflectividad que tiene el entorno, existen valores definidos para cada tipo de superficie que hay, este valor está denominado por el símbolo rho ( $\rho$ ). El valor se mide de 0 a 1, 0 indica que la superficie absorbe toda la radiación, y 1 indica reflectividad total. En la tabla 1, se muestran los entornos más comunes y sus valores. Usualmente para ciudades se usa el valor de  $\rho = 0.2$  (Iowa State University, n.d.).

**Tabla 1**

*Valores de reflectividad de un entorno en superficies más comunes*

Entorno	P
Nieve	0.8-0.9
Arena	0.25-0.35
Suelo seco	0.1-0.2
Suelo húmedo (barro)	0.05
Hierba	0.3
Bosques	0.05-0.15

$$R_{dm}(\beta, \alpha) = \rho * G_{dm}(0) * \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (15)$$

Este estudio se enfoca en la medición de la dime Finalmente, la irradiación solar global ( $G_{dm}(\beta, \alpha)$ ), calculada con la ecuación 16 (Luque & Hegedus, 2003, p. 928), nos da a conocer el valor de cuanto radiación solar podemos recibir en un día determinado en el punto donde se coloque el panel solar.

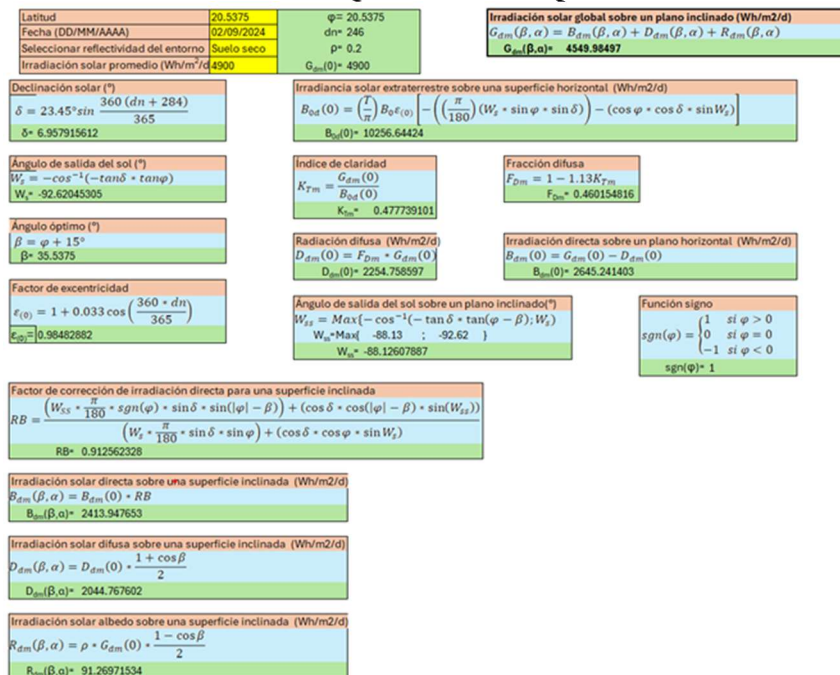
$$G_{dm}(\beta, \alpha) = B_{dm}(\beta, \alpha) + D_{dm}(\beta, \alpha) + R_{dm}(\beta, \alpha) \quad (16)$$

Para realizar los cálculos teóricos, nos apoyamos de un programa elaborado en Excel (Figura 2), con la finalidad de poder calcular de manera automática todos los datos necesarios solamente editando los valores de fecha, latitud, reflectividad del entorno e irradiación solar promedio.

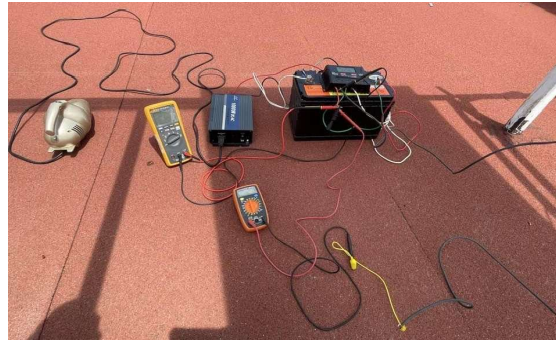
### Modelo Experimental

En las coordenadas  $20.53750^\circ$ ,  $-100.81580^\circ$ , se colocó un panel solar modelo Yingli 260 W en base a la inclinación óptima final calculada de  $35.5^\circ$  mediante la ayuda de una aplicación móvil de giroscopio. Se extrajeron los cables positivo y negativo del panel para colocarlos en un controlador de carga de 12 voltios, el controlador se conectó a una batería del mismo voltaje, y esta a su vez se conectó a un inversor para que una aspiradora de 600 watts de potencia estuviera funcionando y pudiera pasar corriente para ser medida con multímetros. Entre el panel solar y el controlador de carga, se colocaron los multímetros para poder medir el voltaje y la intensidad de manera simultánea (Figura 3) y así obtener la potencia generada por el panel.

