

Recibido 23 de agosto de 2024. Aceptado 29 de noviembre de 2024. Publicado 19 de diciembre de 2024.

ISSN: 2448-7775

Análisis de comportamiento y rendimiento del módulo fotovoltaico considerando condiciones ambientales, sombras y trayectoria solar

MIGUEL A. CISNEROS ALEMAN¹, JOEL J. ONTIVEROS MIRELES^{1*}, EBER E. OROZCO GUILLÉN², NÉSTOR D. GALÁN HERNÁNDEZ², GUILLERMO J. RUBIO ASTORGA¹.

¹Laboratorio de Mecatrónica y control, Tecnológico Nacional de México / IT Culiacán, Culiacán, Sinaloa, México.

²Universidad Politécnica de Sinaloa, Mazatlán, Sinaloa, México.

*Autor de Correspondencia: joel.om@culiacan.tecnm.mx

RESUMEN Esta investigación analiza el rendimiento de un módulo fotovoltaico en condiciones reales, aspectos cruciales para el diseño y eficiencia de los sistemas de energía solar. Aunque, los módulos se prueban bajo condiciones estándar de irradiancia y temperatura (STC), su rendimiento es influenciado por la ubicación, orientación, inclinación, sombreado y otras condiciones ambientales. La investigación presenta dos análisis del comportamiento de un módulo fotovoltaico en Mazatlán, Sinaloa. El primer caso examina el rendimiento del módulo en tres configuraciones: orientación sur con inclinación de 0°, inclinación de 23°, y con un sistema de seguimiento solar de dos ejes. Se compara el rendimiento del módulo a 23° con el modelo de diodo simple, utilizando métricas como la Diferencia Porcentual (DP), el error cuadrático medio (RMSE) y el error cuadrático medio normalizado (nRMSE), considerando las condiciones climáticas del 21 de marzo y mediciones experimentales de radiación, temperatura de celda y curvas características I-V y P-V. El segundo caso analiza el impacto de las sombras en los cuatro cuadrantes del módulo solar, con inclinaciones de 23° y 0°, cuantificando la reducción en la generación de potencia eléctrica debido al sombreado en las celdas del módulo. Los resultados indican que el sistema de seguimiento solar proporciona un aumento en el rendimiento en comparación con el módulo fijo a 23° y 0°. En cuanto al efecto de las sombras, se observa una reducción de hasta el 90% del rendimiento cuando existe una supresión efectiva de los diodos de derivación de la interconexión de las células del módulo fotovoltaico.

PALABRAS CLAVE— Módulo fotovoltaico, Modelado matemático, Análisis de rendimiento, I-V P-V Curvas

I. INTRODUCCIÓN

El incremento exponencial de la demanda energética global, impulsado por el crecimiento demográfico y el desarrollo económico, plantea un desafío crítico para la sostenibilidad energética a escala mundial. Históricamente, los combustibles fósiles han sido la fuente primaria para satisfacer esta demanda creciente. No obstante, su utilización ha generado externalidades negativas significativas, principalmente en términos de impacto ambiental y cambio climático, debido a la emisión de gases de efecto invernadero [1]. México, con su privilegiada posición geográfica y los altos niveles de irradiación solar tiene un elevado potencial para contribuir en la transición energética. La energía solar fotovoltaica es una alternativa viable para cubrir las necesidades energéticas futuras de manera sostenible. Esta tecnología no solo ofrece la posibilidad de mitigar la huella de carbono asociada a la generación eléctrica, sino que también presenta oportunidades para alcanzar el balance energético neto cero en el sector de la edificación [2].

La implementación a gran escala de sistemas fotovoltaicos en México podría contribuir significativamente en la diversificación de la matriz energética nacional. Esta implementación, además de disminuir la dependencia de hidrocarburos, también incrementa la resiliencia y la flexibilidad del sistema eléctrico interconectado. La integración de tecnología fotovoltaica distribuida y centralizada se alinea con los objetivos de descarbonización del sector energético cumpliendo con los compromisos y acuerdos internacionales signados por el país sobre mitigación de cambio climático. Este enfoque posicionaría a México como un referente regional en la transición energética, catalizando el desarrollo de un modelo energético de baja huella de carbono, altamente eficiente y sostenible a largo plazo. Además, la proliferación de sistemas fotovoltaicos podría fomentar la creación de un ecosistema tecnológico-industrial robusto, impulsando la innovación local y la competitividad económica en el mercado global de energías renovables.

