

CORRELACIÓN ENTRE LA EFICIENCIA DE UN PANEL SOLAR Y LAS CONDICIONES MEDIO AMBIENTALES POR EL MÉTODO DE REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE PARA LA CIUDAD DE TUXTLA GUTIÉRREZ

CORRELATION BETWEEN THE EFFICIENCY OF A SOLAR PANEL AND THE ENVIRONMENTAL CONDITIONS BY THE MULTIPLE LINEAR REGRESSION METHOD FOR THE CITY OF TUXTLA GUTIERREZ

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

Ángeles Gómez López

Tecnológico Nacional de México / IT de Tuxtla Gutiérrez, México
L17270841@tuxtla.tecnm.mx

Axel Alejandro Domínguez López

Tecnológico Nacional de México / IT de Tuxtla Gutiérrez, México
L19270817@tuxtla.tecnm.mx

Recepción: 23/noviembre/2022

Aceptación: 27/marzo/2023

Resumen

En el presente trabajo se establece una ecuación de correlación entre la eficiencia de un panel fotovoltaico y las variables del medio ambiente, irradiancia, temperatura, y velocidad del viento. Para establecer la correlación se usa el método de regresión lineal múltiple a partir de mediciones en horarios pico. Un cambio en la irradiancia, producto de la presencia de nubes durante las mediciones, ocasiona un transitorio en la gráfica de la eficiencia: aparece un pico ó un hueco, o ambos. En este trabajo se demuestra que la aplicación de la técnica de regresión lineal múltiple

tiene un efecto de tipo filtro digital. Esto significa que los picos o cambios abruptos en las figuras de la eficiencia medida, calculada con los datos de las mediciones, desaparecen en la gráfica de la eficiencia, calculada con la ecuación de regresión lineal múltiple. También, cuando hay ausencia de cambios abruptos en las figuras de la eficiencia medida, el pronóstico de la eficiencia, calculado con la ecuación de regresión lineal múltiple, se aproxima más a los datos de la medición.

Palabras Clave: Eficiencia, irradiancia, panel solar.

Abstract

In this paper, a correlation equation is established between the efficiency of a photovoltaic panel and the environmental variables irradiance, temperature, and wind speed. To establish the correlation, the multiple linear regression method is used from measurements at peak hours. A drastic change in irradiance, due to the presence of clouds during the measurements, causes a transient in the efficiency graph: a peak or a gap appears, or both. It is shown that the application of the regression technique has a digital filter type effect, the peaks or abrupt changes in the figures of the measurement efficiency, disappear in the graph of the linear regression equation. Also, when there are no abrupt changes, the graph of the regression curve is closer to the measurement data.

Keywords: Efficiency, irradiance, solar panel.

1. Introducción

Existen distintas fuentes usadas en la generación de energía eléctrica, pero el impacto negativo que tiene la explotación de los combustibles, en el medio ambiente, provoca la búsqueda de la producción de energía eléctrica con fuentes consideradas limpias. La energía solar ha sido identificada como 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 para trabajar en condiciones de laboratorio, pero el clima es variable, y en consecuencia estos operan en

condiciones diferentes a las de diseño. Los paneles fotovoltaicos sometidos a condiciones climáticas, diferentes a las que fueron diseñados, 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 fórmulas, para predecir la eficiencia resaltando la importancia de estudiar la respuesta de los paneles fotovoltaicos, en función de la inclinación del panel fotovoltaico y las condiciones ambientales. Esto con el objeto de mejorar la eficiencia bajo condiciones diferentes a las óptimas.

Esta problemática conduce a la necesidad del estudio de la eficiencia del panel fotovoltaico, la cual depende de su temperatura a la que está sometido T_{panel} . Al mismo tiempo, esta temperatura es una función de varias variables: el nivel de radiación solar, la temperatura ambiente, y la velocidad del viento.

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.

Temperatura. La temperatura óptima de funcionamiento de los paneles solares se sitúa entre 20 y 25 °C. Por encima de 25 °C la eficiencia se reduce. Según datos de los fabricantes, una temperatura de 40 °C ocasiona que la eficiencia se reduzca a 80% de su valor nominal.

