

ESTUDIO DE UN PANEL SOLAR EN FUNCIÓN DE LAS CONDICIONES MEDIO AMBIENTALES DE LA CIUDAD DE TUXTLA GUTIÉRREZ

*STUDY OF A SOLAR PANEL BASED ON THE ENVIRONMENTAL
CONDITIONS OF THE CITY OF TUXTLA GUTIERREZ*

Rubén Herrera Galicia

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

Avisaí Sánchez Alegría

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

Karlos Velázquez Moreno

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

Perla Judith Vázquez González

Tecnológico Nacional de México / IT de Tuxtla Gutiérrez, México
L17270901@tuxtla.tecnm.mx

José Leonardo Jiménez Pérez

Tecnológico Nacional de México / IT de Tuxtla Gutiérrez, México
L19270830@tuxtla.tecnm.mx

Recepción: 23/noviembre/2022

Aceptación: 8/abril/2023

Resumen

Los factores del medio ambiente determinan la producción de energía eléctrica con paneles solares y su característica es que no se pueden controlar. En el presente trabajo se busca estudiar la temperatura del panel en función de la radiación solar y la velocidad del viento. También se busca estudiar la influencia que tienen, en la eficiencia del panel solar; la temperatura, la radiación solar, la velocidad del viento, y la humedad del aire. Para el desarrollo del trabajo se considera la descarga de datos ambientales de una base de datos y también se hacen mediciones en el lugar estudiado. Los resultados corroboran que el viento ocasiona la reducción de la temperatura del panel y que al aumentar la radiación solar

umenta constantemente la corriente de corto circuito. El estudio permite determinar el potencial con que cuenta la región y la evaluación de la viabilidad de proyectos con energía solar.

Palabras Clave: Eficiencia, irradiancia, panel solar.

Abstract

Environmental factors determine the production of electrical energy with solar panels and their characteristic is that they cannot be controlled. In this paper we seek to study the temperature of the panel as a function of solar radiation and wind speed. It is also sought to study the influence they have on the efficiency of the solar panel; temperature, solar radiation, wind speed, and air humidity. For developing this paper, the download of environmental data from a database is considered and measurements are made at the location being studied as well. The results provide proof that the wind causes the reduction of the panel temperature and that when solar radiation increases, the short-circuit current constantly increases. This study allows determining this region's potential as well as evaluating the feasibility of solar energy-related projects.

Keywords: Efficiency, irradiance, solar panel.

1. Introducción

La energía solar ha sido identificada como una solución viable hacia la reducción de emisiones de carbono originada por la quema de combustibles fósiles. Contar con soluciones energéticas sostenibles sin carbono es esencial para detener el cambio climático y prevenir mayores daños al medio ambiente. Lo anterior confirma la importancia del estudio de las propiedades de las celdas solares y sus parámetros característicos, tales como la confiabilidad y la eficiencia fotovoltaica.

Las celdas fotovoltaicas sometidas a condiciones climáticas, diferentes a las que fueron diseñadas, se ven afectadas en su vida útil y en el precio de cada *kWh*, en función de su costo de mantenimiento y de la cantidad de energía producida. La eficiencia de un panel solar fotovoltaico depende de la temperatura de las celdas. Dicha temperatura está en función de la temperatura ambiente, los niveles de luz

solar, la velocidad del viento, y la humedad relativa del ambiente. Los paneles solares fotovoltaicos están diseñados para trabajar bajo condiciones específicas de prueba estándar. Pero el clima es variable y las condiciones de prueba estándar no coinciden con las condiciones que experimentan la mayoría de los paneles al aire libre.

La temperatura óptima de funcionamiento de los paneles solares se sitúa entre 20 y 25 °C. Según los fabricantes, a 40 °C la eficiencia se sitúa en torno a 80% de la eficiencia máxima. Bajo condiciones de prueba estándar, Irradiancia $1000 W/m^2$, y temperatura del módulo 25 °C, la eficiencia de un panel solar fotovoltaico disminuye aproximadamente entre 0.4 y 0.5%, por cada grado que aumenta la temperatura. En verano, el efecto de reducción de la eficiencia, producido por el calor, se ve compensado por el aumento de horas solares.

El punto máximo de eficiencia de un panel solar es cuando el ambiente está templado, incluso si está nublado. Al contrario de lo que se piensa, las placas solares producen electricidad en los días nublados. Las nubes afectan a la radiación de tres maneras: reflejan, absorben y difuminan. Pero no impiden que la radiación alcance al panel fotovoltaico. Por lo tanto, en los días de mayor nubosidad, la eficiencia puede estar entre 10 y 15%.

En la literatura diferentes autores recomiendan el uso de fórmulas para determinar la eficiencia de un panel fotovoltaico, en función de la ubicación y las condiciones ambientales.

Es importante comprender la respuesta de los paneles solares fotovoltaicos, trabajando en condiciones atmosféricas variables. Es un reto diseñar sistemas con panel solar y mejorar la eficiencia de estos, a pesar de que trabajen bajo condiciones no óptimas.