Los sistemas de energía solar fotovoltaica se componen principalmente de módulos fotovoltaicos (MFV), que son dispositivos que convierten la radiación solar incidente en

electricidad de corriente continua. Estos módulos se fabrican utilizando materiales semiconductores, como el silicio cristalino, que aprovechan el efecto fotoeléctrico para generar portadores de carga cuando son expuestos a la luz solar [3]. La caracterización de los módulos fotovoltaicos, como la curva corriente-voltaje (I-V) y potencia-voltaje (P-V), se determinan en condiciones de prueba estándar (STC), definidas por una irradiancia de 1 kW/m^2 y una temperatura de celda de 25°C . A partir de estas curvas características, es posible extraer parámetros fundamentales del dispositivo, tales como la corriente de cortocircuito (I_{sc}), la tensión de circuito abierto (V_{oc}), la potencia máxima (P_{max}), el factor de forma (FF) y el rendimiento de conversión fotovoltaica (η). Estos parámetros permiten evaluar el desempeño y la eficiencia del MFV, y son esenciales para el diseño, dimensionamiento y optimización de sistemas solares [4][5].

A diferencia de las condiciones de prueba estandarizadas, el rendimiento, la potencia de salida y la generación de energía de los MFV en condiciones reales de operación dependen fuertemente de factores ambientales y geográficos [6]. Parámetros como la ubicación, la orientación, el ángulo de inclinación, las sombras, las variaciones de irradiancia y temperatura, así como los cambios diarios y estacionales en la posición del sol, influyen de manera significativa en el desempeño del sistema fotovoltaico. En este sentido, la colocación y el ajuste óptimos de los ángulos de inclinación y orientación de los módulos fotovoltaicos son cruciales para maximizar la captación de radiación solar y la producción de energía eléctrica a lo largo del año [7].

Además, es fundamental caracterizar el comportamiento de las curvas corriente-voltaje (I-V) y potencia-voltaje (P-V) de los módulos bajo condiciones ambientales dinámicas. El análisis de estas curvas permite determinar el rendimiento y la producción energética del sistema, lo cual resulta esencial para el diseño, la gestión y la optimización de las centrales fotovoltaicas [8].

El conocimiento detallado de estas propiedades eléctricas y energéticas de los módulos fotovoltaicos, obtenido bajo condiciones de prueba estandarizadas, sienta las bases para comprender su comportamiento y rendimiento en condiciones reales de operación, donde factores ambientales como la irradiancia, la temperatura, el sombreado y la orientación/inclinación pueden afectar significativamente su desempeño.

En la actualidad se llevan a cabo investigaciones en el modelado, simulación y validación de modelos en condiciones ambientales reales. En [3] realizaron el modelado y simulación de una celda fotovoltaica en el ambiente de programación MATLAB/Simulink para comparar las no-linealidades de las curvas I-V y P-V con las especificaciones del fabricante, a través del modelo de diodo simple (*simple diode model* SDM) y modelo de diodo doble (*double diode model* DDM) para diferentes radiaciones y temperaturas. En [9] modelaron y compararon el SDM con

mediciones climáticas reales en Polonia para determinar y comparar el comportamiento y rendimiento. En [10] modelaron de forma numérica el rendimiento de un módulo con validación experimental en condiciones climáticas reales en Arabia Saudita.

Por tanto, la caracterización, identificación, modelado y comparación de un módulo en condiciones ambientales reales es necesario para determinar el rendimiento y comportamiento óptimo. Es así que, en este trabajo los autores proponen un análisis donde se caracteriza y modela un módulo fotovoltaico en dos casos, los cuales consideran la inclinación, orientación, radiación, temperatura y sombras para un módulo fijo y con seguimiento solar. Esto con la finalidad de determinar el rendimiento en dichas condiciones y enfatizar en la importancia del ángulo de inclinación y orientación de los módulos fotovoltaicos para maximizar la generación de energía solar fotovoltaica y alcanzar la seguridad energética global futura de manera sostenible y responsable con el medio ambiente.

II. DESARROLLO

El primer caso cuenta con 4 etapas; en la primera se contempla al MFV modelo RNG-100D en posición fija con inclinación a 0° y orientación sur. En la segunda, se mantiene la posición fija y orientación sur, pero se inclina a 23° . La tercera, implica un seguimiento solar de 2 ejes, con base en el algoritmo de Yallop para estimar la trayectoria solar. En estas etapas, se comparan las curvas características de I-V y P-V caracterizadas por los instrumentos de medición (anализador fotovoltaico PROVA 210A, cámara termográfica Fluke y Piranómetro SL-200KIMO) para evaluar y estimar el rendimiento del MFV, con consideración en la orientación, inclinación y condiciones ambientales de irradiancia y temperatura de la celda. En la cuarta, se simula el SDM para estimar y comparar las curvas I-V y P-V de la segunda etapa, con consideración en la caracterización de las condiciones ambientales reales y validar el SDM mediante la determinación de la diferencia porcentual (DP), el error cuadrático medio (RMSE) y el error cuadrático medio normalizado (nRMSE).

En el segundo caso se analiza el efecto de las sombras sobre el MFV, al proyectar una sombra en los 4 cuadrantes (superior-derecha, superior-izquierda, inferior-izquierda e inferior-derecha) de la superficie con orientación sur e inclinación a 0° y 23° para determinar la diferencia de potencia eléctrica generada en el MFV por efecto de la sombra parcialmente uniforme. Por tanto, se desarrolla el análisis del modelado de la posición solar por el algoritmo de Yallop y el SDM en la Sección II, después se describen los resultados de los casos en la sección III. En seguida se realiza una discusión en la Sección IV. Por último, las conclusiones de los casos de estudio se realizan en la Sección V.