En [Njok, 2019] presentaron que, al aumentar la temperatura del panel, hasta la máxima temperatura de operación, aumenta la eficiencia. Después de la máxima temperatura de operación, al aumentar la temperatura en 1°C, la eficiencia decrece entre 0.14 y 0.47%. En [Hachicha, 2019] concluyeron que, cuando la temperatura aumenta, la eficiencia del panel solar 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] observaron que, con el incremento de la temperatura, el voltaje de circuito abierto decrece. Además, el voltaje de circuito abierto influye en la potencia y la eficiencia. También, observaron que la eficiencia tiene un comportamiento similar al voltaje de circuito

abierto. Esto significa que, para valores mayores a la temperatura máxima de operación, con el incremento de la temperatura, la eficiencia decrece.

En [El-shaer, 2014] estudiaron la influencia de la temperatura sobre los parámetros de los módulos solares de silicio cristalino y encontraron que el voltaje en circuito abierto decrece con el incremento de la temperatura del módulo T_{panel} . En consecuencia, la densidad máxima de potencia decrece de 48.76 a 41.88 mW/cm^2], para 50 °C.

Irradiancia. En [Ari, 1985] presentaron que la radiación solar experimenta pérdidas al entrar en la atmósfera: 30% se pierde debido a la reflexión, y 19% se pierde por absorción. El resto, 51%, traspasa a la atmósfera y llega a las celdas solares de manera directa o difusa. En un módulo fotovoltaico, la incidencia de luz causa la aparición de una corriente fotovoltaica directamente proporcional a la irradiancia.

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

Velocidad del viento. La circulación de aire a velocidades moderadas contribuye al enfriamiento de los paneles solares, 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 la degradación de la eficiencia de los paneles fotovoltaicos.

En [Kazem, 2015], para condiciones de clima húmedo y caluroso, analizaron la influencia de la irradiancia en módulos fotovoltaicos y concluyeron que el efecto del viento sobre la temperatura de los módulos era insignificante. En [Razak, 2016] reportaron que, para lograr una mejor eficiencia de salida de la energía fotovoltaica, estos deben funcionar en una atmósfera con una velocidad del viento considerable.

En [Zhe, 2016] usaron 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 puede aplicarse para enfriar al panel, lograr temperaturas menores, y un mejor desempeño.

Humedad relativa del aire. En el estudio [Simsek, 2021] mostraron que la producción de energía por hora de las celdas fotovoltaicas disminuye significativamente con la formación de rocío. La presencia de gotitas hace que la potencia máxima y la eficiencia de las celdas fotovoltaicas se reduzcan significativamente, particularmente para ángulos de incidencia $\theta_i > 30^\circ$ de contacto con gotitas. Tal degradación del rendimiento se atribuyó al hecho de que la luz incidente se dispersa a través de las gotas antes de ser absorbida por la celda solar. En [Njok, 2019] presentaron que el voltaje de salida de un panel fotovoltaico se mantiene estable para una humedad relativa de 65 a 75% y temperatura de 33 a 43 °C. También, describieron que existe una correlación negativa entre la humedad relativa y la corriente. Además, mostraron que una humedad relativa alta afecta adversamente a la eficiencia.

En [Segbefia, 2021] presentaron que la temperatura y la radiación UV influyen en la entrada de humedad en los paneles fotovoltaicos. Al mismo tiempo, la presencia de humedad es causa de decoloración del encapsulado y corrosión de los metales, culminando en la pérdida de la eficiencia debido a corrientes parasitas que reducen la potencia hasta en 30%.

Eficiencia. En [Gaur, 2013] analizaron módulos fotovoltaicos de diferentes celdas solares, para diferentes condiciones climáticas, y observaron 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 observaron, a través de gráficas, que la caída de la eficiencia, en la primera etapa, coincide con el aumento de la temperatura del panel, y el aumento de la eficiencia, en la segunda etapa, coincide con la caída de la temperatura del panel. Después de analizar este comportamiento, concluyeron que la temperatura del panel es el principal factor de impacto, en este estudio, en el valor de la eficiencia, y la eficiencia es inversamente proporcional a la temperatura del panel.

En [Sohani, 2020] usaron 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. En el estudio también presentaron una estimación del error de la predicción.

Correlación. En el análisis [Yoo, 2018] concluyeron que entre la potencia de generación y la irradiancia existe una alta correlación de 0.8131 para la planta Koreana Songam. También, encontraron que entre la potencia de generación y la temperatura ambiental existe una correlación de 0.2843 y 0.4616 para las plantas Koreanas Songam y Jipyong respectivamente. Además, para la predicción de la generación, recomiendan usar un modelo que incluya a ambas, a la irradiancia y a la temperatura, para obtener una estimación más precisa.

