

ESTUDIO DE LA EFICIENCIA Y LA TEMPERATURA DE UNA CELDA FOTOVOLTAICA PARA CONDICIONES AMBIENTALES DE LA CIUDAD DE TUXTLA GUTIÉRREZ

STUDY OF THE EFFICIENCY AND TEMPERATURE OF THE PHOTOVOLTAIC CELL FOR ENVIRONMENTAL CONDITIONS OF TUXTLA GUTIERREZ CITY

Rubén Herrera Galicia

Tecnológico Nacional de México / IT de Tuxtla Gutiérrez, México
h_galicia24@hotmail.com

Karina Lizbeth Escobar Sánchez

Tecnológico Nacional de México / IT de Tuxtla Gutiérrez, México
karina.es@tuxtla.tecnm.mx

Juan de Dios Sánchez Moreno

Tecnológico Nacional de México / IT de Tuxtla Gutiérrez, México
LC18270418@tuxtla.tecnm.mx

Rubén Daniel Camacho Harrizón

Tecnológico Nacional de México / IT de Tuxtla Gutiérrez, México
L19270814@tuxtla.tecnm.mx

Brandon Axel Peña Venegas

Tecnológico Nacional de México / IT de Tuxtla Gutiérrez, México
L19270801@tuxtla.tecnm.mx

Recepción: 5/octubre/2023

Aceptación: 26/abril/2024

Resumen

Las condiciones atmosféricas cambian durante el día. Por esta razón el objetivo es estudiar la eficiencia (η) y la temperatura de la superficie del panel fotovoltaico (T_{panel}), en función de las variables climáticas (G, T_a, V_w, \emptyset). También, se estudia la relación de la irradiancia con el voltaje en circuito abierto, y la corriente en corto circuito ($V_{oc}(G), I_{sc}(G)$). Los resultados muestran que la eficiencia depende principalmente de la irradiancia y la temperatura. El viento y la humedad tienen menor impacto en la eficiencia. La irradiancia impacta en la corriente de corto circuito de forma lineal. La temperatura tiene impacto en (I_{sc}), pero es menor y no

lineal. La irradiancia y la temperatura tienen impacto no lineal en el voltaje de circuito abierto. Se redujo $\eta = f(V_{oc}, I_{sc}, G, FF, A, T_{panel})$ al modelo no lineal $V_{oc} = f(G, T_{panel})$. El impacto del proyecto consiste en la caracterización de la eficiencia eléctrica, en función de las variables climáticas.

Palabras Clave: Celda fotovoltaica, Eficiencia, Irradiancia.

Abstract

Atmospheric conditions change during the day. For this reason, the objective is to study the efficiency (η) and the surface temperature of the photovoltaic panel (T_{panel}), depending on the climatic variables (G, T_a, V_w, \emptyset). Also, the irradiance is studied as a function of the open circuit voltage and the short circuit current $G = f(V_{oc}, I_{sc})$. The results show that the efficiency mainly depends on the irradiance and temperature. Wind and humidity have less impact on efficiency. Irradiance impacts the short circuit current linearly. Temperature has an impact on (I_{sc}), but it is minor and non-linear. Irradiance and temperature have nonlinear impact on the open circuit voltage. $\eta = f(V_{oc}, I_{sc}, G, FF, A, T_{panel})$ Was reduced to the nonlinear model $V_{oc} = f(G, T_{panel})$. The impact of the project consists of the characterization of electrical efficiency, depending on climatic variables.

Keywords: Efficiency, Irradiance, Photovoltaic cell.

1. Introducción

El uso de la energía solar tiene varias ventajas; permite tener acceso a la electricidad en comunidades remotas, representa una solución energética sostenible, amigable con el ambiente, que hace posible la reducción de emisión de gases de efecto invernadero, y es una fuente alterna de energía. Además, los paneles fotovoltaicos están fabricados con material semiconductor de silicio, el cual está presente en abundancia en la tierra, lo que lo hace viable para ser utilizado en la producción de paneles fotovoltaicos.

A pesar de las ventajas de los sistemas fotovoltaicos estos tienen desventajas asociadas con la variación de; la irradiancia, la temperatura ambiente, la velocidad

del viento, la humedad, el polvo, el sombreado, las aves, y el granizo. Estos factores pueden actuar en detrimento de la eficiencia del panel, y algunos de ellos le ocasionan daños físicos [Kalaiselvan, 2018].

Los paneles fotovoltaicos están diseñados para trabajar bajo condiciones de prueba estándar. Pero el clima es variable y las condiciones de prueba estándar no coinciden con las condiciones que experimentan los paneles al aire libre. Las celdas fotovoltaicas sometidas a condiciones climáticas se ven afectadas en su vida útil y en el precio de cada (*kWh*), en función de su costo de mantenimiento y de la energía producida [Saad, 2022].

La eficiencia de un panel fotovoltaico depende de la temperatura de la superficie de las celdas. Dicha temperatura es una función de; la irradiancia, la temperatura ambiente, la velocidad del viento, y la humedad relativa del aire. La irradiancia es afectada por las nubes de tres maneras; la reflejan, la absorben y la difuminan. A pesar de ello, las nubes permiten que la irradiancia alcance al panel fotovoltaico. Por lo tanto, en los días de mayor nubosidad, la eficiencia puede estar entre 10 y 15%. En verano, la reducción de la eficiencia, por altas temperaturas, se compensa por el aumento de horas solares [Zaini, 2015].

En la hoja de datos, el fabricante presenta que la temperatura estándar de los paneles fotovoltaicos es de 25 °C. En condiciones de Irradiancia 1000 (W/m^2) y temperatura del panel 25 °C, la eficiencia del panel fotovoltaico disminuye entre 0.4 y 0.5%, por cada grado que aumenta la temperatura.