**Figura 2.** Programa para calcular la irradiación solar global sobre un plano inclinado.



**Figura 3.** Instrumentación del modelo experimental.



A su vez, con cada medida de intensidad y voltaje, se midió el nivel de irradiación solar recibida por el panel. Esto se realizó con ayuda de un medidor de luz solar modelo TES 1333, colocado de tal manera que su sensor de medición esté orientado con la misma inclinación del panel (Figura 4).

**Figura 4.** Inclinación del medidor de luz solar.



Estas tres mediciones se realizaron cada 5 minutos de manera interrumpida entre las 12:00 hrs y las 13:55 hrs del lunes 2 de septiembre del 2024, en las coordenadas mencionadas anteriormente. Cabe destacar que se seleccionó esta fecha debido a que el clima tenía una gran variación de actividad solar por la interrupción de nubes de manera temporal, esto para obtener mayor variedad en los valores de radiación en comparación de haberse realizado con una luminosidad más uniforme.

### Resultados

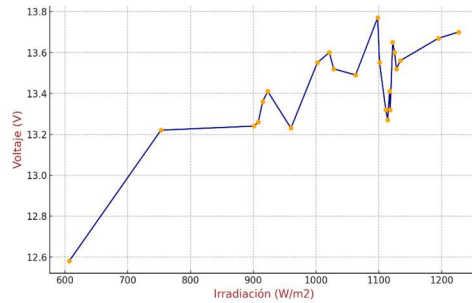
Los valores obtenidos mediante las mediciones experimentales se muestran en la tabla 2, se estima que en México las horas solares pico abarcan 4.5 hrs del día, esto quiere decir que solo tendremos esas horas con la mayor intensidad de radiación. Para calcular la irradiación global promedio que se obtuvo el 02 de septiembre del 2024, multiplicamos la irradiación global promedio por hora por el número de horas pico que corresponden a un día, con un valor obtenido de 4629.735 Wh/m<sup>2</sup>/día. El valor del cálculo teórico realizado en el programa de Excel para este mismo valor fue de 4549.98497 Wh/m<sup>2</sup>/día, lo que representa un porcentaje de error de 1.754%.

**Tabla 2.***Valores obtenidos en el modelo experimental*

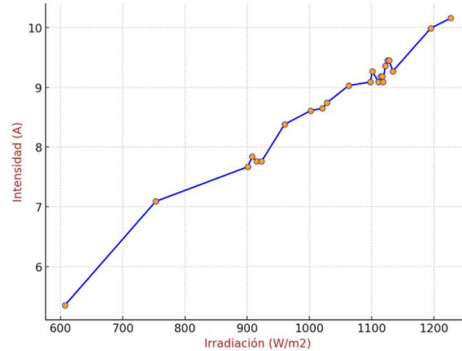
Hora	Voltaje (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)	Irradiación (W/m <sup>2</sup> )
12:00	13.60	8.65	117.64	1021
12:05	13.55	8.61	116.67	1002
12:10	13.65	9.36	127.76	1122
12:15	13.32	9.09	121.08	1118
12:20	13.24	7.67	101.55	901
12:25	13.60	9.45	128.52	1125
12:30	13.41	9.18	123.10	1117
12:35	13.55	9.27	125.61	1101
12:40	13.56	9.27	125.70	1134
12:45	13.32	9.09	121.08	1111
12:50	13.22	7.09	93.73	753
12:55	13.41	7.76	104.06	923
13:00	13.36	7.76	103.67	915
13:05	13.77	9.09	125.17	1098
13:10	13.27	9.18	121.82	1114
13:15	13.70	10.16	139.19	1227
13:20	13.67	9.99	136.56	1195
13:25	13.49	9.03	121.81	1063
13:30	12.58	5.35	67.30	607
13:35	13.26	7.84	103.96	908
13:40	13.52	9.45	127.76	1128
13:45	13.23	8.38	110.87	960
13:50	13.43	8.65	116.17	1021
13:55	13.52	8.74	118.16	1028
Promedio	13.42625	8.67125	116.623392	1028.833333

La Figura 5 muestra la relación entre los diferentes niveles de radiación solar y el voltaje medido entre el panel y el controlador de carga. La Figura 6 muestra entre los diferentes niveles de radiación solar y la intensidad de corriente que circula entre el panel solar y el controlador de carga. Finalmente, la Figura 7 muestra la potencia eléctrica generada por el panel en distintos niveles de radiación solar.