En el presente trabajo el problema es encontrar una función de correlación, por el método de regresión lineal múltiple, entre la eficiencia de un panel fotovoltaico y las condiciones ambientales: irradiancia, temperatura ambiente, y velocidad del viento. Se busca esto en base a los datos ambientales del lugar estudiado y las mediciones de la eficiencia del panel fotovoltaico en horario pico.

2. Métodos

Para encontrar la correlación entre la eficiencia y las variables ambientales, se tiene que hacer la instalación del panel solar considerando una inclinación y una orientación.

El ángulo de inclinación y la orientación del panel solar se relacionan con la necesidad de generar la mayor cantidad de energía durante las horas de mayor irradiación.

Inclinación. La inclinación óptima está vinculada a la latitud del lugar y la época del año. La finalidad de aplicar un ángulo de inclinación es obtener la máxima perpendicularidad del módulo fotovoltaico respecto a la radiación solar. La máxima producción de energía se obtiene durante el mediodía, cuando el sol alcanza su máxima altura en el horizonte. Para un mayor aprovechamiento de la luz solar, la orientación más adecuada para Chiapas es hacia el sur geográfico.

Método de regresión lineal múltiple. Es una técnica estadística para establecer relaciones de función. Antes de aplicar esta técnica, una serie de condiciones se deben 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, ver ecuación 1.

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n \quad (1)$$

3. Resultados

Ubicación de la instalación. El panel solar ha sido instalado en el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez en Carretera Panamericana km 1080, que se encuentra a 522 msnm, en las coordenadas de longitud -93.17253 y de latitud 16.75697, en el municipio de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Para el cálculo del ángulo de inclinación (β) se toma en cuenta la estación del año. En primavera y verano, para calcular el ángulo de inclinación, a la latitud del lugar se le restan 2.5° : la latitud de Tuxtla es 16.75° restando 2.5° da 14.25° . El ángulo de inclinación para invierno se calcula multiplicando la latitud del lugar por 0.9 y se le suman 29 grados, obteniendo 44.08° , figura 1.



Figura 1 Panel fotovoltaico PRO8512 instalado con ángulo de inclinación de 44° .

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 máxima potencia de salida ($P_{max} = P_m$), ecuación 2 y tabla 1.

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

Tabla 1 Especificaciones técnicas.

Potencia máxima (P_m)	85 W (+/-3%)
Máximo Voltaje (V_{mp})	18.1 V_{cc} (+/-3%)
Máximo Amperaje (I_{mp})	4.7 A (+/-3%)
Voltaje a circuito abierto (V_{oc})	22.3 V_{cc} (+/-3%)
Corriente de corto circuito (I_{sc})	5.01 A (+/-3%)
Dimensiones	790x630x30 mm
Peso	62 kg
Temperatura ambiente	- 40 a 80 °C
Máximo voltaje del sistema	600 V_{cc}
Eficiencia	16.26%

La máxima potencia de salida (P_{max}) se puede calcular de dos formas. Primera forma: multiplicando el voltaje de máxima potencia (V_{mp}), por la corriente de máxima potencia (I_{mp}). Segunda forma: multiplicando el voltaje de circuito abierto (V_{oc}), por la corriente de cortocircuito (I_{sc}), por el factor de forma (FF), ver ecuación 3. La potencia incidente (P_{in}) se puede calcular multiplicando la cantidad de irradiación (G) que se impacta en las celdas del panel fotovoltaico kWh/m^2 por el área del panel (A).

Los datos del panel fotovoltaico instalado se presentan en la tabla 1 y corresponden al Módulo Solar Fotovoltaico 85 W 12 VCC Poli36Cel SY-PRO8512. Las especificaciones eléctricas de la tabla 1 se indican bajo una irradiancia de 1000 [W/m^2] y una temperatura de 25 °C.

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 puede poner en una forma más simple, ecuación 3 para despejar el factor de forma (FF), ecuación 4.

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

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

El cálculo del factor de forma (FF), con los datos de la tabla 1, da como resultado que $FF = 0.7614$.

