

ESTUDIO DE LA CORRELACIÓN ENTRE PARAMETROS DE UNA CELDA FOTOVOLTAICA Y LAS VARIABLES AMBIENTALES PARA LA CIUDAD DE TUXTLA GUTIÉRREZ POR EL MÉTODO DE REGRESION LINEAL

STUDY OF THE CORRELATION BETWEEN PARAMETERS OF A PHOTOVOLTAIC CELL AND ENVIRONMENTAL VARIABLES FOR THE CITY OF TUXTLA GUTIERREZ BY THE LINEAR REGRESSION METHOD

Rubén Herrera Galicia

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

Avisai Sánchez Alegría

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

Álvaro Hernández Sol

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

Karina López Vázquez

Tecnológico Nacional de México / IT de Tuxtla Gutiérrez, México
L20270068@tuxtla.tecnm.mx

Juan de Dios Sánchez Moreno

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

Recepción: 24/noviembre/2023

Aceptación: 26/abril/2024

Resumen

En la literatura han planteado el uso de modelos matemáticos, para predecir la eficiencia resaltando la importancia de estudiar a los paneles fotovoltaicos en función de las condiciones atmosféricas. Aquí se establecen ecuaciones de correlación para; la eficiencia, el voltaje en circuito abierto, y la corriente de cortocircuito. Las ecuaciones se establecen en función de la irradiancia, y la temperatura ambiente. Se encontró que la predicción da mejores resultados combinando la ecuación del voltaje en circuito abierto con la ecuación de la corriente

de cortocircuito, en comparación con la ecuación de la eficiencia establecida en correlación directa. Para establecer la correlación se usa el método de regresión lineal múltiple a partir de mediciones en horarios pico. Se demostró que la eficiencia calculada con la ecuación de correlación del voltaje en circuito abierto, en combinación con las mediciones de la corriente de cortocircuito, concuerda muy bien con la eficiencia medida.

Palabras Clave: Eficiencia, Irradiancia, Panel fotovoltaico.

Abstract

In the literature, the use of mathematical models has been proposed to predict efficiency, highlighting the importance of studying photovoltaic panels, depending on atmospheric conditions. Here correlation equations are established for; efficiency, open circuit voltage, and short circuit current. The equations are established as a function of irradiance and ambient temperature. It was found that the prediction gives better results by combining the open circuit voltage equation with the short circuit current equation, compared to the efficiency equation established by direct correlation. To establish the correlation, the multiple linear regression method is used from measurements at peak times. The efficiency calculated from the open-circuit voltage correlation equation, in combination with short-circuit current measurements, was shown to agree very well with the measured efficiency.

Keywords: Efficiency, Irradiance, Photovoltaic panel.

1. Introducción

La energía solar es una solución viable para la reducción de emisiones de carbono originadas por la quema de combustibles fósiles. Aplicar soluciones energéticas sostenibles significa ralentizar el cambio climático y prevenir daños al medio ambiente.

Los paneles fotovoltaicos están diseñados en condiciones de laboratorio, pero estos son sometidos a operar en condiciones climáticas diferentes a las de diseño. En consecuencia, se ven afectados en; su vida útil, el costo de su mantenimiento, la cantidad de energía producida, y el precio por (*kWh*).

En la literatura han planteado el uso de modelos matemáticos, para predecir la eficiencia resaltando la importancia de estudiar la respuesta de los paneles fotovoltaicos, en función de su inclinación y de las condiciones ambientales. Esto con el objeto de mejorar la eficiencia, bajo condiciones específicas de la ubicación del sistema fotovoltaico. Esta problemática conduce a la necesidad del estudio de la eficiencia del panel fotovoltaico, la cual es una función de varias variables; la irradiancia, la temperatura ambiente, la velocidad del viento, la humedad del aire, y el polvo:

- **Irradiancia.** La radiación solar experimenta pérdidas al entrar en la atmósfera: 30% se pierde debido a la reflexión, 19% se pierde por absorción, y 51%, traspasa a la atmósfera y llega a las celdas solares de manera directa o difusa. En una celda fotovoltaica, la incidencia de luz causa la aparición de una corriente fotovoltaica directamente proporcional a la irradiancia.

En [El-Shaer, 2014] se demostró que la corriente de corto circuito crece en forma lineal en función de la irradiancia. En [Njok, 2019] se presentó un modelo para calcular la temperatura del panel. En el modelo usaron coeficientes de temperatura, y encontraron que dichos coeficientes son dependientes del nivel de irradiancia.