En [Segbefia, 2021] se mostró que la presencia de humedad, dentro y fuera del módulo fotovoltaico, acompañada de altas temperaturas y radiación UV, ocasiona, decoloración del encapsulado, y corrosión de los metales. También se mostró que la humedad origina pérdidas de rendimiento, por corrientes parásitas, que llegan a reducir la potencia hasta en 30%. Las corrientes parásitas son un resultado de la llamada degradación inducida por potencial.

En [Njok, 2019] el voltaje de salida de un panel fotovoltaico se mantiene estable cuando la humedad relativa tiene un valor entre 65 y 75%, a una temperatura entre 33 y 43 °C. También, los autores [Njok, 2019] demuestran la existencia de una correlación negativa entre la corriente, la eficiencia y la humedad relativa, e indican que una humedad relativa alta afecta adversamente al rendimiento del panel fotovoltaico. Además, obtuvieron que el incremento de la temperatura aumenta la corriente y la eficiencia, solo hasta alcanzar la máxima temperatura de operación del panel [Njok, 2019].

En [Chen,2019] y [Hachicha, 2019] encontraron que las características eléctricas de los módulos fotovoltaicos son influenciadas por el polvo. Los autores demostraron que en presencia de polvo, especialmente con polvo de alta densidad, la corriente de cortocircuito, el voltaje de circuito abierto y la potencia de salida, se reducen. En [Chen,2019] se concluye que el incremento del ángulo de inclinación promueve, debido a la gravedad, la eliminación del polvo.

En los paneles analizados en [Coftas, 2018], de silicio mono cristalino (mSi), silicio amorfo (aSi), y de unión múltiple (InGaP/InGaAs/Ge), se resalta el hecho de que la temperatura influye en la eficiencia del panel fotovoltaico. La potencia máxima decrece un valor entre 0.14 y 0.47% cuando la temperatura se incrementa en 1 °C. También, se encontró que los coeficientes de temperatura son dependientes del nivel de irradiancia.

La relación obtenida en [Ogbulezie, 2020] muestra que la eficiencia mejora a medida que aumenta la temperatura del panel, hasta llegar a la temperatura máxima de operación de la celda. Más allá de esta temperatura, la eficiencia disminuye a medida que aumenta la temperatura.

Chaichan y Kazem [Natarajan, 2011] analizaron la influencia de la intensidad solar en módulos fotovoltaicos en condiciones de clima húmedo caluroso y concluyeron que el efecto del viento sobre la temperatura de los módulos era insignificante. En [El-Shaer, 2014] estudiaron la influencia de la temperatura en los valores de los parámetros de los módulos solares de silicio cristalino y encontraron que los parámetros relacionados a la corriente son los más afectados. Tiwari en [Gaur, 2013] analizó la eficiencia con módulos fotovoltaicos de diferentes tecnologías para

diferentes condiciones climáticas y observó que, en enero y junio, para todas las tecnologías fotovoltaicas utilizadas en la investigación, primero hay una caída en la eficiencia y después aumenta al transcurrir el tiempo de la mañana a la noche. Amelia en [Razak, 2016] mostró que, al incrementar la temperatura de los módulos fotovoltaicos, la eficiencia de estos disminuye. Leow en [Zhe, 2016] reportó que, para una mayor eficiencia, los paneles solares deben funcionar en un ambiente con velocidades del viento considerables.

El impacto de este proyecto se ve reflejado en la caracterización de la producción de energía a través de la tecnología fotovoltaica considerando las condiciones medioambientales de un determinado lugar. Esta producción de energía eléctrica está determinada por los factores del medio ambiente, cuya característica es que no se pueden controlar.

En el trabajo, lo que se busca es estudiar las variables del medio ambiente que influyen en el desempeño del panel solar; la temperatura, la radiación solar, la velocidad del viento, y la humedad.

También se busca estudiar la temperatura del panel solar en función de la temperatura ambiente, la radiación solar y la velocidad del viento. Además, se busca una relación del voltaje en circuito abierto, la corriente de corto circuito, y la eficiencia, en función de la radiación solar.

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 relación entre dichas cantidades se expresa en la ecuación 1.

$$G = \frac{E}{At} \quad (1)$$

Como la energía (E) es el producto de la potencia (P) por el tiempo, $E = Pt$, entonces, la irradiancia (G) está dada por la ecuación 2.

$$G = \frac{P}{A} \quad (2)$$

La potencia (P) se mide en watt (W) y el área (A) en metros cuadrados (m^2), la unidad para la irradiancia está dada por ecuación 3.

$$[G] = \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (3)$$

La eficiencia máxima de una celda solar viene dada por la relación entre la potencia máxima de la celda P_{mp} y la potencia incidente P_{in} , donde P_{in} es el producto de la irradiancia y el área de la celda. En la ecuación 4 se presenta la relación de la eficiencia de la celda en función de los datos del fabricante, tales como máxima potencia (P_{mp}), voltaje de máxima potencia (V_{mp}), corriente de máxima potencia (I_{mp}), voltaje de circuito abierto (V_{oc}), corriente de cortocircuito (I_{sc}), y factor de forma (FF).

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

Celda solar empleada

Módulo Solar Fotovoltaico 85 W 12 VCC Poli36Cel SY-PRO8512. Los datos de la celda solar están en las tablas 1 y 2. Las especificaciones eléctricas se indican para una irradiancia de $1000 W/m^2$ y una temperatura de $25\text{ }^\circ\text{C}$.