Cálculo de la eficiencia. La ecuación 6 permite 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 $A = (0.79)(0.63) = 0.4977$ y se usa el valor del factor de forma (FF) calculado ($FF = 0.7614$).

$$\eta = \frac{I_{sc}V_{oc}FF}{GA} \quad (6)$$

Mediciones del lunes 27/06/2022. En la tabla 2 se presentan las mediciones hechas el lunes 27 de junio del 2022, que corresponden por columna: al voltaje de circuito abierto (V_{oc}), la corriente de cortocircuito (I_{sc}), la eficiencia (η) calculada con la ecuación 6 ($Y = \eta$), la irradiancia ($X_1 = G$), la temperatura ambiental ($X_2 = T$), y la velocidad del viento ($X_3 = V_w$).

Gráficas de los resultados. Los resultados de las mediciones se presentan: de la temperatura en la figura 2, de la irradiancia en la figura 3, y de la eficiencia calculada con la ecuación 6 en la figura 4. El horario de medición fue de 11:00 a 14:00, cada cinco minutos, lo cual da un total de 37 datos para cada variable medida.

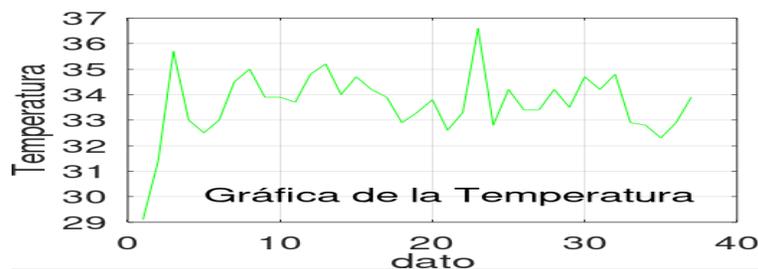


Figura 2 Gráfica de las mediciones de la temperatura.

Tabla 2 Mediciones del lunes 27/06/2022.

No.	V_{oc} [V]	I_{sc} [A]	Eficiencia (Y) [%] <i>ec. 7</i>	Irradiancia (X_1) [W/m ²]	Temperatura (X_2) [°C]	V_w (X_3) [m/s ²]
1	20.30	2.47	7.54	888.5	29.1	0
2	20.50	2.01	5.71	964.6	31.4	0
3	19.81	4.09	10.83	1000.4	35.7	0
4	19.74	3.87	11.28	905.3	33.0	0
5	20.16	3.71	10.80	925.6	32.5	0.1
6	20.13	3.76	10.84	933.4	33.0	0
7	20.20	3.85	11.04	941.7	34.5	0
8	20.11	3.92	10.89	967.7	35.0	0
9	20.02	3.93	10.63	989.8	33.9	0
10	20.00	3.90	10.58	985.5	33.9	0
11	20.00	3.90	10.35	1007.5	33.7	0
12	20.09	4.29	11.00	1047.6	34.8	0
13	20.19	2.51	7.30	928.4	35.2	0
14	20.21	2.95	9.72	819.7	34.0	0
15	19.78	4.01	9.86	1075.4	34.7	0
16	20.17	4.20	10.54	1074.2	34.2	0
17	20.08	4.14	10.59	1049.2	33.9	0
18	20.12	4.21	10.40	1088.9	32.9	0
19	20.09	4.39	10.42	1131.2	33.3	0
20	18.92	1.29	4.10	796.8	33.8	0
21	20.18	4.60	10.65	1165.4	32.6	0
22	20.30	4.35	10.26	1150.5	33.3	0
23	20.11	4.32	9.75	1191.0	36.6	0
24	20.31	4.74	10.36	1241.8	32.8	0
25	20.12	4.60	10.27	1205.3	34.2	0
26	20.00	4.50	10.08	1194.0	33.4	1.1
27	19.16	4.80	15.08	815.1	33.4	0
28	20.00	4.90	10.23	1280.2	34.2	0
29	19.80	3.40	8.61	1045.4	33.5	0
30	20.00	4.90	10.55	1242.3	34.7	1.4
31	20.00	4.80	9.98	1285.7	34.2	0
32	19.70	4.20	9.06	1221.5	34.8	0.7
33	20.28	4.49	10.15	1199.7	32.9	1.1
34	19.93	4.05	12.41	869.5	32.8	1.3
35	20.42	4.48	10.60	1153.8	32.3	1.9
36	20.27	4.51	10.45	1169.2	32.9	0.9
37	20.15	4.99	10.25	1312.1	33.9	1.1