A. ALGORITMO DE POSICIÓN SOLAR YALLOP

El algoritmo de Yallop permite determinar la posición del sol respecto a un punto en la tierra, al considerar el tiempo solar verdadero (T_{sv}). Este menciona que la dinámica del tiempo (T_d) es mediante la Ec. (1) y aplica para cualquier año (Y), mes (M), día, hora, minuto y segundo (U_T) Ec. (2) [11-12].

$$t_d = \frac{1}{365.25} \cdot \left(\frac{U_T}{24} + (30.6M + 0.5) + 365.25(Y - 1976) - 8707.5 \right) \quad (1)$$

$$U_t = h + \left(\frac{\text{min}}{60} \right) + \left(\frac{s}{3600} \right)$$

$$M = \begin{matrix} M - 3 \rightarrow M > 2 \\ M + 9 \rightarrow M \leq 2 \end{matrix}, Y = \begin{matrix} Y \rightarrow M > 2 \\ Y - 1 \rightarrow M \leq 2 \end{matrix} \quad (2)$$

Después, es necesario determinar la anomalía media, ecuación de centro (E_c), longitud media elíptica (L_{me}), ascensión corregida (A_c), oblicuidad elíptica (O_b) y el ángulo horario de Greenwich los cuales se describen [13], para calcular ecuación de tiempo corregida (E_{tc}) Ec. (3) y el tiempo solar verdadero (T_{sv}) Ec. (4).

$$E_{tc} = \frac{1}{15} (L_{me} - E_c - A_c) \quad (3)$$

$$T_{sv} = U_t + E_{tc} + \frac{1}{15} (L_{mel} - L_{long}) \quad (4)$$

Donde, (L_{mel}) es la longitud del meridiano estándar local y (L_{long}) es la longitud del meridiano del observador. En seguida, se determina el ángulo de declinación (δ_d) Ec. (5) y el ángulo horario (ω_{hr}) Ec. (6).

$$\delta_d = \tan^{-1} [\tan(O_b) \sin(A_c)] \quad (5)$$

$$\omega_{hr} = \frac{15[T_{sv} - (12 \cdot 60)]}{60} \quad (6)$$

Por tanto, para determinar la posición del sol en una hora y lugar se debe conocer la altitud solar (α_{as}) Ec. (7), ángulo cenital (θ_{cen}) Ec. (8) y ángulo acimutal (γ_{acim}) Ec. (9).

$$\alpha_{as} = \sin^{-1} [\sin(\varphi_{lat}) \sin(\delta_d) + \cos(\varphi_{lat}) \cos(\omega_{hr}) \cos(\delta_d)] \quad (7)$$

$$\theta_{cen} = \cos^{-1} [\sin(\varphi_{lat}) \sin(\delta_d) + \cos(\varphi_{lat}) \cos(\omega_{hr}) \cos(\delta_d)] \quad (8)$$

$$\gamma_{acim} = \sin^{-1} \left[\frac{\sin(\omega_{hr}) \cos(\delta_d)}{\cos(\alpha_{as})} \right] \quad (9)$$

Donde, (φ_{lat}) es la latitud donde se encuentra el módulo fotovoltaico. Por tanto, el algoritmo de Yallop permite estimar la trayectoria solar y obtener el ángulo óptimo de inclinación del MFV respecto al ángulo acimutal, Fig. 1.

B. MODELADO DE DIODO SIMPLE DEL MÓDULO FOTOVOLTAICO

La estimación del comportamiento de las características eléctricas de un MFV se obtiene del circuito equivalente de una célula fotovoltaica, Fig. 2. El circuito permite obtener los parámetros fundamentales a través de las leyes Kirchhoff, la cual se define por la Ec. (10).

$$I = I_{ph} - I_D - I_{RSH} \quad (10)$$

Donde, la corriente fotoeléctrica (I_{ph}) se define por la Ec. (11) y (G) es la radiación que impacta en el módulo en condiciones reales, (G_r) es la radiación en condiciones STC, (I_{sc}) es la corriente de corto circuito, (K_T) es el coeficiente de temperatura en corto circuito, (T) es la temperatura de la celda en condiciones reales y (T_r) es la temperatura de la celda en condiciones STC [4].

$$I_{ph} = \frac{G}{G_r} [I_{sc} + K_T(T - T_r)] \quad (11)$$

Asimismo, la corriente del diodo (I_D) se define por la Ec. (12), donde: (A_0) es el factor de idealidad, (q) la carga del electrón, (E_g) la energía de la banda muerta, (k) la constante de Boltzmann, (I_{RS}) la corriente de saturación inversa, (N_s) el número de celdas del módulo, (V_{oc}) el voltaje de circuito abierto y (V) el voltaje de salida de la Fig. 2 [14].