- **Temperatura.** En [Njok, 2019] y en [Hachicha, 2019] comunicaron que, cuando la temperatura aumenta, la eficiencia del panel fotovoltaico también aumenta. Pero solo hasta llegar a la temperatura máxima de operación. Más allá de esta temperatura, la eficiencia disminuye a medida que aumenta la temperatura. En [Ogbulezie, 2020] se mostró que, con el incremento de la temperatura, el voltaje de circuito abierto decrece. También, se comunicó que la eficiencia tiene un comportamiento similar al voltaje de circuito abierto. En [El-shaer, 2014] se estudió la influencia de la temperatura sobre los parámetros de los paneles fotovoltaicos de silicio cristalino y encontraron que el voltaje en circuito abierto decrece con el incremento de la temperatura del módulo T_{panel} .
- **Velocidad del viento.** La circulación de aire a velocidades moderadas contribuye al enfriamiento de los paneles fotovoltaicos, manteniendo una

temperatura más baja, que se traduce en un incremento de la eficiencia. La circulación de aire a velocidades altas contribuye al ingreso de polvo y partículas de agua ocasionando disminución de la eficiencia.

En [Kazem, 2015] se analizó, para condiciones de clima húmedo y caluroso, la influencia de la irradiancia en módulos fotovoltaicos y se concluyó que el efecto del viento sobre la temperatura de los módulos era insignificante. En [Razak, 2016] se mostró que, para lograr una mayor eficiencia, los paneles deben funcionar en una atmósfera con una velocidad del viento considerable. En [Zhe, 2016] se presentó un modelo para simular el comportamiento de un panel fotovoltaico a diferentes velocidades del viento: 0, 0.43, 2.5 y 6.95 (m/s). Los resultados de las simulaciones mostraron que la velocidad del viento 6.95 (m/s) ocasiona enfriamiento del panel, y un mejor desempeño.

- **Humedad relativa del aire.** En el estudio [Simsek, 2021] se mostró que la producción de energía por hora, de las celdas fotovoltaicas, disminuye con la formación de rocío. La presencia de las gotas hace que la eficiencia de las celdas fotovoltaicas se reduzca, particularmente para ángulos de incidencia de contacto con las gotas ($\theta_i > 30^\circ$). La reducción de la eficiencia se atribuyó al hecho de que la luz incidente se dispersa a través de las gotas antes de ser absorbida por la celda fotovoltaica.

En [Njok, 2019] se comunicó que el voltaje de salida de un panel fotovoltaico se mantiene estable para una humedad relativa de 65 - 75% y temperatura de 33 - 43 ($^\circ C$). También, se explicó que existe una correlación negativa entre la humedad relativa y la corriente. Además, se mostró que una humedad relativa alta ocasiona disminución de la eficiencia.

- **Eficiencia.** En [Gaur, 2013] se analizaron módulos fotovoltaicos, para diferentes condiciones climáticas, y se observó que, en enero y junio, de 9:00 a 16:00, en el transcurso de la mañana a la noche, para todas las tecnologías fotovoltaicas utilizadas en la investigación, la eficiencia en una primera etapa decrece y después en una segunda etapa crece.

También se observó, a través de gráficas, que; en la primera etapa la caída de la eficiencia coincide con el aumento de la temperatura del panel; en la

segunda etapa el aumento de la eficiencia coincide con la caída de la temperatura del panel. Después de analizar este comportamiento, se concluyó que; la eficiencia es inversamente proporcional a la temperatura del panel.

En [Sohani, 2020] se aplicó un año de datos experimentales de variables climáticas y programación genética para predecir la temperatura del panel fotovoltaico, la eficiencia y la potencia producida. Las variables climáticas usadas en el estudio son: irradiancia, temperatura ambiente, velocidad del viento y la humedad relativa del aire.

- **Correlación.** En el análisis [Yoo, 2018] se concluyó que entre la potencia de generación y la irradiancia existe una correlación de 0.8131 para la planta Koreana Songam. También, se encontró que entre la potencia de generación y la temperatura ambiental existe una correlación de; 0.2843 para la planta Songam; 0.4616 para la planta Koreana Jipyong. Además, para la predicción de la generación, se recomendó usar un modelo que incluya a ambas, irradiancia y temperatura, para obtener una estimación más precisa.

En el presente trabajo el problema es encontrar ecuaciones de correlación para los parámetros del panel fotovoltaico, a saber; la eficiencia, el voltaje en circuito abierto, y la corriente de cortocircuito. Se busca que todas las ecuaciones de correlación se establezcan en relación con las variables irradiancia, y temperatura ambiente. Se busca estudiar la combinación de la ecuación del voltaje en circuito abierto con la ecuación de la corriente de cortocircuito y analizar los resultados en comparación con la ecuación de correlación de la eficiencia establecida de manera directa. Para establecer la correlación se pretende usar el método de regresión lineal múltiple a partir de mediciones en horarios pico. También, se pretende estudiar el comportamiento de la ecuación de correlación del voltaje en circuito abierto, en combinación con los datos de las mediciones de la corriente de cortocircuito, y analizar los resultados.