Tabla 1 Especificaciones técnicas del Módulo solar PRO8512.

Potencia máxima (P_{mp})	85 W (+/-3%)
Máximo Voltaje (V_{mp})	18.1 Vcc (+/-3%)
Máximo Amperaje (I_{mp})	4.7 A (+/-3%)
Voltaje a circuito abierto (V_{oc})	22.3 Vcc (+/-3%)
Corriente de corto circuito (I_{sc})	5.01 A (+/-3%)
Dimensiones	850X670X30 mm
Peso	6.2 kg
Temperatura ambiente	- 40 a 80 °C
Máximo voltaje del sistema	600 Vcc
Eficiencia	16.26%

Tabla 2 Especificaciones térmicas del panel PRO8512.

Temperatura nominal de la célula operativa	NOCT	°C	45.3 °C +/- 2
Coeficiente de temperatura de	P_{max}	γ	%/°C - 0.42
Coeficiente de temperatura de	V_{oc}	β	%/°C - 0.35

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 del Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. El panel se instaló con dirección al sur geográfico. En el cálculo del ángulo de inclinación (β) se toma en cuenta la estación del año. Las pruebas se hicieron de noviembre a diciembre. En invierno, se toma la latitud y ésta se multiplica por 0.9 y se le suman 29 grados, obteniendo que $\beta = 44.0813$. Se instaló el panel con la inclinación calculada, para que los rayos solares incidan de manera perpendicular al panel, figura 1.



Figura 1 Panel solar PRO8512 instalado.

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 descargadas de bases de datos del medio ambiente y a través de mediciones en el lugar. Se analizaron las fórmulas presentes en el estudio de [Sohani, 2020], y se seleccionaron cuatro ecuaciones de ellas, con el objetivo de presentar aquí el efecto que tienen las variables climáticas en la temperatura del panel. De la página <https://eosweb.larc.nasa.gov/> se descargaron los datos de mediciones referentes a la irradiancia, temperatura, velocidad del viento y la humedad del aire. La información descargada es para las coordenadas de latitud 16.757° y de longitud -93.177° que corresponden a la ubicación del

Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. En la tabla 3 se presentan los datos del 15 de noviembre al 15 de diciembre del 2021. La columna de la radiación solar horizontal diaria corresponde a mediciones que fueron hechas sin excluir algún tipo de cielo, sea este cielo nublado ó cielo despejado. La irradiancia promedio (G) se calculó usando dicha columna.

Tabla 3 Datos de las variables climáticas.

Día	Fecha (2021)	Radiación solar horizontal diaria [kWh/m^2 día]	G promedio [W/m^2]	T_{max} a 2 metros [$^{\circ}C$]	V_{min} a 50 metros [m/s]
1	15-nov	2.65	331.25	22.09	5.26
2	16-nov	3.32	415.00	22.91	4.06
3	17-nov	5.36	670.00	25.59	3.21
4	18-nov	3.80	475.00	24.60	2.30
5	19-nov	3.94	492.50	23.44	4.84
6	20-nov	3.55	443.75	22.20	4.00
7	21-nov	4.17	521.25	24.75	3.75
8	22-nov	3.66	457.50	23.65	4.26
9	23-nov	5.03	628.75	21.88	5.06
10	24-nov	5.72	715.00	23.49	3.61
11	25-nov	5.74	717.50	25.06	1.60
12	26-nov	3.16	395.00	21.90	4.18
13	27-nov	4.98	622.50	23.15	3.73
14	28-nov	3.48	435.00	23.45	3.06
15	29-nov	4.36	545.00	21.45	4.77
16	30-nov	3.52	440.00	23.22	4.27
17	1-dic	4.54	567.50	23.73	3.31
18	2-dic	3.79	473.75	22.84	4.48
19	3-dic	4.81	601.25	24.09	4.17
20	4-dic	4.76	595.00	24.40	3.64
21	5-dic	5.28	660.00	25.96	1.95
22	6-dic	5.53	691.25	26.86	0.33
23	7-dic	4.20	525.00	26.68	1.62
24	8-dic	5.26	657.50	27.22	0.52
25	9-dic	4.67	583.75	27.35	0.48
26	10-dic	5.43	678.75	26.30	0.81
27	11-dic	5.38	672.50	26.82	2.07
28	12-dic	4.96	620.00	24.02	3.38
29	13-dic	4.59	573.75	23.92	4.20
30	14-dic	4.26	532.50	23.31	4.73
31	15-dic	4.23	528.75	23.51	4.29

Radiación solar horizontal diaria

En la figura 2 se presenta la gráfica de la radiación solar horizontal diaria de la tabla 3, del período del 15 de noviembre al 15 de diciembre del 2021. El promedio de la radiación solar diaria, para el periodo analizado, es $4.5 kWh/m^2$ día.