Lo anterior confirma la importancia del estudio de las propiedades de las celdas solares y sus parámetros característicos, tales como la eficiencia. Es importante comprender la respuesta de los paneles fotovoltaicos, trabajando en condiciones atmosféricas variables. Además, es un reto diseñar sistemas y mejorar la eficiencia de estos, a pesar de que trabajen bajo condiciones lejos de las óptimas.

En [Suresh, 2014] se comunicó que la eficiencia eléctrica de un sistema fotovoltaico depende linealmente de la temperatura de funcionamiento y de la humedad relativa. También, se expuso que, aplicando técnicas de humidificación de la superficie de la celda fotovoltaica, se disminuye su temperatura por el principio de enfriamiento por evaporación. En [Zaini, 2015], mediante trabajo experimental, se estudia el

comportamiento de un sistema fotovoltaico monocristalino, a diferentes temperaturas, y los resultados se validan con simulación usando el software Matlab/Simulink. Cuando la temperatura aumenta, la eficiencia y el voltaje de circuito abierto disminuyen mientras que la corriente de cortocircuito aumenta.

En [Kalaiselvan, 2018] se comunicó que, el calentamiento del panel fotovoltaico afecta a la curva de eficiencia, concluyendo que, cada grado centígrado por encima de 25 °C corresponde a una reducción de la potencia máxima de salida entre 0.41 y 0.485%, que es el coeficiente de temperatura de la potencia.

En [Durganjali, 2019] se comparó la eficiencia de las celdas fotovoltaicas, a distintas temperaturas, y se mostró que la eficiencia y el voltaje en circuito abierto disminuyen con el aumento de la temperatura, simultáneamente la corriente de corto circuito aumenta. En [Saad, 2022] se comunicó que la eficiencia; disminuye al aumentar la temperatura; aumenta al aumentar la radiación solar.

En [Ross, 1976] se presentó una ecuación para calcular la temperatura del panel fotovoltaico (T_{panel}) en función de; la temperatura ambiente (T_a), la irradiancia (G) y una constante de proporcionalidad (K). En [Oliveira-Santos, 2022] se exhibió una lista de 33 ecuaciones de correlación para calcular la temperatura del panel fotovoltaico, entre ellas se encuentran 4 ecuaciones de modelos similares al de [Ross, 1976].

En [Servant, 1986] se mostró un modelo simplificado, de intercambio de calor entre un modulo fotovoltaico y su entorno, para determinar coeficientes y calcular la temperatura de operación de la celda (T_{panel}), en función de los parámetros climáticos. Para desarrollar el modelo usaron el método de mínimos cuadrados, el cual asume que la temperatura de la celda es linealmente dependiente de los parámetros climáticos. Los autores calcularon los coeficientes, uno por cada parámetro: irradiancia, temperatura ambiente y velocidad del viento. En la lista que se encuentra en [Oliveira-Santos, 2022] la ecuación de correlación de Chenni es similar a la de [Servant, 1986].

En [Sohani, 2020] se usó un año de datos experimentales de variables climáticas y programación genética para predecir diferentes parámetros, entre ellos la temperatura del panel fotovoltaico (T_{panel}). Las variables climáticas usadas en el

estudio son: irradiancia, temperatura ambiente, velocidad del viento y la humedad relativa del aire. En [Sohani, 2020] se mostró un modelo matemático para predecir la temperatura del panel fotovoltaico.

El impacto de este proyecto se basa en la importancia del estudio y caracterización de la eficiencia de la generación fotovoltaica, en función de las condiciones ambientales de un lugar en específico. Esta eficiencia está determinada por los valores de las variables climáticas (T_a, G, V_w, \emptyset) , cuya característica es que no se pueden controlar.

En este trabajo, se estudian las variables del medio ambiente que influyen en la eficiencia (η) del panel fotovoltaico, a saber; la radiación solar, la temperatura ambiente, la velocidad del viento, y la humedad del aire (G, T_a, V_w, \emptyset) . También se estudia la temperatura de la superficie del panel fotovoltaico (T_{panel}) en función de las variables climáticas, a saber; la temperatura ambiente, la radiación solar, la velocidad del viento, y la humedad relativa del aire (T_a, G, V_w, \emptyset) . Además, se estudian las relaciones de la irradiancia (G) con el voltaje en circuito abierto, y la corriente de corto circuito (V_{oc}, I_{sc}) .

2. Métodos

Irradiancia (G) . Es la energía radiante por unidad de área por unidad de tiempo que atraviesa una superficie de área (A) , perpendicular a la dirección de propagación de la onda. La definición de la irradiancia (G) en función de dichas cantidades está expresada en la ecuación 1.

$$G = \frac{E}{At} = \frac{Pt}{At} = \frac{P}{A} \rightarrow P_{in} = GA \quad (1)$$

Como la energía (E) es el producto de la potencia (P) por el tiempo $(E = Pt)$, entonces se substituye en la definición de la irradiancia (G) , ecuación 1. El paso siguiente es eliminar términos semejantes y con ello se obtiene una expresión para la potencia (P) , que corresponde a la potencia incidente (P_{in}) , donde la potencia incidente es el producto de la irradiancia (G) por el área de la celda (A) .

Celda solar empleada. El módulo que se instaló es de silicio monocristalino. La marca usada es SERAPHIM y el modelo instalado es el SRP-450-BMA-HV. Las

tablas 1 y 2 muestran los datos técnicos del panel fotovoltaico. Las especificaciones eléctricas se indican para 25 °C y una irradiancia de 1000 W/m².

Tabla 1 Especificaciones técnicas del panel fotovoltaico SRP-450-BMA-HV.

Potencia máxima (P_{mp})	450 W (+/-3%)
Máximo Voltaje (V_{mp})	41.80 V
Máximo Amperaje (I_{mp})	10.77 A
Voltaje a circuito abierto (V_{oc})	50.10 V (+/-2%)
Corriente de corto circuito (I_{sc})	11.42 A (+/-4%)
Dimensiones	2094x1038x35 mm
Peso	23.5 kg
Temperatura del ambiente	- 40 a 85 °C
Máximo voltaje del sistema	1500 V
Eficiencia	20.70%

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2 Especificaciones térmicas del panel fotovoltaico SRP-450-BMA-HV.