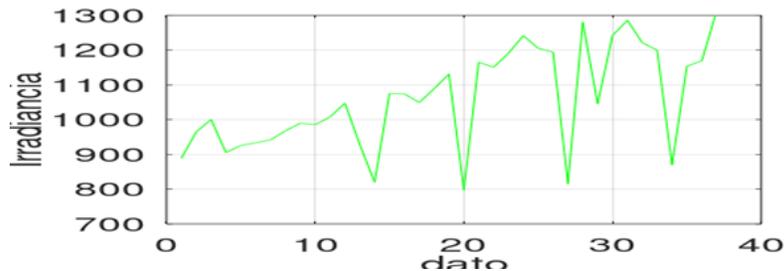


Figura 3 Gráfica de las mediciones de la irradiancia.

Regresión lineal múltiple. Para deducir las ecuaciones de regresión lineal se deben definir las variables independientes y la variable dependiente. La irradiancia (X_1), la temperatura ambiental (X_2), y la velocidad del viento (X_3), se consideran aquí las variables independientes. La eficiencia (Y) se considera aquí la variable dependiente. También, para cumplir las condiciones del método de regresión lineal, se considera aquí que: las variables independientes (X_i) no están correlacionadas entre sí, y las relaciones de las variables independientes (X_i) con la variable dependiente (Y) son lineales. Además, se considera que todas las variables, (X_i) y (Y), tienen una distribución normal y tienen varianzas iguales.

Matriz de coeficientes (β). Para calcular los coeficientes de correlación, se usan las ecuaciones 7 y 8, presentadas en notación matricial. La matriz (β) está compuesta por los coeficientes de correlación, y para calcular a dichos coeficientes se usa la ecuación 9.

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{1p} \\ 1 & x_{21} & \dots & x_{2p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{n1} & \dots & x_{np} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \dots \\ \beta_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \dots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$Y = X\beta + \varepsilon \quad (8)$$

$$\beta = (X^t X)^{-1} X^t Y \quad (9)$$

En las ecuaciones 7 y 8 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.

Ecuación de regresión lineal múltiple. Se escribió un programa en Octave, para calcular los coeficientes de correlación. En la ecuación 10 están presentados los coeficientes de correlación de la matriz (β), calculados con los datos de la tabla 2.

$$\beta = \begin{bmatrix} 0.3405267421803124 \\ -0.000105858008288 \\ 0.2896086167173285 \\ 0.5429959438394096 \end{bmatrix} \quad (10)$$

La fórmula de regresión lineal múltiple está dada por la ecuación 11; para predicción de la eficiencia en base a los coeficientes de correlación y los valores de las variables independientes. En esta expresión las variables representan: (Y) la eficiencia, (X_1) la irradiancia, (X_2) la temperatura y (X_3) la velocidad del viento.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \varepsilon \quad (11)$$

Coefficientes de correlación. El coeficiente (β_1) expresa el cambio en (Y) por cada cambio unitario en la irradiancia (X_1), manteniendo a (X_2) y (X_3) constantes. De manera similar (β_2) es el cambio en (Y) por cada cambio unitario en la temperatura (X_2), manteniendo (X_1) y (X_3) constantes. (β_3) Es el cambio en (Y) por cada cambio unitario en la velocidad del viento (X_3), manteniendo (X_1) y (X_2) constantes. La variable (ε) es el error debido a variables no controladas.

Eficiencia. La función de regresión lineal múltiple correspondiente a las mediciones del lunes 27 de junio está dada por la ecuación 12; los coeficientes de esta fórmula se toman de la matriz de correlación presentada en la ecuación 10.

$$Y = 0.34052 - 0.00010585X_1 + 0.2896X_2 + 0.54299X_3 \quad (12)$$

En la tabla 3 se presentan los resultados de los cálculos de la eficiencia (Y_{medida}), la predicción de la eficiencia ($Y_{regresion}$) y el error de predicción ($Error$). Los valores de la eficiencia (Y_{medida}) se obtienen sustituyendo los datos de las mediciones en la ecuación 6.