El impacto de este proyecto se ve reflejado en la posibilidad de contar con una herramienta, que considere las variables ambientales de un lugar determinado, para

caracterizar la producción de energía eléctrica, a través de la tecnología fotovoltaica. Esto permite evaluar la viabilidad y la potencia máxima con que cuenta una región en la producción de energía eléctrica, a partir de energía solar.

2. Métodos

Celda fotovoltaica empleada

El módulo que se instaló es de silicio monocristalino. La marca es SERAPHIM y el modelo instalado es SRP-450-BMA-HV. El panel 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. Se instaló con dirección al sur geográfico e inclinación de 21.6° , para que los rayos solares incidan de manera perpendicular al panel, figura 1.



Fuente: elaboración propia.

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

Eficiencia

Es el resultado de dividir la potencia de salida del panel fotovoltaico (P_{out}) entre la potencia incidente (P_{in}), ecuación 1. La potencia máxima de salida (P_{max}) se puede calcular 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). Estas dos formas se representan en la ecuación 2.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{I_{mp}V_{mp}}{P_{in}} = \frac{I_{sc}V_{oc}FF}{P_{in}} = \frac{I_{sc}V_{oc}FF}{GA} \quad (1)$$

$$\eta = \frac{I_{mp}V_{mp}}{P_{in}} = \frac{I_{sc}V_{oc}FF}{P_{in}} \quad (2)$$

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. La ecuación 2 se despeja y se obtiene la fórmula para calcular el factor de forma (FF), ecuación 3. El cálculo del factor de forma (FF), con los datos del fabricante, da un valor de 0.7868.

$$FF = \frac{I_{mp}V_{mp}}{I_{sc}V_{oc}} \quad (3)$$

Cálculo de la eficiencia

La ecuación 4 es la fórmula usada en este trabajo para calcular la eficiencia. Para aplicar dicha fórmula, se mide 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 $A = 2.173572 \text{ (m}^2\text{)}$ y se usa el valor del factor de forma calculado con la ecuación 3, ($FF = 0.7868$).

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

Método de regresión lineal múltiple

Es una técnica estadística para establecer relaciones de función. Antes de aplicar esta técnica, una serie de condiciones se debe cumplir:

- Las variables independientes no pueden estar altamente correlacionadas entre sí.
- Las relaciones entre las variables independientes y la variable dependiente deben ser lineales.
- Todas las variables deben ser funciones de tipo distribución normal y deben tener varianzas iguales.

La regresión lineal múltiple se basa en obtener una relación lineal entre un conjunto de variables independientes X_1, X_2, \dots, X_n con una variable dependiente Y . El éxito

de determinar una correlación lineal múltiple es que exista una correlación lineal simple de cada variable independiente con la variable dependiente, ecuación 5.

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n \quad (5)$$

Ecuación de regresión lineal múltiple

Para obtener la ecuación de regresión lineal se deben calcular los coeficientes de correlación (β). Para ello se construyen dos matrices; una es la matriz X compuesta por una columna de unos y las columnas de los resultados de las mediciones; una columna por cada variable medida; otra es la matriz Y compuesta por una columna con los resultados de las mediciones de la variable dependiente, ecuación 6.

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{1p} \\ 1 & x_{21} & \dots & x_{2p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{n1} & \dots & x_{np} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \dots \\ \beta_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \dots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

Cuando ya están listas las matrices X e Y , se efectúan las operaciones indicadas en la ecuación 7 para calcular a la matriz de coeficientes (β).

$$Y = X\beta + \varepsilon \rightarrow \beta = (X^tX)^{-1}X^tY \quad (7)$$

En las ecuaciones 6 y 7 se considera que los errores $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$ tienen una distribución normal de media cero y varianza σ^2 , y que son independientes entre sí.

3. Resultados

Caracterización del panel fotovoltaico y del medio ambiente

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 1 se presenta una muestra (12 - 77) 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 ó cielo despejado.

Tabla 1 Datos de las variables climáticas; mediciones 12 – 77.