Temperatura nominal de la célula operativa		NOCT	(C)	45 (+/- 2)
Coefficiente de temperatura de	P_{max}	γ	(%/C)	-0.35
Coefficiente de temperatura de	V_{oc}	β	(%/C)	-0.27
Coefficiente de temperatura de	I_{sc}	α	(%/C)	+0.05

Fuente: elaboración propia.

Orientación e inclinación del panel. El panel solar se instaló en el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez en Carretera Panamericana km 1080, que se encuentra en las coordenadas de latitud 16.75697° y de longitud -93.17253° a 522 msnm, en el municipio de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. El panel se instaló con dirección al sur geográfico.

Para el cálculo del valor óptimo mensual del ángulo de inclinación (β) se toma en cuenta la estación del año en que se encuentra. En el caso de ser junio y julio, a la latitud del lugar se le restan 2.5 grados, ecuación 2. Las pruebas se hicieron a finales del mes de mayo del 2023. Se instaló el panel con una inclinación de 21.6°, para que los rayos solares incidan de manera perpendicular al panel, figura 1.

$$\beta = \text{latitud} - 2.5 \quad (2)$$

Eficiencia. La eficiencia se define como el resultado de dividir la potencia de salida del panel fotovoltaico (P_{out}) entre la potencia incidente (P_{in}). La eficiencia se puede calcular con los parámetros dados por el fabricante; por ejemplo, con la potencia máxima de salida ($P_{max} = P_{mp}$), ecuación 3 y tabla 1.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{I_{mp}V_{mp}}{P_{in}} = \frac{I_{sc}V_{oc}FF}{P_{in}} = \frac{I_{sc}V_{oc}FF}{GA} \quad (3)$$



Fuente: elaboración propia.

Figura 1 Panel fotovoltaico SRP-450-BMA-HV instalado.

La potencia máxima de salida (P_{max}) se calcula de dos formas.

- Primera forma: multiplicando la corriente de máxima potencia (I_{mp}) por el voltaje de máxima potencia (V_{mp}).
- Segunda forma: multiplicando el voltaje de circuito abierto (V_{oc}), por la corriente de cortocircuito (I_{sc}), y por el factor de forma (FF), ver ecuación 3.

Factor de forma (FF). En las celdas cristalinas el factor de forma (FF) oscila entre 0.70 y 0.85. En las celdas amorfas (FF) varía entre 0.5 y 0.7. De la ecuación 3 se despeja el factor de forma (FF), ecuación 4. El cálculo del factor de forma (FF), con los datos de la tabla 1, da un valor de 0.7868, tabla 3.

$$\eta = \frac{I_{mp}V_{mp}}{P_{in}} = \frac{I_{sc}V_{oc}FF}{P_{in}} \rightarrow FF = \frac{I_{mp}V_{mp}}{I_{sc}V_{oc}} \quad (4)$$

Tabla 3 El cálculo del factor de forma (FF).

Parámetro técnico	Valor
I_{mp}	10.77 A
V_{mp}	41.80 V
I_{sc}	11.42 A
V_{oc}	50.10 V
FF	0.7868

Fuente: elaboración propia.

Cálculo de la eficiencia. La ecuación 5 permite calcular la eficiencia conociendo el voltaje de circuito abierto (V_{oc}), la corriente de cortocircuito (I_{sc}), y la irradiancia (G).

También, se considera el área del panel fotovoltaico $A = 2.1735 \text{ m}^2$ y se usa el valor del factor de forma calculado en la tabla 3 ($FF = 0.7868$).

$$\eta = \frac{I_{sc} V_{oc} FF}{GA} \quad (5)$$

Temperatura del módulo fotovoltaico (T_{panel}). Se revisaron los modelos matemáticos de correlación lineal y no lineal, existentes en la literatura, sobre el efecto que tienen las variables climáticas (T_a, G, V_w, \emptyset) en la temperatura del panel fotovoltaico (T_{panel}) y se seleccionaron tres de ellos. Para efectos de cálculos y comparación; la ecuación 6 [Ross, 1976], similar a la ecuación de Durish analizada en [Oliveira-Santos, 2022]; la ecuación 7 [Servant, 1986], similar a la ecuación de Chenni analizada en [Oliveira-Santos, 2022], y la ecuación 8 de [Sohani, 2020]. Los valores considerados para las constantes de las ecuaciones 6 a 8 están presentados en la tabla 4.

$$T_{p1} = T_a + KG \quad (6)$$

$$T_{p2} = T_a + c_1 G (1 + c_2 T_a) (1 - c_3 V_w) \quad (7)$$

$$T_{p3} = \frac{1}{3} \left(a T_a + b \left(\frac{G}{G_{ref}} \right)^c + d \emptyset^e + f V_w + g \right) - 273.15 \quad (8)$$

Tabla 4 Valores de las constantes que aparecen en las ecuaciones 6 a 8.

Constante	Valor
K	0.024
c_1	0.116
c_2	0.03
c_3	0.085
a	3.847
b	288 (C)
c	0.01496
d	269.6 (C/%)
e	0.008117
f	-0.2754 (C/(m/s) ⁻¹)
g	278.5 (C)

Fuente: elaboración propia.

3. Resultados

Efecto de las variables del medio ambiente. Se estudia aquí el efecto de las variables del medio ambiente, en el desempeño del panel solar, a través de

mediciones en el lugar. Para la experimentación; se hicieron mediciones durante la semana del 27 de mayo al 2 de junio del 2023, y se compararon los resultados. Las mediciones se hicieron de 9:00 a 18:00, cada cinco minutos, lo cual da un total de 109 mediciones por día, de cada parámetro, de cada panel fotovoltaico.