Código en Octave. En la tabla 4 se presenta un código en software libre GNU Octave que calcula, los coeficientes de correlación (β), la predicción de la eficiencia ($Y_{regresion}$) y el error de predicción ($Error$). La predicción de la eficiencia ($Y_{regresion}$) se calcula con la ecuación 12. El error de predicción se evalúa a través de la resta $Error = (Y_{regresion}) - (Y_{medida})$.

Mediciones. Del periodo de medición, se seleccionaron como ejemplo cuatro días; las fechas de medición y los coeficientes de correlación de esos días están en la tabla 5. Los coeficientes fueron calculados con mediciones tomadas en días soleados o nublados; el registro de datos se suspendió solo los días de lluvia. Los valores de la tabla 5 se usaron para construir las ecuaciones 12 a 15; el lunes 27/06/2022, ecuación 12; el martes 28/06/2022, ecuación 13; el viernes 01/07/2022, ecuación 14; el sábado 02/07/2022, ecuación 15.

$$Y = 11.168 - 0.00070510X_1 + 0.0023303X_2 + 0.13445X_3 \quad (13)$$

$$Y = 13.967 - 0.0040373X_1 + 0.01573X_2 \quad (14)$$

$$Y = 13.213 - 0.00071247X_1 + 0.064032X_2 + 0.026959X_3 \quad (15)$$

Tabla 3 Cálculos de la eficiencia (Y) y el error de predicción ($Error$).

No.	Y_{medida} [%]	$Y_{regresion}$	$Error$
1	7.54	8.67	1.13
2	5.71	9.33	3.62
3	10.83	10.57	- 0.25
4	11.28	9.80	- 1.47
5	10.80	9.70	- 1.09
6	10.84	9.79	- 1.04
7	11.04	10.23	- 0.80
8	10.89	10.37	- 0.51
9	10.63	10.05	- 0.57
10	10.58	10.05	- 0.52
11	10.35	9.99	- 0.35
12	11.00	10.30	- 0.69
13	7.30	10.43	3.13
14	9.72	10.10	0.38
15	9.86	10.27	0.41
16	10.54	10.13	- 0.40
17	10.59	10.04	- 0.54
18	10.40	9.75	- 0.64
19	10.42	9.86	- 0.55
20	4.10	10.04	5.94
21	10.65	9.65	- 0.99
22	10.26	9.86	- 0.39
23	9.75	9.75	0.0055
24	10.36	9.70	- 0.65
25	10.27	10.11	- 0.15
26	10.08	10.48	0.40
27	15.08	9.92	- 5.15
28	10.23	10.10	- 0.12
29	8.61	9.93	1.32
30	10.55	11.01	0.46
31	9.98	10.10	0.12
32	9.06	10.66	1.60
33	10.15	10.33	0.18
34	12.41	10.45	- 1.95
35	10.60	10.60	0.0044
36	10.45	10.23	- 0.21
37	10.25	10.61	0.36

Tabla 4 Programa para calcular (β), ($Y_{regresion}$) y el error de predicción ($Error$).

```

Código en Octave
clc
clear all
format long
X=[1 315.0 30.1 0;1 304.2 31.0 0;1 296.0 30.1 0; 1 319.4 30.2 0;1 336.2 30.0 0;1 490.8 30.5 0;
1 991.2 32.0 0;1 339.0 33.0 0;1 1240.8 35.0 0;1 202.9 33.3 0;1 295.1 32.0 0;1 1167.2 34.3 0;
1 285.6 33.2 0;1 1189.3 32.11 0;1 1014.8 31.81 0;1 350.6 32.6 0;1 1202.1 33.0 0;
1 1132.1 33.8 0;1 1106.7 33.2 0;1 1155.8 33.1 0;1 1171.8 32.6 0;1 1140.5 33.7 0;
1 410.8 31.7 0;1 577.1 31.7 0;1 459.2 30.7 0.7;1 1468.9 32.6 0;1 430.5 32.6 0;
1 1297.7 31.6 1.2;1 1173.1 31.3 0;1 282.8 32.5 0;1 1200.3 32.5 0;1 1276.3 33.5 0.9;
1 266.4 31.3 0;1 1243.0 30.2 1.2;1 1305.7 32.3 0; 1 615.4 31.8 1.0;1 753.1 31.8 0]
Y=[7.54;5.71;10.83;11.28;10.80;10.84;11.04;10.89;10.63;10.58;10.35;11.00;7.30;9.72;
9.86;10.54;10.59;10.40;10.42;4.10;10.65;10.26;9.75;10.36;10.27;10.08;15.08;10.23;8.61;
10.55;9.98;9.06; 10.15;12.41;10.60;10.45;10.25]
XT=X'
C=XT*X
D= inv(C)
E=XT*Y
B=D*E
Yregresion=X*B
Error=Yregresion-Y
    
```

Tabla 5 Coeficientes de correlación, matriz (β).