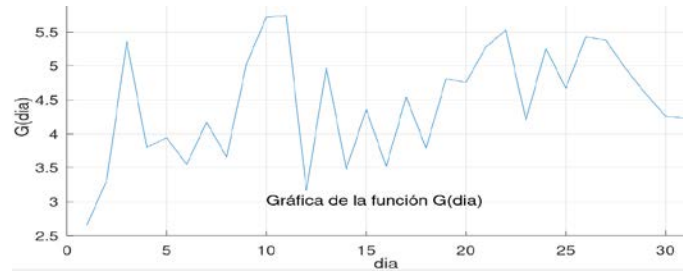


Figura 2 Radiación solar diaria del 15 de noviembre al 15 de diciembre del 2021.

Temperatura máxima diaria

En la figura 3 se presenta la gráfica de la temperatura máxima diaria. Para los primeros veinte días el promedio de la temperatura máxima es 23.5 °C. Para los últimos diez días el promedio es 25 °C. En la figura 4 se presenta la gráfica de la velocidad mínima del viento a una altura de 50 metros. El 70% de las mediciones está en el rango de 3 – 5 m/s. El 30% restante está por debajo de 3 m/s.

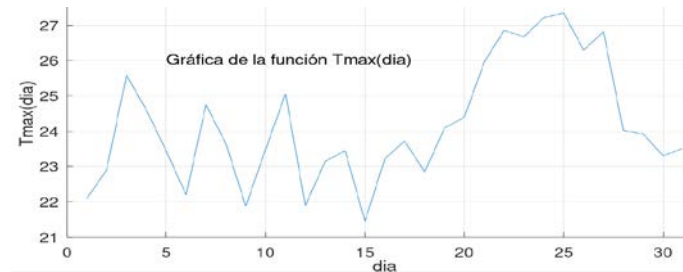


Figura 3 Temperatura máxima diaria del 15 de noviembre al 15 de diciembre del 2021.

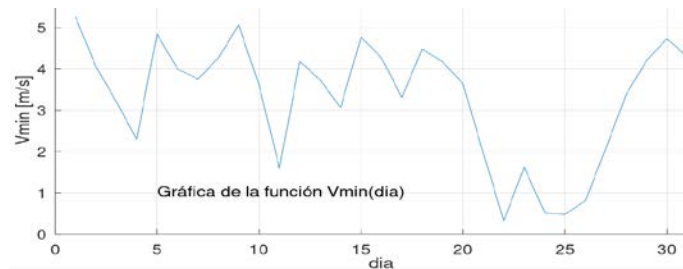


Figura 4 Velocidad del viento mínima diaria, 15 de noviembre a 15 de diciembre del 2021.

Temperatura de operación del módulo fotovoltaico

Servant en el estudio “Calculation of the cell temperature for photovoltaic modules from climatic data”, en 1986, presentó un modelo para la temperatura del módulo

fotovoltaico T_{panel} . En el trabajo se asumió que la T_{panel} depende linealmente de: la irradiancia solar, la temperatura ambiente y la velocidad del viento. Se usó el método de mínimos cuadrados en mediciones y se calculó la T_{panel} con la ecuación 5.

$$T_{panel} = T_{amb} + 0.116G(1 + 0.03T_{amb})(1 - 0.085V_w) \quad (5)$$

Ross en el trabajo titulado "Interface design considerations for terrestrial solar cell modules", en 1976, para la variable T_{panel} presenta la ecuación 6.

$$T_{panel} = T_{amb} + 0.024G \quad (6)$$

Por otra parte, King en el trabajo titulado "Photovoltaic Module and Array Performance Characterization Methods for All System Operating Conditions" proporciona un modelo para predecir la eficiencia de un arreglo de módulos en diferentes condiciones operativas. En el mismo trabajo King analiza la influencia de la radiación solar, la temperatura ambiente, el espectro solar, el ángulo de incidencia solar y los coeficientes de temperatura. Para el cálculo de la variable T_{panel} King presenta la ecuación 7.

$$T_{panel} = T_{amb} + \frac{G}{G_{ref}} (0.01712 * V_w * V_w - 2041 V_w + 32.96) \quad (7)$$

Temperatura Nominal de la Celda en Operación NOCT

Es la temperatura de una celda fotovoltaica, cuando el módulo se expone a una irradiancia de $800 W/m^2$, una masa de aire de 1.5, una temperatura ambiente de $20^\circ C$ y una velocidad del viento de $1 m/s$. Para el módulo aquí usado NOCT tiene un valor de $45.3^\circ C$. El uso del parámetro NOCT permite el cálculo de la variable T_{panel} mediante la ecuación 8.

$$T_{panel}NOCT = T_{amb} + \frac{G}{G_{ref}} (T_{noct} - T_{ref}) \quad (8)$$

Se usaron las ecuaciones 5 a 8, para calcular la temperatura del panel T_{panel} , tabla 4. También se hizo una representación gráfica de los datos, figura 5. La mayor diferencia de los modelos para T_{panel} se presenta entre las ecuaciones 8 (King) y 9 (NOCT).

Tabla 4 T_{panel} , de las ecuaciones 5 a 8.