No.	Hora	V_{oc} (V)	I_{sc} (A)	G (W/m^2)	η (%)	T ($^{\circ}C$)	V_w (m/s)	\emptyset (%)
12	09:55	44.5	7.73	770.3	16.164785	37.5	0	44.10
13	10:00	44.5	8.64	785.9	17.709112	37.2	0.8	44.65
14	10:05	44.4	8.25	814.1	16.287315	38.0	1.6	44.08
15	10:10	44.3	8.28	820.6	16.180535	38.2	1.1	43.66
16	10:15	44.2	8.57	830.8	16.504293	38.7	2	41.37
17	10:20	44.2	8.68	835.9	16.614145	39.5	1.5	42.10
18	10:25	44.2	8.67	895.5	15.490524	39.8	0.4	40.71
19	10:30	44.2	9.38	940.7	15.953805	39.9	1.2	35.33
20	10:35	43.9	9.91	946.7	16.634744	40	2	33.91
21	10:40	43.8	9.19	967.0	15.067926	41.5	0.8	31.64
22	10:45	43.9	9.65	985.6	15.558992	40.8	1	29.59
23	10:50	43.9	9.75	986.8	15.701109	41.7	0.5	31.27
24	10:55	44	9.75	989.8	15.689177	40.9	0.8	36.92
25	11:00	44	9.93	1002.3	15.779546	39.9	1.9	38.55
26	11:05	44	10	1005.9	15.833911	39.7	1.5	36.86
27	11:10	43.9	9.73	1012.3	15.274199	39.9	2	38.10
28	11:15	44.2	10.06	1025.7	15.692431	41.3	1.6	38.49
29	11:20	44	10.45	1065.3	15.623825	41.8	1.3	33.15
30	11:25	44	10.46	1070.6	15.561356	43	1.2	33.73
31	11:30	43.9	10.46	1073.3	15.486932	43.2	0.8	36.22
32	11:35	43.7	10.81	1110.1	15.404065	44.4	0	28.55
33	11:40	43.8	10.92	1125.19	15.387257	44.3	1.5	33.23
34	11:45	43.8	10.72	1127.2	15.078503	43.2	1.4	35.75
35	11:50	43.6	10.85	1129.1	15.166108	42.8	0.8	34.62
36	11:55	43.5	11.05	1147.3	15.165784	46.3	0.8	34.66
37	12:00	43.5	11.30	1167.13	15.245399	43	1	36.26
38	12:05	43.5	11.58	1174.7	15.522482	42.9	1.4	37.3
39	12:10	43.3	11.41	1205.3	14.837772	44	1.1	30.26
40	12:15	43.4	11.66	1194.4	15.33659	43.6	0.8	30.30
41	12:20	43.4	11.52	1188.4	15.228947	41.2	0.8	33.25
42	12:25	43.4	11.47	1181.2	15.255275	39.8	1.1	35.77
43	12:30	43.4	11.34	1150.0	15.9214641	39.4	1.2	32.7
44	12:35	43.4	11.22	1191	14.799981	38.3	1.5	35.24
45	12:40	44	11.09	1142.3	15.463022	38.7	1.6	36.15
46	12:45	43.8	10.81	1113.6	15.39079	34.98	1.5	38.7
47	12:50	43.6	10.57	1073.8	15.535613	35.6	2.4	36.33
48	12:55	43.8	10.58	1072.5	15.640578	39	2.3	34.18
49	13:00	43.7	10.37	1063.6	15.423118	41.15	1.3	30.49
50	13:05	43.8	11.01	1112.8	15.68681	39.5	1.9	35.32
51	13:10	43.8	10.77	1100.5	15.516369	38.8	1.1	36.24
52	13:15	43.9	10.28	1052.5	15.52122	38.4	1.5	36.33
53	13:20	43.7	10.48	1066.2	15.54871	37.6	1.7	36.74
54	13:25	44	10.30	1035.7	15.839674	37.4	1.6	35.43
55	13:30	43.9	10.31	1035.2	15.826659	37.1	1.4	35.65
56	13:35	44	10.29	1033.5	15.857981	37	3	34.74
57	13:40	44	10.26	1029.7	15.870099	36.8	3.1	35.36
58	13:45	43.8	10.28	1018.1	16.009107	37.1	2.7	35.95
59	13:50	43.7	10.19	1014.8	15.884205	37.5	0	35.75
60	13:55	43.6	10.05	999.2	15.874149	37.6	1.5	30.67
61	14:00	43.8	9.89	985.1	15.917703	37.4	2.7	35.5
62	14:05	43.8	9.83	972.5	16.026118	38	1.5	34.75
63	14:10	43.8	9.51	941.2	16.020019	38.4	1.5	36.20
64	14:15	44.1	9.44	924.7	16.296714	38.2	1.5	38.32
65	14:20	44.1	9.32	924.6	16.091293	38.8	2.7	36.45
66	14:25	44.2	9.23	914.5	16.14844	37.9	2.2	37.78
67	14:30	44.3	9.15	893.0	16.430988	38.2	2.3	37.81
68	14:35	44.2	9.03	883.3	16.356565	37.7	1.9	37.78
69	14:40	44.2	8.85	867.5	16.322489	37.4	2.8	38.66
70	14:45	44.2	8.74	842.4	16.599907	37.2	2.1	37.46
71	14:50	44.2	8.67	837.1	16.571215	37.5	3.3	37.05
72	14:55	44.4	8.41	806.2	16.765885	36.2	1	38.22
73	15:00	44.3	8.06	778.1	16.235955	35.2	2.8	36.8
74	15:05	44.4	8.09	754.9	17.223935	35.9	1.7	38.66
75	15:10	44.5	7.78	734.6	17.0599991	36.2	1.7	38.91
76	15:15	44.6	7.60	717.5	17.100817	36.3	2.9	37.76
77	15:20	44.4	7.31	651	18.047194	36.5	1.6	36.72

Fuente: elaboración propia.