$$I_D = I_{sc} \left(\frac{T}{T_r} \right)^{\frac{3}{A_0}} \frac{\left[\exp\left(\frac{qE_g T - T_r}{kA_0 T T_r} \right) \right] \left[\exp\left(\frac{q(V + I_{RS})}{kA_0 T} \right) \right]}{\left[\exp\left(\frac{qV_{oc}}{N_s k A_0 T} \right) \right]^{-1}} \quad (12)$$

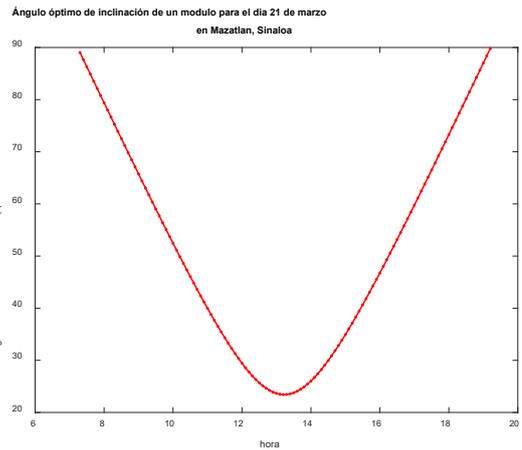


Fig. 1. Ángulo óptimo de inclinación de un módulo fotovoltaico para el día 21 de marzo en Mazatlán, Sinaloa.

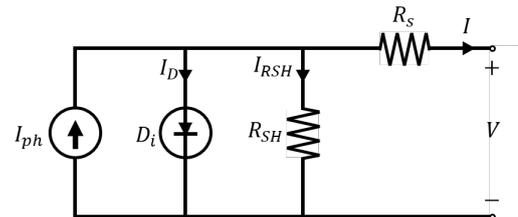


Fig. 2. Diagrama de circuito del modelo de diodo simple (módulo fotovoltaico).

La corriente que fluye por la resistencia en derivación (I_{RHS}) se determina por la Ec. (13).

$$I_{RSH} = \frac{V + IR_S}{R_{SH}} \quad (13)$$

Por tanto, al sustituir las Ec. (11-12-13) en la Ec. (10) con los parámetros de la Tabla I, se modela las curvas características de I-V y P-V, Fig. 3.

III. RESULTADOS

A. CASO 1:9 y 16 HORAS

En las Fig. 4 y Fig. 5, se muestra el comportamiento de las curvas I-V y P-V del MFV en posiciones fijas a 0° y 23° con orientación sur y del sistema con seguimiento solar, en el cual se determina DP del sistema de seguimiento solar respecto a las posiciones fijas con orientación sur, para las 9 y 16 horas del día 21 de marzo en Mazatlán. En dicho periodo de tiempo se observa el impacto de la orientación e inclinación, donde el sistema de seguimiento ofrece un DP en el rendimiento de 43.46% y 46.51% para el módulo con orientación sur e inclinación a 23° y 0° respectivamente Fig. 4 (b), la cual difiere con un rendimiento de 19.13% y 43.32% para las inclinaciones a 23° y 0° respectivamente Fig. 5 (b). Esto a razón del movimiento del sol, donde a las 16 horas el ángulo de 23° se encuentra cercano al ángulo óptimo Fig. 1.

A partir del análisis del comportamiento del transcurso completo del día 21 de marzo en Mazatlán, se determina que el sistema de seguimiento ofrece un aumento de rendimiento promedio de 30.57% en comparación a el módulo fijo a 23° y 43.95% para el módulo fijo a 0° . Asimismo, el módulo con inclinación a 23° el aumento de rendimiento en comparación al módulo a 0° es del 15% y se fundamenta por el movimiento, altura y ángulo acimutal del sol, que permite un mejor impacto de radiación al módulo, lo cual se traduce a una radiación mayor en el módulo con inclinación a 23° . También, se observó un mayor incremento de temperatura de la celda en el MFV instalado a 0° de 12.9°C respecto al MFV a 23° y el seguimiento solar, alcanzando temperaturas de 55.5°C . Donde la posición horizontal permite un menor flujo de viento para disminuir dicha temperatura por un flujo de convección natural al medio ambiente.

Se observó a partir del análisis del transcurso completo del día 21 de marzo en Mazatlán, que el MFV al seguir la trayectoria solar con fundamento en el algoritmo de Yallop se capta un 40% más de radiación solar para la generación de energía eléctrica que los MFV fijos considerados. Por tanto, la trayectoria solar es un parámetro clave que se deben considerar en los diseños de sistemas fotovoltaicos para pronosticar el mayor rendimiento, a razón de influir en la orientación, inclinación y temperatura de la instalación de módulos fotovoltaicos.