En la tabla 5 se presentan una parte (31 - 50) de las 109 mediciones hechas el sábado 27 de mayo del 2023. La columna de la irradiancia (G) corresponde a mediciones que fueron hechas sin excluir algún tipo de cielo, sea este cielo nublado o despejado.

Tabla 5 Datos de las variables climáticas; mediciones (31 – 50).

No.	Hora	V_{oc} (V)	I_{sc} (A)	G_1 (W/m^2)	G_2 (W/m^2)	T (°C)	V_w (m/s)	\emptyset (%)
31	11:30	43.9	10.46	1073	1046	43.2	0.8	36.22
32	11:35	43.7	10.81	1110	1058	44.4	0	28.55
33	11:40	43.8	10.92	1125	1066	44.3	1.5	33.23
34	11:45	43.8	10.72	1127	1066	43.2	1.4	35.75
35	11:50	43.6	10.85	1129	1088	42.8	0.8	34.62
36	11:55	43.5	11.05	1147	1107	46.3	0.8	34.66
37	12:00	43.5	11.30	1167	1117	43	1	36.26
38	12:05	43.5	11.58	1174	1120	42.9	1.4	37.3
39	12:10	43.3	11.41	1205	1128	44	1.1	30.26
40	12:15	43.4	11.66	1194	1132	43.6	0.8	30.30
41	12:20	43.4	11.52	1188	1135	41.2	0.8	33.25
42	12:25	43.4	11.47	1181	1141	39.8	1.1	35.77
43	12:30	43.4	11.34	1186	1140	39.4	1.2	32.7
44	12:35	43.4	11.22	1191	1141	38.3	1.5	35.24
45	12:40	44.0	11.09	1142	1143	38.7	1.6	36.15
46	12:45	43.8	10.81	1113	1146	34.98	1.5	38.7
47	12:50	43.6	10.57	1073	1142	35.6	2.4	36.33
48	12:55	43.8	10.58	1072	1140	39.00	2.3	34.18
49	13:00	43.7	10.37	1063	1048	41.15	1.3	30.49
50	13:05	43.8	11.01	1112	1075	39.5	1.9	35.32

Fuente: elaboración propia.

Radiación solar horizontal diaria. A partir del total de las 109 mediciones se calculó la irradiancia promedio, la cual dio $G = 760 (W/m^2)$. Todos los cálculos de este trabajo están hechos con Octave. También se calculó el potencial del día, lo cual dio 6.5 horas efectivas de $1000 (W/m^2)$.

Cálculos de la potencia de salida y la eficiencia. Los datos de las 109 mediciones se usaron para calcular la potencia máxima de salida (P_{mp}) y la eficiencia (η). Para ello se aplicaron las ecuaciones 9 y 5 respectivamente. Los valores obtenidos de (P_{mp}) y (η) mostrados en tabla 5, se presentan en la tabla 6.

$$P_{mp} = Voc I_{sc} FF \quad (9)$$

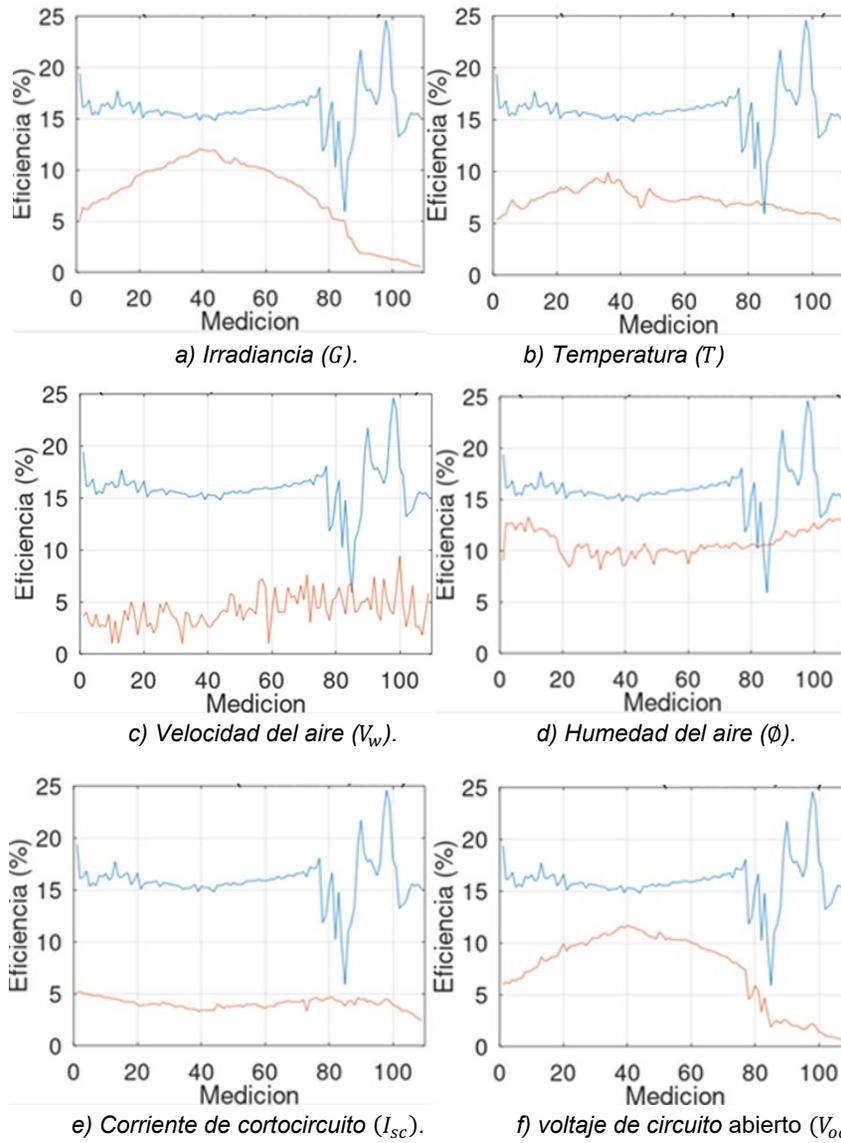
Tabla 6 Cálculos; Potencia máxima de salida (P_{mp}) y eficiencia (η).