Ecuación de regresión lineal múltiple 1

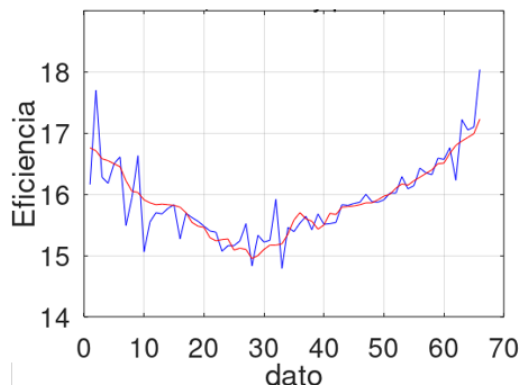
Se escribió un programa en Octave, para determinar los coeficientes de correlación, de la eficiencia como función de la irradiancia y la temperatura ambiente ($\eta = f(G, T)$). En la ecuación 8 están presentados los coeficientes de correlación de la matriz (β), calculados con los datos de la tabla 1. La fórmula de regresión lineal múltiple (ecuación 9), sirve para calcular la predicción de la eficiencia, donde la variable dependiente es la eficiencia (η), y las variables independientes son; la irradiancia (G), y la temperatura ambiente (T).

$$\beta = \begin{bmatrix} 20.79704898640102 \\ -0.003679466781758123 \\ -0.03197734938959229 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\eta(G, T) = \beta_0 + \beta_1 G + \beta_2 T + \varepsilon \quad (9)$$

Gráficas de medición y predicción 1

En la figura 2 se representan las gráficas de la eficiencia con diferente color; (η_{medida}) es la eficiencia calculada con las mediciones de la tabla 1 y la ecuación 4, ver la línea azul; ($\eta_{regresion}$) es la predicción de la eficiencia obtenida con la ecuación 9, ver la línea roja. Las líneas se ponen en una misma figura para su comparación. La línea de la ecuación de la correlación muestra algunos picos y huecos en su trayectoria, pero en general la mayoría de los picos y huecos de la trayectoria de las mediciones no aparecen en la gráfica de la predicción.



Fuente: elaboración propia.

Figura 2 Eficiencia; -- mediciones, -- ecuación de correlación $\eta = f(G, T)$.

Ecuación de regresión lineal múltiple 2

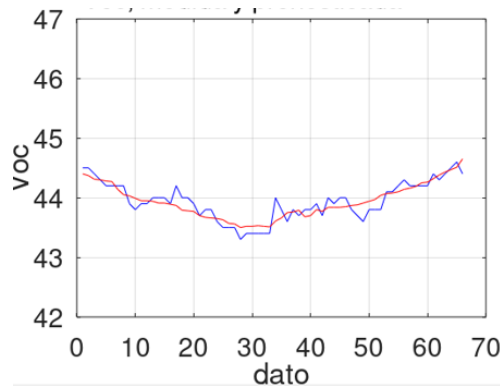
Se escribió un programa en Octave, para determinar los coeficientes de correlación, del voltaje en circuito abierto (V_{oc}) como función de la irradiancia y la temperatura ambiente ($V_{oc} = f(G, T)$). En la ecuación 10 están presentados los coeficientes de correlación de la matriz (β), calculados con los datos de la tabla 1. La fórmula de regresión lineal múltiple, ver la ecuación 11, sirve para calcular la predicción del voltaje en circuito abierto (V_{oc}). En la ecuación 11 la variable dependiente es el voltaje en circuito abierto (V_{oc}) y las variables independientes son; la irradiancia (G), y la temperatura ambiente (T).

$$\beta = \begin{bmatrix} 45.93384144772244 \\ -0.002125438717151873 \\ +0.002911643077652570 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$V_{oc}(G, T) = \beta_0 + \beta_1 G + \beta_2 T + \varepsilon \quad (11)$$

Gráficas de medición y predicción 2

En la figura 3 se representan las gráficas del voltaje en circuito abierto con diferente color; ($V_{oc_{medido}}$) es el voltaje en circuito abierto medido y presentado en la tabla 1, ver la línea azul; ($V_{oc_{regression}}$) es la predicción del voltaje en circuito abierto obtenida con la ecuación 11, ver la línea roja. Las líneas se ponen en una misma figura para su comparación. La línea que representa a la función de predicción ($V_{oc} = f(G, T)$); está libre de picos y huecos; representa correctamente a las mediciones.