En la Fig. 6, se muestra la comparación de las curvas de I-V y P-V del MFV inclinado a 23° con orientación sur vs el SDM Ec. (10), en el cual se verifica la DP en la precisión del modelo para reproducir el comportamiento del módulo fotovoltaico en las condiciones ambientales a las 16 horas del día 21 de marzo en Mazatlán, Sinaloa.

Se determina que el SDM permite replicar las características eléctricas del MFV en condiciones ambientales reales con alto grado de similitud al determinar un RMSE de 0.46%, nRMSE de 0.38% y DP de 5.78% para la característica de la corriente eléctrica. Asimismo, el RMSE, nRMSE y DP es de 8.72%, 5.16% y 9.5% para replicar la característica eléctrica de la potencia, con una fuerte correlación entre el SDM y las mediciones experimentales con un $r^2 \approx 0.99$, Fig. 7.

TABLA I. CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DEL MÓDULO RNG-100D.

Parámetros	Valores 1
Potencia	100 W
Voltaje máximo	18.9 V
Corriente máxima	5.29 A
Voltaje de circuito abierto	22.5 V
Corriente de corto circuito	5.75 A
Número de celda	36

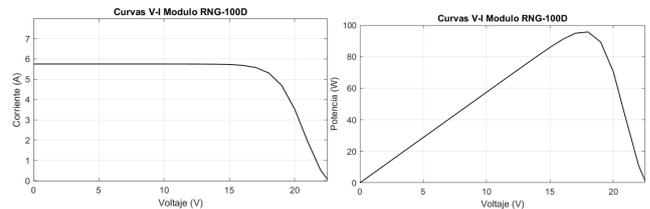


Fig. 3. Curva características módulo fotovoltaico RNG-100D en condiciones STC.

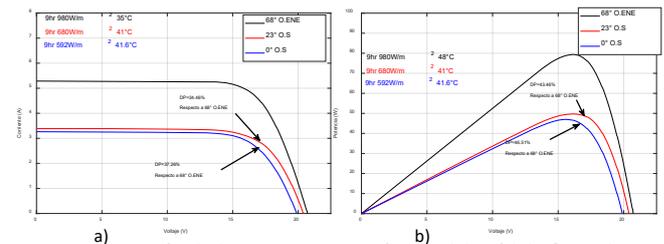


Fig. 4. Comparación de las curvas características del módulo fotovoltaico RNG-100D por el analizador fotovoltaico inclinado a 0° 23° orientado al sur y seguimiento solar a las 9:00 h en condiciones climáticas. a) curvas I-V b) curvas P-V.

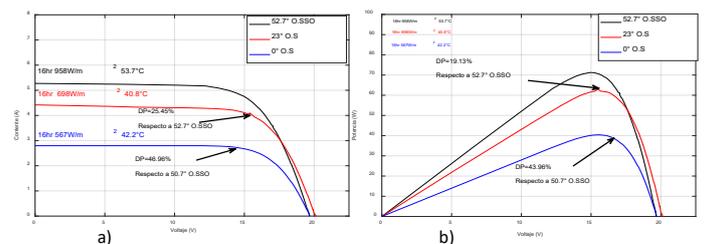


Fig. 5. Comparación de las curvas características del módulo fotovoltaico RNG-100D por el analizador fotovoltaico inclinado a 0° y 23° orientado al sur y seguimiento solar a las 16:00 h en condiciones climáticas. a) curvas I-V b) curvas P-V.

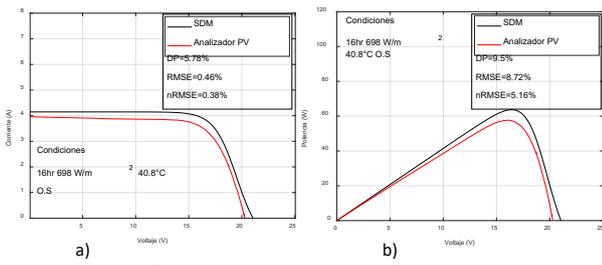


Fig. 6. Comparación de las curvas características del SDM RNG-100D mediante el analizador fotovoltaico y el SDM inclinado a 23° orientado al sur. a) curvas I-V b) curvas P-V.

B. CASO 2:10 y 15 HORAS

En la Fig. 8 se muestra la técnica de sombreado implementada sobre el MFV en los 4 cuadrantes con presencia de albedo. El comportamiento de las curvas I-V y P-V mediante la técnica de sombreado del MFV en posición fija a 23° y 0° con orientación sur, se muestra en las Fig. 9 y 10 y Fig. 11 y 12 respectivamente. El comportamiento del MFV en presencia de sombras se analiza respecto a la caracterización del primer caso en condiciones ambientales reales, para determinar la afectación porcentual por sombra en los cuatro cuadrantes en el transcurso del día 21 de marzo en Mazatlán, Sinaloa. Donde, la afectación por presencia de sombra parcialmente uniformes en los diferentes cuadrantes permite una reducción de hasta el 55% del rendimiento, sin supresión efectiva de los diodos de derivación Fig. 9 (b) (cuadrante 1, 3 y 4), Fig. 10 (b) (cuadrante 1 y 2), Fig. 11 (b) (cuadrante 1, 2 y 3), Fig. 12 (b) (cuadrante 1 y 3). Sin embargo, con supresión efectiva en los diodos de derivación, se determina una reducción hasta el 90% del rendimiento.