Año 2022	(β_0)	(β_1)	(β_2)	(β_3)
Lunes 27/06	0.34052	- 0.000105858	0.289608	0.54299
Martes 28/06	11.168	- 0.000705109	0.0023303	0.134455
Viernes 01/07	13.967	- 0.0040373	0.01573003	Vw=0
Sábado 02/07	13.213	- 0.00071247	0.064032	0.026959

Gráficas de medición y predicción. En las figuras 5 a 8 se representan las gráficas de la eficiencia con diferente color. En la figura 5, mediciones del lunes 27 de junio; (Y_{medida}) es la eficiencia calculada con las mediciones y la ecuación 6, la línea verde; ($Y_{regresion}$) es la predicción de la eficiencia obtenida con la ecuación 12, la línea roja. Las líneas se ponen en una misma figura para su comparación.

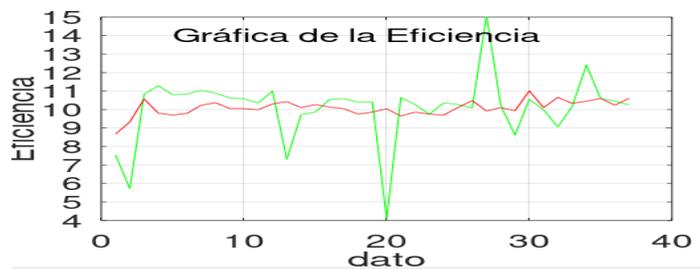


Figura 5 Lunes 27/06/2022. Eficiencia; -- medición, -- predicción.



Figura 6 Martes 28/06/2022. Eficiencia; -- medición, -- predicción.

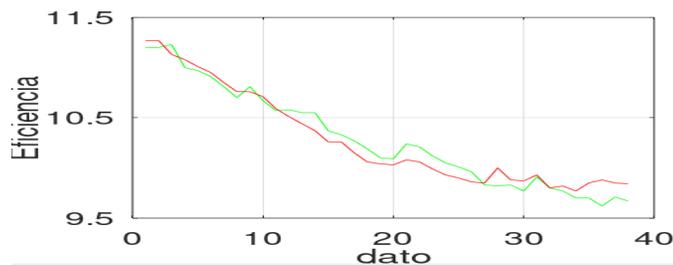


Figura 7 Viernes 01/07/2022. Eficiencia; -- medición, -- predicción.

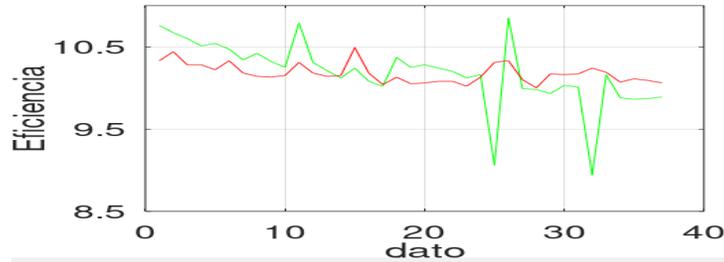


Figura 8 Sábado 02/07/2022. Eficiencia; -- medición, -- predicción.

En la figura 6, mediciones del martes 28 de junio; (Y_{medida}) es la eficiencia calculada con las mediciones y la ecuación 6, la línea verde; ($Y_{regresion}$) es la predicción de la eficiencia obtenida con la ecuación 13, la línea roja.

En la figura 6, mediciones del viernes 1 de julio; (Y_{medida}) es la eficiencia calculada con las mediciones y la ecuación 6, la línea verde; ($Y_{regresion}$) es la predicción de la eficiencia obtenida con la ecuación 14, la línea roja.

La figura 8 mediciones del sábado 2 de julio; (Y_{medida}) muestra la eficiencia calculada con las mediciones y la ecuación 6, la línea verde; ($Y_{regresion}$) es la predicción de la eficiencia obtenida con la ecuación 15, la línea roja.