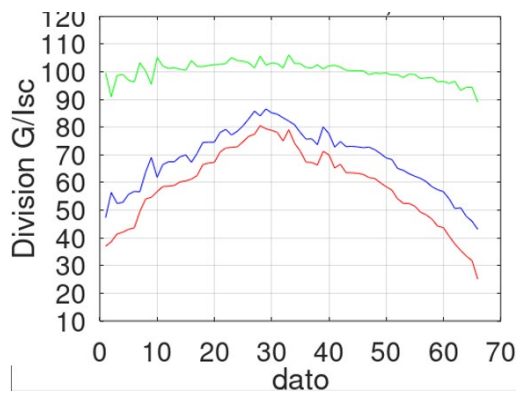
Fuente: elaboración propia.

Figura 3 Voltaje; -- mediciones, -- ecuación de correlación $V_{oc} = f(G, T)$.

En la figura 3 se observa que el proceso de encontrar una función de relación ($V_{oc} = f(G, T)$) por correlación lineal múltiple se comporta como un filtro pasa bajas, que elimina los cambios abruptos en las mediciones. En algunos casos los cambios abruptos en las mediciones son errores ocasionados por el factor humano.

Gráficas de la división; irradiancia/corriente

En la figura 4 se representan las gráficas de la irradiancia y la corriente de cortocircuito con diferente color; (G) es la irradiancia, ver la línea roja; (I_{sc}) es la corriente de cortocircuito, ver la línea azul; (G/I_{sc}) es la división de ambos, ver la línea verde. Las líneas se ponen en una misma figura para su comparación. Los valores de (G) e (I_{sc}) están presentados en la tabla 1. En la figura 4 los errores de medición en la irradiancia o en la corriente, (G) o (I_{sc}), aparecen en la trayectoria de la división (G/I_{sc}) como picos o huecos. Un pico o un hueco en la trayectoria de la división (G/I_{sc}), significa un pico o un hueco en uno de los dos, la irradiancia ó la corriente, sin su reflejo correspondiente en el otro. Ejemplo; un pico en la irradiancia sin su reflejo en la corriente es un error en la medición, de uno de los dos o de ambos. Una grafica (G/I_{sc}) libre de errores de medición, significa una grafica (G/I_{sc}) libre de picos y huecos en su trayectoria.



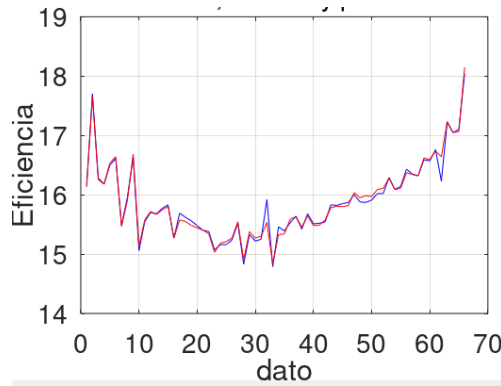
Fuente: elaboración propia.

Figura 4 Mediciones; -- corriente (I_{sc}), -- irradiancia (G), -- (G/I_{sc}).

Gráficas de medición y predicción 3

En la figura 5 se representan las gráficas de la eficiencia con diferente color; η_{medida} es la eficiencia calculada con las mediciones de la tabla 1 y la ecuación 4,

línea azul ($\eta_{regresion}$) es la predicción de la eficiencia obtenida con la ecuación 12, línea roja, donde $FF = 0.7868$; $A = 2.173572 \text{ m}^2$.



Fuente: elaboración propia.

Figura 5 Eficiencia; -- mediciones, -- correlación $\eta = V_{oc}(G, T) * (G/I_{sc}) * (FF/A)$.

$$\eta = (V_{oc}(G, T)) \left(\frac{I_{sc}}{G} \right) \left(\frac{FF}{A} \right) \quad (12)$$

Ecuación de regresión lineal múltiple 3

Se escribió un programa en Octave, para determinar los coeficientes de correlación, de la corriente de cortocircuito (I_{sc}) como función de la irradiancia y la temperatura ambiente ($I_{sc} = f(G, T)$). En la ecuación 13 están presentados los coeficientes de correlación de la matriz (β), calculados con los datos de la tabla 1. La fórmula de regresión lineal múltiple, ecuación 14, sirve para predecir la corriente de cortocircuito (I_{sc}). En la ecuación 14; la variable dependiente es la corriente de cortocircuito (I_{sc}); las variables independientes son la irradiancia y la temperatura ambiente, (G) y (T).