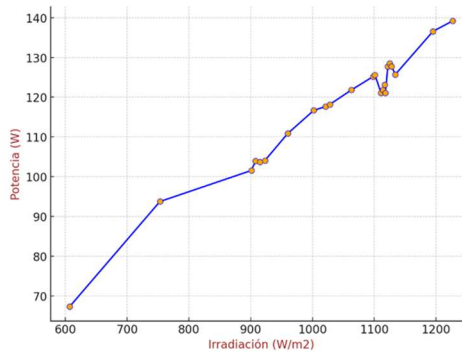
**Figura 5.** Gráfica de irradiación vs voltaje.



**Figura 6.** Gráfica de irradiación vs intensidad.



**Figura 7.** Gráfica de irradiación vs potencia.



## Discusión

Con porcentaje de error menor al 2%, podemos concluir que el programa otorga resultados similares a los obtenidos en la experimentación y puede utilizarse para saber la cantidad de irradiación global que se puede obtener en un punto determinado.

Con los datos visualizados en la Figura 6, observamos que existe una tendencia de aumento de voltaje conforme aumenta la irradiación, como cabría esperar en un sistema fotovoltaico típico, sin embargo, hay un punto en el que el voltaje se estabiliza o aumenta muy lentamente. Esto ocurre porque el voltaje de un panel solar no sigue incrementándose indefinidamente con la irradiación, en su lugar, alcanza un valor cercano a su voltaje máximo operativo.

Por otro lado, en las gráficas de las Figuras 7 y 8, se observa una relación positiva entre la irradiación solar la potencia e intensidad de corriente generadas. A medida que la irradiación aumenta, la potencia e intensidad de corriente también crecen de manera significativa.

Debido a la obstrucción solar ocasionada por el tránsito de nubes los valores de irradiación aumentaron y decrecieron de manera considerable en varias mediciones, como se puede apreciar en la tabla 2. Sin embargo, el sistema fotovoltaico parece estar funcionando correctamente, respondiendo bien a las variaciones del valor de la irradiación solar. Las fluctuaciones observadas son consistentes con cambios en las condiciones de nubosidad en el cielo. La relación entre irradiación y potencia es clara, lo que sugiere que el sistema está capturando de manera eficiente la energía solar disponible en las horas de medición.

### Referencias

- 1.5. Extraterrestrial radiation and the atmosphere. (s/f). Psu.edu. Recuperado el 25 de noviembre de 2024, de <https://www.e-education.psu.edu/eme811/node/637>
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). Solar engineering of thermal processes. Wiley.
- Lorenzo, E. (2003). Energy collected and delivered by PV modules. En Handbook of Photovoltaic Science and Engineering (pp. 905–970). Wiley. <https://doi.org/10.1002/0470014008.ch20>
- Ramos-Gutiérrez, L. de J., & Montenegro-Fragoso, M. (2012). La generación de energía eléctrica en México. Tecnología y ciencias del agua, 3(4), 197–211. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-4222012000400012](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-4222012000400012)
- Solar panel orientation. (s/f). Energyeducation.Ca. Recuperado el 25 de noviembre de 2024, de [https://energyeducation.ca/encyclopedia/Solar\\_panel\\_orientation](https://energyeducation.ca/encyclopedia/Solar_panel_orientation)
- Stackhouse, P. (s/f). Nasa power. Nasa.gov. Recuperado el 25 de noviembre de 2024, de <https://power.larc.nasa.gov/>
- Surface Reflectivity. (s/f). Iastate.edu. Recuperado el 25 de noviembre de 2024, de <https://meteor.geol.iastate.edu/gccourse/forcing/reflectivity2.html>
- United Nations. (s/f). La promesa de la energía solar: Estrategia energética para reducir las emisiones de carbono en el siglo XXI | Naciones Unidas. Recuperado el 25 de noviembre de 2024, de <https://www.un.org/es/chronicle/article/la-promesa-de-la-energia-solar-estrategia-energetica-para-reducir-las-emisiones-de-carbono-en-el>
- Weisstein, E. W. (s/f). Sign. Recuperado el 25 de noviembre de 2024, de <https://mathworld.wolfram.com/Sign.html>
- Zang, H., Guo, M., Wei, Z., & Sun, G. (2016). Determination of the optimal tilt angle of solar collectors for different climates of China. Sustainability, 8(7), 654. <https://doi.org/10.3390/su8070654>
- (S/f-a). Iberdrolamexico.com. Recuperado el 25 de noviembre de 2024, de <https://www.iberdrolamexico.com/te-interesa/el-sol-fuente-inagotable-de-energia-limpia/#:~:text=De%20acuerdo%20con%20la%20International,energ%C3%ADa%20radiante%20por%20metro%20cuadrado.>
- (S/f-b). Intechopen.com. Recuperado el 25 de noviembre de 2024, de <https://www.intechopen.com/>