Esto a razón del área de sombra proyectada en el área de las celdas, la cual tiene un mayor impacto negativo al interrumpir la interconexión de los circuitos de las celdas y no directamente al área.

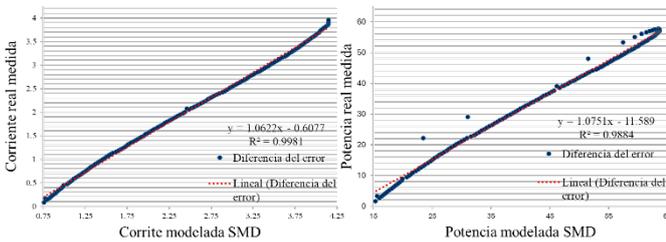


Fig. 7. Dispersión de correlación de la medición real y SDM. a) análisis para curva de corriente b) análisis para curva de potencia.

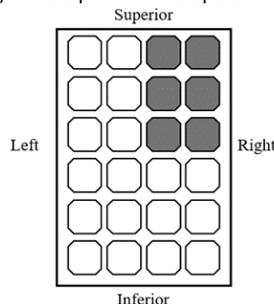


Fig. 8. Proyección de sombras en el MFV RNG-100D.

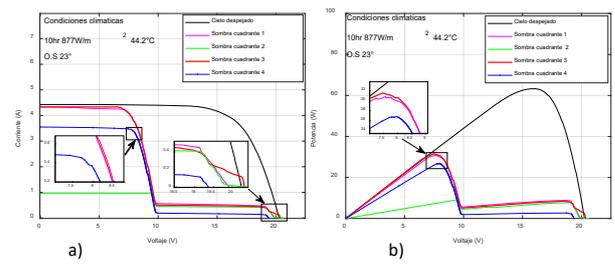


Fig. 9. Comparación de las curvas características del MFV inclinado a 23° con proyección de sombra en los cuatro cuadrantes a las 10:00 hrs. a) curvas I-V b) curvas P-V.

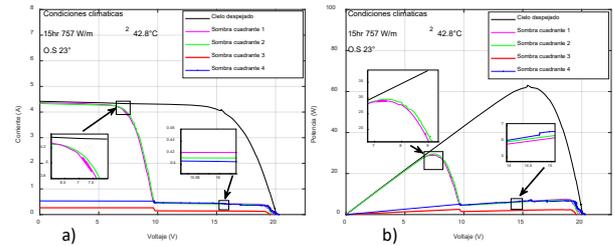


Fig. 10. Comparación de las curvas características del MFV inclinado a 23° con proyección de sombra en los cuatro cuadrantes a las 15:00 hrs. a) curvas I-V b) curvas P-V.

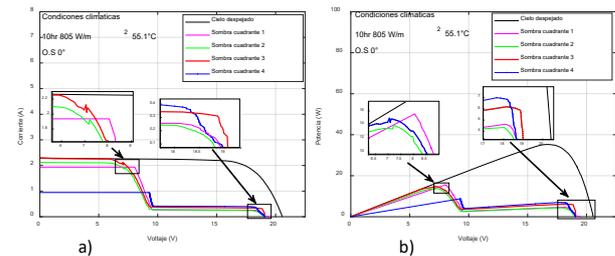


Fig. 11. Comparación de las curvas características del MFV inclinado a 0° con proyección de sombra en los cuatro cuadrantes a las 10:00 hrs. a) curvas I-V b) curvas P-V.

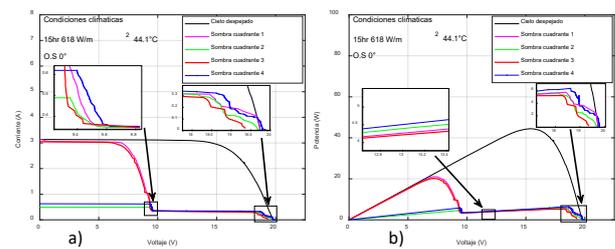


Fig. 12. Comparación de las curvas características del MFV inclinado a 0° con proyección de sombra en los cuatro cuadrantes a las 15:00 hrs. a) curvas I-V b) curvas P-V.

Los cuadrantes con menor rendimiento son el 4 y 3, estos se presentaron en la mañana y en la tarde respectivamente. Las reducciones del rendimiento se relacionan con la trayectoria del sol en el transcurso del día, en la mañana en el cuadrante 4 la irradiancia reflejada (albedo) no incide en la superficie del módulo fotovoltaico, en consecuencia, existe mayor reducción del rendimiento y en la tarde ocurre el evento similar en el cuadrante 3. Por tanto, toman relevancia

las MFV con la tecnología *Half Cell* las cuales permiten reducir las pérdidas en el rendimiento al contar con más diodos de bloqueo [15].