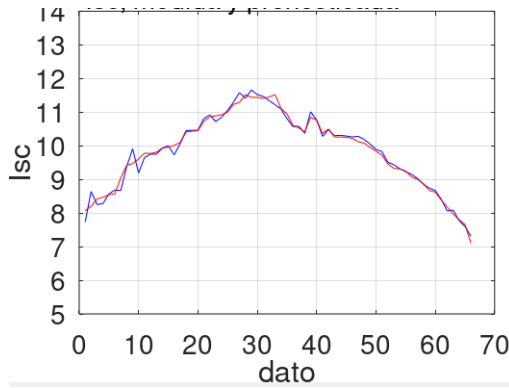
$$\beta = \begin{bmatrix} 2.476623104836108 \\ +0.008232052709491677 \\ -0.01983346228875860 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$I_{sc}(G, T) = \beta_0 + \beta_1 G + \beta_2 T + \varepsilon \quad (14)$$

Gráficas de medición y predicción 4.

En la figura 6 se representan las gráficas de la corriente de cortocircuito con diferente color ($I_{sc_{medida}}$) es la corriente de cortocircuito medida y presentada en la

tabla 1, línea azul ($I_{sc_{regresion}}$) es la predicción de la corriente obtenida con la ecuación 14, línea roja.



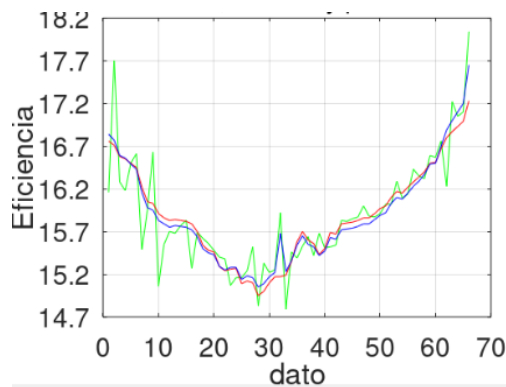
Fuente: elaboración propia.

Figura 6 Corriente; -- mediciones, -- ecuación de correlación $I_{sc} = f(G, T)$.

La trayectoria de la predicción representa correctamente a las mediciones. También, en la cercanía del dato 40 la trayectoria de la predicción reproduce a los picos de las mediciones.

Gráficas de medición y predicción 5

En la figura 7; la línea verde (η_{medida}) es la eficiencia calculada con las mediciones de la tabla 1 y la ecuación 4; la línea roja ($\eta_{regresion9}$) es la predicción de la eficiencia obtenida con la ecuación 9; la línea azul ($\eta_{regresion15}$) es la predicción de la eficiencia obtenida con la ecuación 15.



Fuente: elaboración propia.

Figura 7 Eficiencia; -- mediciones, -- ecuación 9, -- ecuación 15.

Las operaciones representadas en la ecuación 15 son; encontrar la ecuación de correlación para el voltaje ($V_{oc}(G, T)$), ecuación 11; encontrar la ecuación de correlación para la corriente de cortocircuito ($I_{sc}(G, T)$), ecuación 14, para $FF = 0.7868$ y $A = 2.173572 \text{ m}^2$. Las gráficas de las eficiencias están presentadas en la figura 7. La trayectoria de la ecuación 15 es la que mejor concuerda con las mediciones.

$$\eta = (V_{oc}(G, T))(I_{sc}(G, T)) * \left(\frac{1}{G}\right) * \left(\frac{FF}{A}\right) \quad (15)$$

4. Discusión

- En la figura 2, la predicción de la eficiencia obtenida con la ecuación 9 es bastante aceptable.
- En la figura 3, la predicción del voltaje en circuito abierto obtenida con la ecuación 11 es bastante aceptable.
- En la figura 4, los cambios de la corriente de cortocircuito y la irradiancia son proporcionales, como una consecuencia de esta proporción el resultado de la división de ambas variables es del orden de cien.
- En la figura 5, la predicción de la eficiencia obtenida con la ecuación de predicción del voltaje en circuito abierto $V_{oc}(G, T)$, ecuaciones 4 y 11 es alta.
- En la figura 6, la predicción de la corriente de cortocircuito obtenida con la ecuación 14 es alta.
- En la figura 7, la predicción de la eficiencia obtenida con las ecuaciones 11, 14 y 15; la trayectoria de la ecuación 15, de las dos gráficas de pronóstico, es la que mejor concuerda con las mediciones.

En la tabla 2 se presenta un resumen de los coeficientes de correlación. El valor constante (β_0) representa un promedio de la variable dependiente (η, V_{oc} , ó I_{sc}). Los coeficientes (β_1) y (β_2) representan la sensibilidad de la variable dependiente respecto a (G) y respecto (T). El promedio de la eficiencia es $\eta = 20.79$. La eficiencia decrece con ambos, con el aumento de la irradiancia y con el aumento de la temperatura. El promedio del voltaje en circuito abierto es $V_{oc} = 45.93 \text{ (V)}$. El

voltaje en circuito abierto disminuye con el aumento de la irradiancia y aumenta con el aumento de la temperatura. El promedio de la corriente de corto circuito es $I_{sc} = 2.47$ (A). La corriente de corto circuito aumenta con el aumento de la irradiancia y disminuye con el aumento de la temperatura.