Día	Fecha (2021)	$T_{amb\ max}$ a 2 m [°C]	V_{min} a 50 m [m/s]	T_{panel} (5) Servant [°C]	T_{panel} (6) Ross [°C]	T_{panel} (7) King [°C]	T_{panel} (8) NOCT [°C]
1	15-nov	22.09	5.26	26.962	30.040	28.964	28.814
2	16-nov	22.91	4.06	30.247	32.870	32.643	31.334
3	17-nov	25.59	3.21	39.369	41.670	42.606	39.191
4	18-nov	24.60	2.30	35.226	36	37.665	34.242
5	19-nov	23.44	4.84	31.340	35.260	34.123	33.438
6	20-nov	22.20	4.00	30.007	32.850	32.668	31.208
7	21-nov	24.75	3.75	34.650	37.260	37.343	35.331
8	22-nov	23.65	4.26	31.632	34.630	34.172	32.937
9	23-nov	21.88	5.06	31.376	36.970	35.209	34.644
10	24-nov	23.49	3.61	37.008	40.650	40.993	38.004
11	25-nov	25.06	1.60	42.436	42.280	45.972	39.625
12	26-nov	21.90	4.18	28.651	31.380	31.057	29.918
13	27-nov	23.15	3.73	34.676	38.090	38.218	35.787
14	28-nov	23.45	3.06	32.223	33.890	34.648	32.280
15	29-nov	21.45	4.77	29.971	34.530	33.358	32.514
16	30-nov	23.22	4.27	30.829	33.780	33.330	32.152
17	1-dic	23.73	3.31	34.901	37.350	38.012	35.250
18	2-dic	22.84	4.48	30.750	34.210	33.500	32.457
19	3-dic	24.09	4.17	34.788	38.520	38.041	36.295
20	4-dic	24.40	3.64	35.787	38.680	38.924	36.478
21	5-dic	25.96	1.95	41.631	41.800	44.654	39.358
22	6-dic	26.86	0.33	46.272	43.450	49.095	40.892
23	7-dic	26.68	1.62	39.721	39.280	41.957	37.337
24	8-dic	27.22	0.52	45.486	43	48.070	40.567
25	9-dic	27.35	0.48	43.660	41.360	45.917	39.200
26	10-dic	26.30	0.81	44.391	42.590	47.354	40.079
27	11-dic	26.82	2.07	42.821	42.960	45.679	40.472
28	12-dic	24.02	3.38	36.185	38.900	39.524	36.606
29	13-dic	23.92	4.20	34.059	37.690	37.194	35.567
30	14-dic	23.31	4.73	31.967	36.090	34.993	34.120
31	15-dic	23.51	4.29	32.676	36.200	35.635	34.244

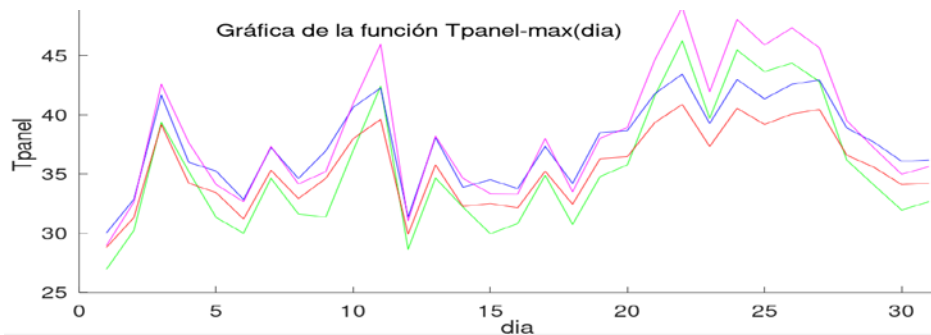


Figura 5 --- Servant, --- Ross, --- King, --- NOCT, T_{panel} [°C].

Las ecuaciones 5 a 8 representan a la temperatura del panel T_{panel} en función de la irradiancia, la temperatura ambiente y la velocidad del viento. En la figura 6 se presenta la gráfica de la temperatura del panel; en función de la irradiancia; para cada una de las ecuaciones. Los valores de las variables usados en los cálculos se presentan en la tabla 5. Los cuatro modelos muestran que la temperatura del panel crece al aumentar la irradiancia. Las ecuaciones de Servant y Ross dan los mismos valores.

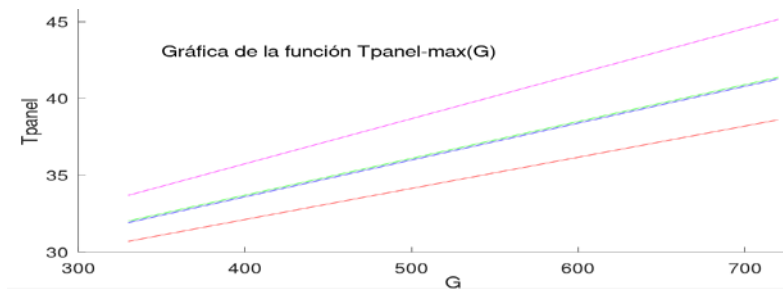


Figura 6 --- Servant, --- Ross, --- King, --- NOCT, $T_{amb} = 24^{\circ}C$, $V_W = 1.5 m/s$.

En la figura 7 se presenta la temperatura del panel en función de la temperatura ambiente. Tres de los modelos, Ross King NOCT, muestran el mismo ángulo de inclinación, lo cual significa la misma tasa de crecimiento. Por otra parte, Servant y Ross tienen diferente ángulo de inclinación, pero tienen valores más cercanos entre ellos que con los otros modelos.