IV. DISCUSIÓN

Se ha demostrado el análisis de la trayectoria solar influye en la orientación, inclinación y temperatura del módulo fotovoltaico, la cual toman un rol importante en el desempeño de los sistemas fotovoltaicos a razón de los resultados de los rendimientos en condiciones ambientales reales del módulo fotovoltaico. Donde, a través de los casos de análisis se determinaron mayores rendimientos en el sistema de seguimiento solar de 43.46% y 46.51% en comparación a los MFV inclinados a 23° y 0° respectivamente. Por tanto, a través del algoritmo de la trayectoria solar de Yallop se permite determinar los ángulos óptimos para diferentes ubicaciones de estudio y la influencia de la afectación de las sombras. En [13] modelaron dicho algoritmo en diferentes ubicaciones, donde realizaron una interfaz gráfica para la aplicación y la estimación anual o diaria de diferentes ángulos del astro solar. Por tanto, el algoritmo de Yallop es una herramienta confiable para orientar e inclinar los módulos fotovoltaicos y no es necesario realizar una evaluación exhaustiva de diferentes ángulos de inclinación y acimut como se realizó en [16] para determinar el ángulo óptimo de 32.08° en Turquía. Sin embargo, la evaluación exhaustiva del rendimiento del módulo fotovoltaico permite una perspectiva realista del rendimiento global del módulo fotovoltaico y del sistema fotovoltaico. Por tanto, los resultados obtenidos son válidos para las caracterizaciones ambientales realizadas el día 21 de marzo en Mazatlán, Sinaloa.

V. CONCLUSIONES

A partir del primer estudio, se concluye que la orientación, inclinación y temperatura impacta en el rendimiento del módulo fotovoltaico en condiciones ambientales reales. Por tanto, mediante los sistemas de seguimiento de 2 ejes se obtiene el mayor rendimiento energético, a razón de aprovechar la trayectoria solar y los ángulos cenital, acimutal y altura solar, para aumentar y optimizar el rendimiento y tiempo útil de producción de energía eléctrica.

El análisis de la trayectoria solar permite considerar y relacionar tecnologías para diseñar sistemas fotovoltaicos eficientes como; el montaje de MFV con una inclinación y orientación fija que maximicen en dicha inclinación la exposición solar, el impacto negativo de una inclinación a 0° sin flujo convección natural y la utilización sistemas de seguimiento solar, las cuales en conjunto con tecnologías *Half Cell*, sistemas de *Maximum Power Point Trackin* y sistemas de enfriamiento y recolección de energía térmica como los módulos fotovoltaicos híbridos permiten maximizar la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos.

Asimismo, a través del SDM es posible replicar el comportamiento del módulo fotovoltaico en condiciones reales, lo cual permite caracterizar de manera previa su rendimiento para aplicarse en el análisis y diseño de sistemas fotovoltaicos.

El rendimiento del módulo fotovoltaico es dependiente de la radiación incidente en la superficie, ya que en presencia de sombras este disminuye. En el segundo estudio, se determinó que las sombras en los diferentes cuadrantes del modulo reducen hasta un 90% al anular los diodos de derivan de la conexión serie y paralelo de las celadas. Además, el rendimiento del módulo fotovoltaico con presencia de sombras parcialmente uniformes en los diferentes cuadrantes del módulo; se relaciona con la trayectoria solar, a razón de la irradiancia difusa y reflejada que cambian con la posición del sol.