No.	Hora	I_{sc} (A)	V_{oc} (V)	P_{mp} (W)	G_1 (W/m ²)	η (%)
31	11:30	43.9	10.46	361	1073	15.48
32	11:35	43.7	10.81	371	1110	15.40
33	11:40	43.8	10.92	376	1125	15.38
34	11:45	43.8	10.72	369	1127	15.07
35	11:50	43.6	10.85	372	1129	15.16
36	11:55	43.5	11.05	378	1147	15.16
37	12:00	43.5	11.30	386	1167	15.24
38	12:05	43.5	11.58	396	1174	15.52
39	12:10	43.3	11.41	388	1205	14.83
40	12:15	43.4	11.66	398	1194	15.33
41	12:20	43.4	11.52	393	1188	15.22
42	12:25	43.4	11.47	391	1181	15.25
43	12:30	43.4	11.34	310	1186	15.02
44	12:35	43.4	11.22	383	1191	14.79
45	12:40	44.0	11.09	383	1142	15.46
46	12:45	43.8	10.81	372	1113	15.39
47	12:50	43.6	10.57	362	1073	15.53
48	12:55	43.8	10.58	364	1072	15.64
49	01:00	43.7	10.37	356	1063	15.42
50	01:05	43.8	11.01	379	1112	15.68

Fuente: elaboración propia.

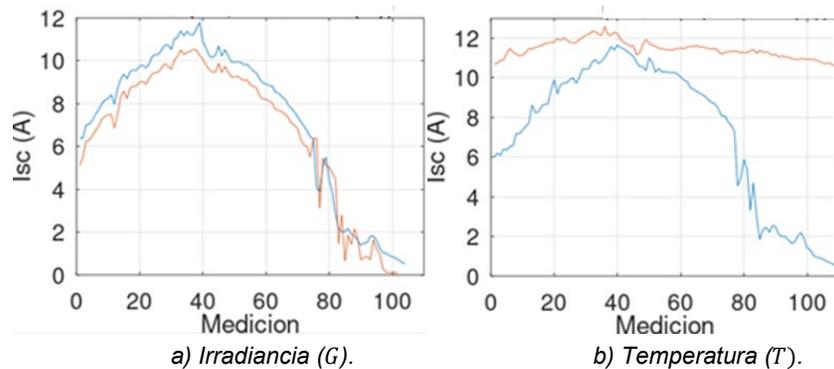
La eficiencia y las variables del medio ambiente. En las figuras 2a y 2b se presenta la gráfica de la eficiencia (η) junto con las gráficas de las mediciones de las variables del medio ambiente (G, T, V_w, \emptyset). Todas las gráficas de este trabajo están hechas con Octave. En la figura 2c se presenta la comparación entre la eficiencia (η) y los parámetros eléctricos (I_{sc}, V_{oc}). En las figuras 3 y 4 se presenta la comparación entre los parámetros eléctricos (I_{sc}, V_{oc}) y el par irradiancia – temperatura (G, T). Las trayectorias se presentan por pares para facilitar la identificación visual de la posible existencia de una relación de función. En una etapa posterior se buscará validar la veracidad de las conjeturas con rigorismo matemático. En la tabla 7 se presentan las conjeturas formuladas como producto de la comparación de las trayectorias presentadas en las figuras 2 a 4.

La temperatura del panel fotovoltaico y las variables del medio ambiente. En las figuras 5 y 6 se presenta la gráfica de la temperatura ambiente (T_a) junto con las gráficas de los cálculos de la temperatura del panel, ecuaciones 6, 7 y 8 (T_{p1}, T_{p2}, T_{p3}).



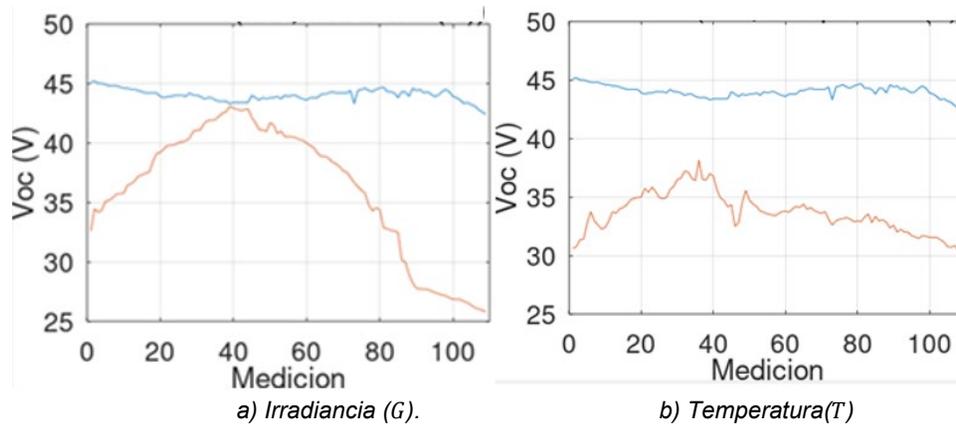
Fuente: elaboración propia.

Figura 2 Eficiencia, sábado 27 de mayo del 2023, de 9:00 a 18:00.



Fuente: elaboración propia.

Figura 3 Corriente de cortocircuito (I_{sc}), sábado 27 de mayo del 2023, de 9:00 a 18:00.



Fuente: elaboración propia.

Figura 4 Voltaje de circuito abierto (V_{oc}), sábado 27 de mayo del 2023, de 9:00 a 18:00.

Tabla 7 Observaciones referentes a las figuras 2 a 4.