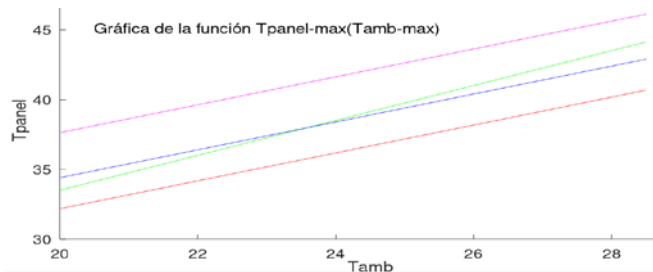


Figura 7 --- Servant, --- Ross, --- King, --- NOCT, $G = 600$, $V_W = 1.5 m/s$.

En la figura 8 se presenta la temperatura del panel en función de la velocidad del viento. Los modelos Servant y King muestran el mismo ángulo de inclinación. Esto significa que las temperaturas que proporcionan los modelos tienen una misma tasa

de decremento y el viento ocasiona una reducción de la temperatura del panel. Los modelos Ross y NOCT no incorporan la influencia del viento, por tanto las temperaturas son constantes en función del viento. También el valor de la temperatura del panel descrito con Ross es mayor al valor calculado con NOCT. Esta característica se observa en las figuras 8 y 5.

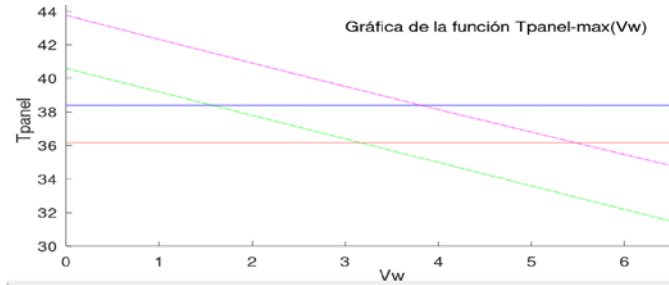


Figura 8 --- Servant, --- Ross, --- King, --- NOCT, $G = 600$, $T_{amb} = 24^{\circ}C$.

Se midió el voltaje en circuito abierto V_{oc} en función de la irradiancia (G). Las mediciones se tomaron de 11:00 a 14:00, del día 30 de mayo al 3 de julio del 2022. En las gráficas el voltaje V_{oc} va desde 19 V, para $225 W/m^2$, hasta 21.5 V, para $1130 W/m^2$. En la figura 9 se presenta la gráfica del día jueves 9 de junio. En dicha gráfica se observa que al aumentar la irradiancia aumenta el voltaje V_{oc} logrando un valor máximo igual a 20.6 V que cae en el rango de 963 a 986 W/m^2 . Después del valor máximo, el voltaje V_{oc} decrece y la magnitud del decremento es igual a 0.6 V.

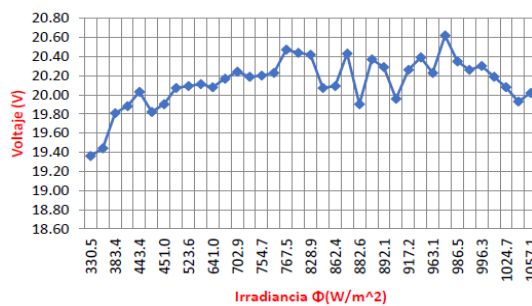


Figura 9 Voltaje V_{oc} en función de la irradiancia, jueves 09/06/2022.

Se midió la corriente en corto circuito I_{sc} en función de la irradiancia (G). Las mediciones se tomaron de 11:00 a 14:00, del 30 de mayo al 3 de julio del 2022. La

corriente I_{sc} va desde 1 [A], para $225 W/m^2$, hasta 5 [A], para $1250 W/m^2$. En la figura 10 se presenta la gráfica del jueves 9 de junio. En dicha figura se observa que al aumentar la irradiancia (G) la corriente I_{sc} crece constantemente. Los valores de la irradiancia (G) van de 330 a $1057 W/m^2$.

Tabla 5 Valores de las variables usados en las figuras de 6, 7 y 8.

Figura	G [W/m^2]	T_{amb} [$^{\circ}C$]	V_w [m/s]	Función
6	330 - 720	24	1.5	T_{panel} Vs Irradiancia
7	600	21 - 28	1.5	T_{panel} Vs T_{amb}
8	600	24	0 - 6	T_{panel} Vs V_w

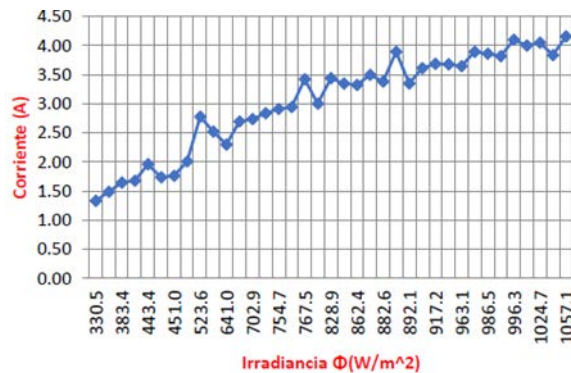


Figura 10 Corriente en corto circuito I_{sc} vs irradiancia, jueves 09/06/2022.