4. Discusión

Cuando hay un cambio en la irradiancia, ocasionado por una nube, la representación gráfica de la eficiencia medida (Y_{medida}) presenta un cambio similar a una perturbación transitoria; en la figura aparece un hueco ó un pico, o ambos, ver figuras 5, 6 y 8. Este comportamiento de (Y_{medida}) es un error ocasionado por la técnica de medición; primero se midió V_{oc} , luego I_{sc} , y luego la irradiancia (G). Al medir cada parámetro a intervalos de tiempo distintos, se inducen errores en los cálculos de la eficiencia medida; En presencia de nubes en movimiento los valores V_{oc} e I_{sc} son medidos bajo los efectos de una irradiancia (G) diferente a la registrada en el último paso. Como trabajo futuro se pretende desarrollar un sistema para hacer mediciones en paralelo, a un mismo tiempo, ó a intervalos de retardo menores a un segundo. En las figuras de la 5 a la 8, se observa que la aplicación de la técnica de regresión lineal múltiple tiene un efecto de filtrado. Los picos pronunciados en las

figuras 5, 6 y 8, que representan estados transitorios de la irradiancia e inducen errores en el cálculo de la eficiencia medida, no aparecen en la gráfica de la predicción de la eficiencia ($Y_{regresion}$). Una técnica de medición en tiempo real evitará estos picos. En la ecuación de regresión lineal múltiple el valor constante (β_0) representa un promedio de la eficiencia, tabla 5, y los demás coeficientes (β_1) a (β_3) representan la sensibilidad de la eficiencia respecto al parámetro correspondiente. Cuando hay ausencia de cambios abruptos la curva de regresión lineal múltiple se aproxima más a los datos de la medición, figura 7. Se está trabajando en una técnica para calcular el nivel de ajuste de las curvas de predicción con la medición, la cual se pretende reportar en trabajos futuros.

5. Conclusiones

Cuando hay un cambio drástico en la irradiancia la gráfica de la eficiencia medida presenta un transitorio: aparece un pico ó un hueco, o ambos. La siguiente etapa de este proyecto es automatizar las mediciones y hacer mediciones en tiempo real para identificar a detalle la naturaleza de este comportamiento.

La aplicación de la técnica de regresión lineal múltiple tiene un efecto de tipo filtro digital, los picos o cambios abruptos en las figuras 5, 6 y 8 de la eficiencia, producto de las mediciones, desaparecen en la representación gráfica de la ecuación de regresión lineal. Cuando hay ausencia de cambios abruptos la curva de regresión lineal múltiple se aproxima más a los datos de la medición. Se desarrollará, como trabajo futuro, una técnica para calcular el nivel de ajuste de la curva de predicción con la curva de las mediciones.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Ari, R., *Active Solar Collectors and Their Applications*, New York.: Editorial Oxford University Press, 1985.
- [2] 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.

- [3] 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.
- [4] Gaur, A., Tiwari, G. N., Performance of photovoltaic modules of different solar cells, *Journal of Solar Energy*, vol. 2013, pp. 1-13, 2013.
- [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] Kazem, H. A., Chaichan, M. T., Effect of Humidity on Photovoltaic Performance Based on Experimental Study, *International Journal of Applied Engineering Research*, vol. 10, n° 23, pp. 43572-43577, 2015.
- [7] 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, n° 5, pp. 682-688, 2016.
- [8] 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, n° 12, pp. 2514-2521, 2011.
- [9] 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, 2019.
- [10] 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, n° 4, pp. 3942-3947, 2020.
- [11] Servant, J. M., Calculation of the cell temperature for photovoltaic modules from climatic data, *Intersol Eighty Five*, pp. 1640-1643, 1986.
- [12] 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, p. 110908, 2021.

- [13] 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, n° 5, pp. 682-688, 2016.
- [14] Segbefia, O. K., Imenes, A. G., Saetre, T. O., Moisture ingress in photovoltaic modules: A review, *Solar Energy*, vol. 224, p. 889–906, 2021.
- [15] 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.
- [16] Yoo, B. J., Park, C. B., Lee, J., Analysis of correlation of climate factors affecting solar power generation, *International Journal of Engineering & Technology*, p. 254 - 258, 2018.
- [17] 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, n° 3, 2016.