Figura	Par	Conjeturas		
		Existencia de relación de función; estimación basada en las trayectorias del par de graficas	Correlación	
			Grado	Tipo
2a	(η, G)	(η) es inversamente proporcional a (G)	Alta	No lineal
2b	(η, T)	(η) es inversamente proporcional a (T)	Mediana	No lineal
2	General. La temperatura ambiente y la irradiancia son variables climáticas independientes			
2c	(η, V_w)	(η) y (V_w) para los niveles medidos de (V_w) ; se carece de una relación de función visible.	Med-Baj	No lineal
2d	(η, \emptyset)	(η) y (\emptyset) ambas bajan, ambas suben; a un mismo tiempo con ritmos diferentes.	Baja	No lineal
2	General. El viento ocasiona enfriamiento del panel, y una menor temperatura del panel ocasiona una eficiencia mayor; importa el promedio de la velocidad del aire por día; mayor promedio de la velocidad del viento, mayor eficiencia y cantidad de energía por día.			
2e	(η, I_{sc})	(η) es inversamente proporcional a (I_{sc})	Alta	No lineal
2f	(η, V_{oc})	(η) y (V_{oc}) primero; ambas decrecen. Luego, hasta el dato 80; ambas crecen. Después; (η) crece, mientras (V_{oc}) decrece.	Mediana	No lineal
2	General; (I_{sc}) y (V_{oc}) impactan directamente en el cálculo de la potencia máxima de salida (P_{mp}), ver ecuación (3), y de la eficiencia (η) , ver ecuación (5).			
3a	(I_{sc}, G)	La corriente (I_{sc}) es directamente proporcional a (G) ; coinciden las trayectorias de (G) y (I_{sc}) .	Alta	Lineal
3b	(I_{sc}, T)	Es notorio el impacto de (T) en (I_{sc}) ; ambas trayectorias coinciden en algunos picos y algunos huecos; sobre todo al medio día.	Mediana	No lineal
3	General. (T) Es la temperatura medida del aire (T_a); pero aporta más información considerar la temperatura medida del panel $(T_{panel})_{medida}$ y compararla con (I_{sc}) .			
4a	(V_{oc}, G)	(V_{oc}) y (G) son inversamente proporcionales hasta el dato 80; después ambas decrecen.	Mediana	No lineal
4b	(V_{oc}, T)	(V_{oc}) y (T) son inversamente proporcionales hasta el dato 80; después ambas decrecen.	Med-Baj	No lineal
3 y 4	General. En la trayectoria de (T) se observan cambios considerables; pero estos cambios impactan mas a (I_{sc}) ; el voltaje (V_{oc}) se ve menos afectado por los cambios de la temperatura (T) .			

Fuente: elaboración propia.

En la figura 5 se presenta la comparación entre las variables (T_a, G) y las temperaturas (T_{p1}, T_{p2}, T_{p3}). En la figura 6 se presenta la comparación entre las variables (V_w, \emptyset) y las temperaturas (T_{p1}, T_{p2}, T_{p3}). Los colores de las líneas correspondientes a las temperaturas son; (T_{p1}) color rojo, (T_{p2}) amarillo, y (T_{p3}) morado. En la tabla 8 se presentan las conjeturas formuladas como producto de comparar las trayectorias presentadas en las figuras 5 y 6.

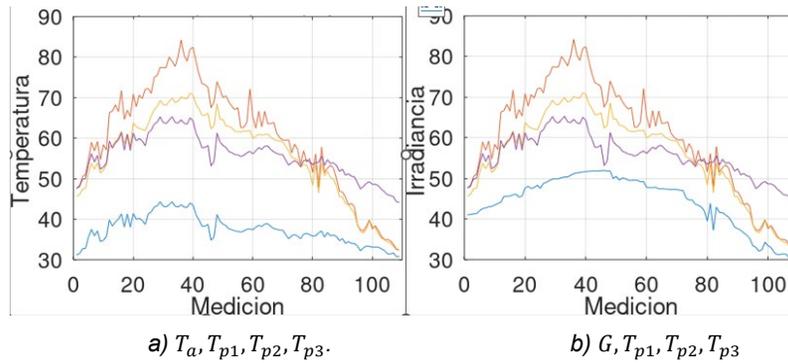


Figura 5 T_a y G , 27 de mayo del 2023, de 9:00 a 18:00.

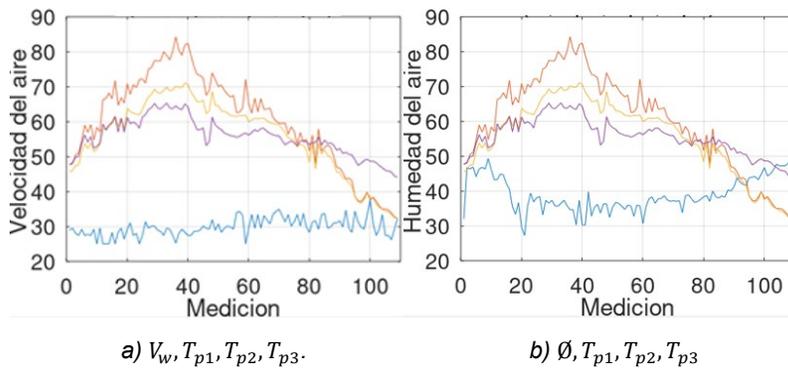


Figura 6 V_w y \emptyset , 27 de mayo del 2023, de 9:00 a 18:00.

4. Discusión

Se midió el voltaje en circuito abierto, la corriente en corto circuito, la irradiancia, la temperatura ambiente, la velocidad el viento y la humedad relativa del aire ($V_{oc}, I_{sc}, G, T_a, V_w, \emptyset$). Se calcularon la irradiancia promedio $G = 760 (W/m^2)$, el potencial del día 6.5 horas efectivas de $1000 (W/m^2)$, la potencia máxima de salida (P_{mp}) y la eficiencia (η).

Tabla 8 Observaciones referentes a las figuras 5 y 6.