Se calculó la eficiencia del panel fotovoltaico en función de la irradiancia (G). En los cálculos se usaron las mediciones tomadas de 11:00 a 14:00 horas, del día 30 de mayo al 3 de julio del 2022. Los resultados de las mediciones de la eficiencia del panel fotovoltaico están entre 10 y 11%, para valores de la irradiancia (G) que van de 225 a $1250 W/m^2$. La figura 11 presenta la gráfica del 9 de junio. En dicha figura se observa que los valores de la eficiencia se concentran entre 10 y 11%. Se observan picos con valores abajo de 10% o valores cercanos a 14 y 12%. Estos valores extremos son ocasionados por el factor del error humano durante el proceso de medición del voltaje en circuito abierto V_{oc} y la corriente en corto circuito I_{sc} . Las gráficas de la eficiencia obtenidas a partir de las mediciones, del día 30 de mayo al 3 de julio del 2022, carecen de una tendencia clara en su variación. Sin embargo, para las mediciones del sábado 11 de junio, cuando el valor de la irradiancia (G)

fue desde 884 a 1127 W/m^2 , se presentó un decremento de la eficiencia igual a 0.8%. Se requiere hacer mediciones con mayor precisión para corroborar que al aumentar la irradiancia, la eficiencia decrece.

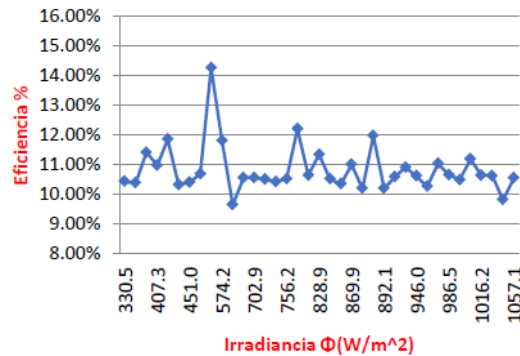


Figura 11 Eficiencia en función de la irradiancia, jueves 09/06/2022.

4. Discusión

La inclinación óptima para el panel, vinculada a la latitud de Tuxtla Gutiérrez y la época de invierno, es 44° . Para el período del 15 de noviembre al 15 de diciembre del 2021, según los datos de <https://eosweb.larc.nasa.gov/>, el promedio de la radiación solar diaria fue $4.5 kWh/m^2 d$.

Para el período del 15 de noviembre al 15 de diciembre del 2021, según los datos de <https://eosweb.larc.nasa.gov/>, el promedio de la temperatura máxima diaria es $23.5^\circ C$ para los primeros veinte días, y $25^\circ C$ para los últimos diez. Para el mismo periodo, la velocidad mínima del viento, a una altura de 50 metros, el 70% de las mediciones está en el rango de $3 - 5 m/s$, y el 30% restante es menor a $3 m/s$.

Se usaron las ecuaciones 5 (Servant), 6 (Ross), 7 (King), y 8 (NOCT) para calcular a la temperatura del panel T_{panel} en función de la irradiancia (G), la temperatura ambiente y la velocidad del viento. Los cuatro modelos mencionados muestran que la temperatura del panel crece al aumentar la irradiancia. Además, los modelos Servant y Ross dan los mismos valores de la temperatura del panel T_{panel} .

En la figura 7 se presentó la temperatura del panel en función de la temperatura ambiente. En esa figura tres de los modelos, Ross King NOCT, muestran el mismo ángulo de inclinación, la misma tasa de crecimiento. Además, dos modelos, Servant

y Ross, tienen diferente ángulo de inclinación, pero tienen valores más cercanos entre ellos que con los otros.

En la figura 8 se presentó la temperatura del panel en función de la velocidad del viento. Se mostró que el viento ocasiona que la temperatura del panel se reduzca. Dos modelos, Servant y King, muestran el mismo ángulo de inclinación, la misma tasa de decremento. Dos modelos, Ross y NOCT, no incorporan la influencia del viento en su ecuación, por tanto, son constantes. Sin embargo, el valor de la temperatura del panel proporcionado por el modelo de Ross es mayor al proporcionado por NOCT. Eso mismo se observó en la figura 5, el valor de la temperatura del panel de Ross es mayor que el calculado con NOCT.

Las mediciones, V_{oc} , I_{sc} , G , se hicieron de 11:00 a 14:00 del 30 de mayo al 3 de julio del 2022. En las figuras se identificó que el voltaje en circuito abierto V_{oc} va de 19 hasta 21.5 V, en el mismo momento que G va desde 225 hasta 1130 W/m^2 . También se observó que al aumentar la irradiancia G aumenta el voltaje V_{oc} y cuando G está entre 1000 y 1150 W/m^2 V_{oc} llega a un valor máximo. Después del valor máximo, el voltaje V_{oc} decrece y la magnitud del decremento es de 0.6 V.