Tabla 2 Resumen de coeficientes de correlación.

Coef.	$\eta = f(G, T)$	$V_{oc} = f(G, T)$	$I_{sc} = f(G, T)$
B0	20.79704898640102	45.93384144772244	2.476623104836108
B1	-0.003679466781758123	-0.002125438717151873	+0.008232052709491677
B2	-0.03197734938959229	+0.002911643077652570	-0.01983346228875860

Fuente: elaboración propia.

5. Conclusiones

Se usaron dos métodos para hacer un pronóstico de la eficiencia; a través de la correlación de la eficiencia con la irradiancia y la temperatura, ver la ecuación 9; a través de la correlación del voltaje de circuito abierto por la correlación de la corriente de cortocircuito, ambas variables dependientes con respecto a la irradiancia y la temperatura, ecuaciones 11, 14 y 15.

En la figura 7; la línea verde (η_{medida}) es la eficiencia calculada con las mediciones de la tabla 1 y la ecuación 4; la línea roja ($\eta_{regresion9}$) es la predicción de la eficiencia obtenida con la ecuación 9; la línea azul ($\eta_{regresion15}$) es la predicción de la eficiencia obtenida con las ecuaciones 11, 14, y 15.

Las operaciones representadas en la ecuación 15 son; encontrar la ecuación de correlación para el voltaje ($V_{oc}(G, T)$), ecuación 11; encontrar la ecuación de correlación para la corriente de cortocircuito ($I_{sc}(G, T)$), ver la ecuación 14; multiplicar ($V_{oc}(G, T)$) por ($I_{sc}(G, T)$); dividir el resultado entre la irradiancia (G); multiplicar el resultado por el factor de forma ($FF = 0.7868$); y dividir entre el área ($A = 2.173572$ (m²)). Las gráficas de las eficiencias están presentadas en la figura 7; la gráfica de la ecuación 15 es, de las dos gráficas de predicción, la que mejor concuerda con las mediciones. La ecuación 15 es el modelo matemático que mejor predice a la eficiencia en función de la irradiancia y de la temperatura ambiente.

Programación genética. En [Sohani, 2020] se aplicó un año de datos experimentales de variables climáticas y programación genética para predecir la temperatura del panel fotovoltaico y la eficiencia. Las variables independientes usadas en el estudio son: irradiancia, temperatura ambiente, velocidad del viento y la humedad del aire.

El trabajo presentado en [Sohani, 2020] es muy interesante y completo. El método de correlación ahí presentado es simple y versátil. Esto induce a pensar en la conveniencia de aplicar programación genética a los datos experimentales disponibles y comparar los resultados.

Correlación. En el análisis [Yoo, 2018], para la predicción de la potencia de generación, recomiendan usar un modelo que incluya como variables independientes a la irradiancia y a la temperatura. Esto se recomienda para obtener una estimación de la predicción más precisa.

El método de correlación lineal múltiple aquí presentado considera a ambas variables independientes, a la irradiancia y a la temperatura. Se pretende seguir aplicando la técnica de correlación, para mejorar el modelo matemático de predicción y los resultados.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] 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, January, 2014.
- [2] Gaur, A., Tiwari, G. N. Performance of photovoltaic modules of different solar cells, *Journal of Solar Energy*, vol. 2013, pp. 1-13, September, 2013.
- [3] 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, April, 2019.
- [4] Kazem, H. A., Chaichan, M. T. Effect of Humidity on Photovoltaic Performance Based on Experimental Study, *International Journal of Applied Engineering Research*, vol. 10, nº 23, pp. 43572-43577, December, 2015.

- [5] 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.
- [6] Njok, A. O., Ogbulezei, J. C. The Effect of Relative Humidity and Temperature on Polycrystalline Solar Panels Installed Close to a River, vol. 20, pp. 1-11, February, 2019.
- [7] 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, August, 2020.
- [8] Simsek, E., Pilon, L., Williams, M. J. Effect of dew and rain on photovoltaic solar cell performances, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 222, 2021.
- [9] 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, November, 2020.
- [10] Yoo, B. J., Park, C. B., Lee, J. Analysis of correlation of climate factors affecting solar power generation, *International Journal of Engineering & Technology*, pp. 254 - 258, August, 2018.
- [11] Zhe, L. W., Yusoff, M. I. B., Misrun, M. I., Razak, A. B. A., Ibrahim, S., B. Zhubir, N. S. 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, pp. 456-463, March, 2016.