Figura	Variables	Conjetura - Relación	Correlación	
			Grado	Tipo
5a	$(T_a, T_{p1}, T_{p2}, T_{p3})$	(T_a) y (T_{p3}) son directamente proporcionales. Las trayectorias $(T_a \text{ azul}, T_{p3} \text{ morado})$ son las que mejor concuerdan entre sí.	Alta	Lineal
5b	$(G, T_{p1}, T_{p2}, T_{p3})$	(G) y (T_{p3}) son directamente proporcionales. La trayectoria (T_{p3}) es la que mejor describe a la temperatura del panel.	Alta	Débil No lineal
6a	$(V_w, T_{p1}, T_{p2}, T_{p3})$	(V_w) influye disminuyendo la temperatura del panel. Su impacto, en la trayectoria de (T_{p3}) , es poco visible. Ver tabla 5: $(V_w) < 3.2 \left(\frac{m}{s}\right)$.	Baja	Lineal
6b	$(\emptyset, T_{p1}, T_{p2}, T_{p3})$	(\emptyset) y (T_{p3}) son inversamente proporcionales, pero carecen de una relación de función visible a partir de sus trayectorias; los huecos y los picos no coinciden.	Baja	Débil No lineal

Fuente: elaboración propia.

En las figuras 2a y 2b (η, G) y (η, T) , las trayectorias de las gráficas inducen a pensar que la eficiencia es inversamente proporcional a la irradiancia y a la temperatura. También, las trayectorias inducen a pensar que existe correlación y que en ambos casos la correlación es no lineal, ver el resumen de conjeturas en la tabla 10.

En las figuras 2c y 2d (η, V_w) y (η, \emptyset) , la diferencia entre las trayectorias de la eficiencia y la velocidad del viento es notoria; La velocidad del viento impacta en la temperatura del panel, en consecuencia, la velocidad del viento impacta en la eficiencia, pero de forma indirecta, a través de la temperatura del panel. En las figuras 2e y 2f la trayectoria de la irradiancia es similar a la trayectoria de la humedad del aire, ambas crecen y ambas decrecen en un mismo periodo, pero los picos y los huecos de las trayectorias no coinciden. En este trabajo, se considera que; la humedad influye en la eficiencia, pero de manera indirecta; la humedad influye en la temperatura de la superficie del panel, y esta a su vez influye en la eficiencia.

En la figura 3 (I_{sc}, G) e (I_{sc}, T) , la relación entre la corriente de corto circuito y la irradiancia es muy notoria; coinciden los picos y los huecos de ambas trayectorias.

En la figura 3 la trayectoria de la corriente de corto circuito y la trayectoria de la temperatura ambiente coinciden solo en el periodo de las mediciones de la 40 a la 60. Basado en estas observaciones; si se asume que (I_{sc}) y (G) tienen correlación lineal, entonces $\frac{I_{sc}}{G} = const_1$. Además, (FF) y (A) son constantes $\left(\frac{FF}{A} = const_2\right)$.

Entonces $(\eta) = (V_{oc}) \cdot const_1 \cdot const_2$.

Tabla 10 Resumen de conclusiones referentes a las figuras 2 a 6.

Figura	Variables	Conjetura - Relación	Correlación	
			Grado	Tipo
2a	(η, G)	(η) es inversamente proporcional a (G)	Alta	No lineal
2b	(η, T)	(η) es inversamente proporcional a (T)	Mediana	No lineal
2c	(η, V_w)	(η) y (V_w) ; sin relación de función visible.	Med-Baj	No lineal
2d	(η, \emptyset)	(η) y (\emptyset) ambas bajan, ambas suben; a un mismo tiempo con ritmos diferentes.	Baja	No lineal
2e	(η, I_{sc})	(η) es inversamente proporcional a (I_{sc})	Alta	No lineal
2f	(η, V_{oc})	(η) y (V_{oc}) ; primero proporcionales, en razón directa, hasta el dato 80. Después; (η) crece, mientras (V_{oc}) decrece.	Mediana	No lineal
3a	(I_{sc}, G)	La corriente (I_{sc}) es directamente proporcional a (G) ; coinciden las trayectorias de (G) y (I_{sc}) .	Alta	Lineal
3b	(I_{sc}, T)	Es notorio el impacto de (T) en (I_{sc}) ; ambas trayectorias coinciden en algunos picos y algunos huecos; sobre todo al medio día.	Mediana	No lineal
4a	(V_{oc}, G)	(V_{oc}) y (G) son inversamente proporcionales hasta el dato 80; después ambas decrecen.	Mediana	No lineal
4b	(V_{oc}, T)	(V_{oc}) y (T) son inversamente proporcionales hasta el dato 80; después ambas decrecen.	Med-Baj	No lineal
5a	$(T_a, T_{p1}, T_{p2}, T_{p3})$	(T_a) y (T_{p3}) son directamente proporcionales. Las trayectorias (T_a, T_{p3}) son las que mejor concuerdan entre sí.	Alta	Lineal
5b	$(G, T_{p1}, T_{p2}, T_{p3})$	(G) y (T_{p3}) son directamente proporcionales. La trayectoria (T_{p3}) es la que mejor describe a la temperatura del panel.	Alta	Débil No lineal
6a	$(V_w, T_{p1}, T_{p2}, T_{p3})$	El viento (V_w) disminuye a (T_{panel}) . Pero su impacto en la trayectoria de (T_{p3}) es poco. Esto se debe a que $(V_w) < 3.2 \left(\frac{m}{s}\right)$, ver tabla 5.	Baja	Lineal
6b	$(\emptyset, T_{p1}, T_{p2}, T_{p3})$	(\emptyset) y (T_{p3}) son inversamente proporcionales, pero carecen de una relación de función visible a partir de sus trayectorias; los huecos y los picos no coinciden.	Baja	Débil No lineal

Fuente: elaboración propia.