En las gráficas se identificó que la corriente en corto circuito I_{sc} va desde 1 a 5 A, cuando G va desde 225 a 1250 W/m^2 . También, se observó que al crecer G , desde 225 a 1286 W/m^2 , la corriente I_{sc} crece de manera constante. Además, también se observó que los valores de la eficiencia se encuentran entre 10 y 11%, cuando los valores de la irradiancia van desde 225 a 1250 W/m^2 . Además, se carece de una tendencia clara de la variación de la eficiencia. Solo la gráfica del día 11 de junio muestra un decremento de la eficiencia igual a 0.8%, al mismo tiempo que la irradiancia va desde 884 a 1127 W/m^2 . Se considera que es necesario usar un instrumento con mayor precisión para corroborar dicho comportamiento.

5. Conclusiones

Se estudió el comportamiento de las variables del medio ambiente que influyen en la eficiencia del panel solar considerando las condiciones ambientales de Tuxtla Gutiérrez. Para el estudio se analizaron los datos de las variables climáticas alojados en el sitio <https://eosweb.larc.nasa.gov/>:

- **Temperatura del panel.** Se analizó la temperatura del panel fotovoltaico en función de la temperatura ambiente, la radiación solar y la velocidad del viento. Para el análisis se usaron los datos alojados en el sitio <https://eosweb.larc.nasa.gov/>. En base al análisis se corroboró que la temperatura del panel crece al aumentar la irradiancia y que la temperatura del panel decrece al aumentar la velocidad del viento.
- **Voltaje en circuito abierto.** Las mediciones se tomaron de 11:00 a 14:00 del 30 de mayo al 3 de julio del 2022. El voltaje en circuito abierto V_{oc} va desde 19 a 21.5 V, al mismo tiempo que G va desde 225 a 1130 W/m^2 . Al aumentar la irradiancia, aumenta el voltaje V_{oc} hasta un valor máximo en el rango de 1000 a 1150 W/m^2 . Después de llegar al valor máximo, el voltaje V_{oc} decrece 0.6 V.
- **Corriente de corto circuito.** Al aumentar la irradiancia G , la corriente de corto circuito I_{sc} aumenta y crece constantemente para valores de G que van de 225 a 1286 W/m^2 .
- **Eficiencia del panel.** La eficiencia del panel fotovoltaico toma valores entre 10 y 11%, cuando la irradiancia va de 225 a 1250 W/m^2 . Se carece de una tendencia clara de la variación de la eficiencia. Solo la gráfica de las mediciones del sábado 11 de junio muestra un decremento de la eficiencia de 0.8%, cuando los valores de la irradiancia van desde 884 a 1127 W/m^2 . Como trabajo futuro se tiene contemplado usar técnicas de medición e instrumentos más precisos y exactos para corroborar dicho comportamiento.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Chen, Y., Liu, Y., Tian, Z., Dong, Y., Zhou, Y., Wang, X., Wang, D. Experimental Study on the Effect of Dust Deposition on Photovoltaic Panels. *Energy Procedia*, vol. 158, pp. 483-489, 2019.
- [2] Coftas, D. T., Coftas, P. A., Machidon, O. M. Study of Temperature Coefficients for Parameters of Photovoltaic Cells. *International Journal of Photoenergy*, vol. 2018, pp. 1-8, 2018.
- [3] Gaur, A., Tiwari, G. N. Performance of photovoltaic modules of different solar cells. *Journal of Solar Energy*, vol. 2013, pp. 1-13, 2013.

- [4] El-Shaer, A., Tadros, M., Khalifa, M. A. Effect of Light intensity and Temperature on Crystalline Silicon Solar Modules Parameters. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, vol. 4, pp. 311-318, 2014.
- [5] Hachicha, A. A., Al-Sawafta, I., Said, Z. Impact of dust on the performance of solar photovoltaic (PV) systems under United Arab Emirates weather conditions. *Renewable Energy*, vol. 141, pp. 287-297, 2019.
- [6] Natarajan, S. K., Mallick, T. K., Katz, M., Weingaertner, S. Numerical investigations of solar cell temperature for photovoltaic concentrator system with and without passive cooling arrangements. *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 50, No.12, pp. 2514-2521, 2011.
- [7] Njok, A. O., Ogbulezei, J. C. The Effect of Relative Humidity and Temperature on Polycrystalline Solar Panels Installed Close to a River. *Physical Science International Journal*, vol. 20, pp. 1-11, 2019.
- [8] Ogbulezie, J. C., Njok, A. O., Panjwani, M. K., Panjwani, S. K. The impact of high temperature and irradiance source on the efficiency of polycrystalline photovoltaic panel in a controlled environment. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 10, No. 4, pp. 3942-3947, 2020.
- [9] Razak, A., Irwan, Y., Leow, W., Irwanto, M., Safwati, M. Z. I. Investigation of the Effect Temperature on Photovoltaic (PV) Panel Output Performance. *International Journal on Advanced Science Engineering and Information Technology*, vol. 6, No. 5, pp. 682-688, 2016.
- [10] Segbefia, O. K., Imenes A. G., Saetre, T. O. Moisture ingress in photovoltaic modules: A review, *Solar Energy*, vol. 224, p. 889–906, 2021.
- [11] 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, p. 113291, 2020.
- [12] Zhe, L. W., Yusoff, M. I. B., Misrun, M. I., Razak, A. B. A., Ibrahim, S., Zhubir, N. S. B. Investigation of Solar Panel Performance Based on Different Wind Velocity Using ANSYS Software. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 1, No. 3, 2016.