En la figura 4 (V_{oc}, G) y (V_{oc}, T) , la relación del voltaje de circuito abierto con la irradiancia y la temperatura $V_{oc} = f(G, T)$ es no lineal; $(V_{oc} \text{ con } G)$ y $(V_{oc} \text{ con } T)$ son inversamente proporcionales hasta el dato 80; después todos (V_{oc}, G, T) decrecen.

En la figura 5 $(T_a \text{ y } G)$ con (T_{p1}, T_{p2}, T_{p3}) , el modelo de (T_{p3}) es el que mejor describe a la temperatura del panel; los picos y huecos coinciden con los de (T_a) .

En la figura 6 $(V_w \text{ y } \emptyset)$ con (T_{p1}, T_{p2}, T_{p3}) , la velocidad del viento tarda en verse reflejada y lo que influye de (V_w) es su promedio diario e influye desplazando la trayectoria completa de la temperatura del panel hacia arriba o hacia abajo. También, la humedad del aire y la temperatura del panel carecen de una relación de función visible en sus trayectorias; los huecos y los picos están en desacuerdo.

5. Conclusiones

Se estudiaron las variables del medio ambiente que influyen en la eficiencia (η) del panel fotovoltaico, a saber; la irradiancia, la temperatura ambiente, la velocidad del viento, y la humedad del aire (G, T_a, V_w, \emptyset). También se estudió la temperatura de la superficie del panel fotovoltaico (T_{panel}) en función de las variables climáticas, a saber; la irradiancia, la temperatura ambiente, la velocidad del viento, y la humedad relativa del aire (G, T_a, V_w, \emptyset). Además, se estudiaron las relaciones de la irradiancia (G) con el voltaje en circuito abierto, y la corriente de corto circuito (V_{oc}, I_{sc}). En la tabla 10 se presenta un resumen de las conclusiones:

- **Relación $\eta = f(G, T_a, V_w, \emptyset)$.** La eficiencia depende principalmente de la irradiancia y la temperatura ambiente, y esa relación es no lineal. La velocidad del aire y la humedad relativa del aire tiene un impacto menor en la eficiencia.
- **Relación $I_{sc} = f(G, T_a)$.** La irradiancia impacta directamente en la corriente de corto circuito en forma lineal. La temperatura ambiente también impacta en (I_{sc}), sobre todo a medio día, pero el impacto es menor y en forma no lineal.
- **Relación $n = f(V_{oc}, I_{sc}, G, FF, A, T_{panel})$.** Las figuras de (I_{sc}) y (G) tienen forma similar; los picos y los huecos coinciden; esto induce a pensar que la división entre estas variables es constante ($\frac{I_{sc}}{G} = const_1$). También, (FF) y (A) son constantes, por tanto ($\frac{FF}{A} = const_2$). Entonces (η) = (V_{oc}) \cdot $const_1 \cdot const_2$. En estas condiciones el problema del modelado de la relación $n = f(V_{oc}, I_{sc}, G, FF, A, T_{panel})$ se reduce a encontrar el modelo de $V_{oc} = f(G, T_{panel})$, el cual es no lineal.
- **Relación $V_{oc} = f(G, T_a)$.** La irradiancia y la temperatura ambiente impactan en el voltaje de circuito abierto de forma no lineal. De estos dos la irradiancia tiene mayor impacto.
- **Eficiencia del panel fotovoltaico.** La eficiencia depende de dos factores, a saber; la irradiancia y la temperatura de la superficie del panel fotovoltaico. El modelo que mejor representa a la temperatura de la superficie del panel

fotovoltaico es $T_{p3} = f(G, T_a, V_w, \emptyset)$. En consecuencia, para estudios futuros, el problema del modelado de la relación $\eta = f(G, T_a, V_w, \emptyset)$ resulta interesante presentarlo mejor en la forma $n = f(G, T_{p3})$.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Durganjali, C. S., Sudha, R. PV Cell Performance with Varying Temperature Levels. Global Conference for Advancement in Technology (GCAT), Bangalore, India, pp. 1-5, October 2019.
- [2] Kalaiselvan, S., Karthikeyan, V., Rajesh, G., Kumaran, A. S., Ramkiran, B., Neelamegam, P. Solar PV Active and Passive Cooling Technologies - A Review. International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC), Chennai, India, pp. 166-169, March 2018.
- [3] Oliveira-Santos, L., Marques de Carvalho, P. C., Oliveira-Carvalho-Filho, C. Photovoltaic Cell Operating Temperature Models: A Review of Correlations and Parameters, IEEE Journal of Photovoltaics, Vol. 12, No. 1, pp.179-190, January 2022.
- [4] Ross, R. G. Interface design considerations for terrestrial solar cell modules, IEEE Photovoltaic specialists conference, Baton Rouge, Louisiana pp. 801 – 806, 1976.
- [5] Saad, P. S. M., Kasbudi, M. Y. B., Hashim, H. I-V and P-V Solar Cell Characteristics Simulation for a Single Diode Photovoltaic. IEEE International Conference in Power Engineering Application (ICPEA), Shah Alam, Malaysia, 07-08 March 2022.
- [6] Servant, J. M. Calculation of the cell temperature for photovoltaic modules from climatic data, Congress of the International Solar Energy Society, pp. 1640-1643, 1986.
- [7] Sohani, A., Sayyaadi, H. Employing genetic programming to find the best correlation to predict temperature of solar photovoltaic panels. Energy Conversion and Management, vol. 224, 15 November 2020, 113291.

- [8] Suresh, V., Kirubakaran, V. CCH (combined cooling and humidifying) - Viable technology option for increasing efficiency of solar PV system, Power and energy systems: towards sustainable energy, Bangalore, India, pp. 1-4, march, 2014.
- [9] Zaini N. H., Kadir, A. M. Z., Izadi, M., Ahmad, N. I., Radzi, M. A. M., Azis, N. The effect of temperature on a mono-crystalline solar PV panel. IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON). Johor Bahru, Malaysia, pp. 249-253, October 2015.