REFERENCIAS

- [1] M. Parvez, M. F. M. Elias, N. A. Rahim, and N. Osman, "Current control techniques for three-phase grid interconnection of renewable power generation systems: A review," *Sol. Energy*, vol. 135, pp. 29–42, 2016, doi: 10.1016/j.solener.2016.05.029.
- [2] H. J. E. García, "Impacto de intermitencia solar en producción energética por Fotovoltaicos como pronosticador en Sistemas Cero Energía," *Identidad Energética*, Vol. 5, No. 2, pp. 53–60 Dic., 2022.
- [3] C. Vimalarani and N. Kamaraj, "Modeling and performance analysis of the solar photovoltaic cell model using Embedded MATLAB," *Simul. Trans. ofthe Soc. Model. Simul. Int.*, vol. 91, no. 3, pp. 1–16, 2015, doi: 10.1177/0037549714568535.
- [4] Galán Hernández, Néstor Daniel; Ontiveros Mireles, Joel; Rubio Astorga, Guillermo Javier; Mejías Brizuela and J. Cañedo, "Caracterización experimental de un panel fotovoltaico bajo la radiación solar de mazatlán, sinaloa," in *Convención Científica Internacional 2017, Ciencia, Tecnología y Sociedad. Perspectivas y Retos*, Cuba: Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, 2017, pp. 1–16.
- [5] M. S. A. Kareem and M. Saravanan, "A novel modeling approach to predict the output performance of photovoltaic modules under different environmental conditions," *Simul. Trans. ofthe Soc. Model. Simul. Int.*, vol. 94, no. 10, pp. 1–12, 2018, doi: 10.1177/0037549718761208.
- [6] S. Hamou, S. Zine, and R. Abdellah, "Efficiency of pv module under real working conditions," in *The International Conference on Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability, TMREES14*, Energy Procedia, 2014, pp. 553–558. doi: 10.1016/j.egypro.2014.06.067.
- [7] M. Arslan and M. Çunkaş, "An experimental study on determination of optimal tilt and orientation angles in photovoltaic systems," *Journal. Engineering. Research.*, no. 2. DIC 2023, 2024, doi: 10.1016/j.jer.2024.07.015.
- [8] D. Ben hmamou, "Experimental characterization of photovoltaic systems using sensors based on microbab card: Design, implementation, and modeling," *Renew. Energy*, vol. 223, p. 120049, 2024, doi: 10.1016/j.renene.2024.120049.
- [9] S. Gulkowski, "Modeling and Experimental Studies of the Photovoltaic System Performance in Climate Conditions of Poland," *Energies*, vol. 16, no. 20, 2023, doi: 10.3390/en16207017.

- [10] H. Bahaidarah, S. Rehman, A. Subhan, P. Gandhidasan, and H. Baig, "Performance evaluation of a PV module under climatic conditions of Dhahran, Saudi Arabia," *Energy Explor. Exploit.*, vol. 33, no. 6, pp. 909–930, 2015, doi: 10.1260/0144-5987.33.6.909.
- [11] T. Muneer, *Solar radiation and daylight models (with software available from companion web site)*. London: Taylor & Francis Group, 2016. doi: 10.4324/9780080474410.
- [12] D. W. Hughes, B. D. Yallop, and C. Y. Hohenkerk, "The Equation of Time," *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, vol. 238, no. 4, pp. 1529–1535, 1989, doi: 10.1093/mnras/238.4.1529.
- [13] J. Guillermo, "Modelado matemático de la trayectoria y recurso solar en tres ciudades del edo. de Guerrero para implementación de sistemas fotovoltaicos," *Académica del Quehacer Universitario*, vol. 1, no. 2, pp. 77–84, 2018.
- [14] A. Rai, B. Awasthi, A. Dixit, and C. K. Dwivedi, "Modeling of solar photovoltaic module and study parameter variation effect using MATLAB/Simulink," *ICCCCM 2016 - 2nd IEEE Int. Conf. Control Comput. Commun. Mater.*, no. July, 2017, doi: 10.1109/ICCCCM.2016.7918239.
- [15] Z. Yang, K. Liao, J. Chen, L. Xia, and X. Luo, "Output performance analysis and power optimization of different configurations half-cell modules under partial shading," *Optik (Stuttg.)*, vol. 232, no. February, p. 166499, 2021, doi: 10.1016/j.ijleo.2021.166499.
- [16] D. A. R. Barkhouse, O. Gunawan, T. Gokmen, T. K. Todorov, and D. B. Mitzi, "Optimizing performances of photovoltaics in Reunion Island—tilt angle," *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 20, no. 1, pp. 6–11, 2015, doi: 10.1002/pip.

BIOGRAFÍAS



MIGUEL A. CISNEROS A. Obtuvo el grado de Ingeniería en Energías Renovables por el TecNM Campus Culiacán en junio de 2021. Actualmente, es estudiante de posgrado en el campus Culiacán del TecMN. Sus líneas de investigación actuales incluyen el modelado de sistemas y sistemas de producción de energía renovable.



JOEL J. ONTIVEROS M. En 2010 obtuvo el título de Ingeniero Eléctrico por el Tecnológico Nacional de México/Campus Culiacán, en el 2016 el grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería, en la especialidad de Mecatrónica y Control por el Tecnológico Nacional de México, en el 2020 el grado Doctorado en Ciencias de la Ingeniería en la línea de Instrumentación y Control. Cuenta con

diversas estancias en diferentes universidades y centros de investigación en el país como el CINVESTAV unidad Guadalajara, línea de investigación de sistemas eléctricos de potencia donde participó en una estancia posdoctoral en el proyecto "Regulación de frecuencia de sistemas fotovoltaicos a gran escala interconectados a la red eléctrica nacional en México". Cuenta con experiencia impartiendo clases y cursos para las licenciaturas de Ing. Eléctrica, Ing. Electrónica, Ing. Energías Renovables e Ing. Mecatrónica y en nivel posgrado en maestrías relacionadas en temas de marco regulatorio de la industria eléctrica y derecho energético. Asesor de proyectos de investigación para tesis de nivel licenciatura y posgrado. Las líneas de interés son: el control de inversores para aplicaciones en sistemas fotovoltaicos, generación de energía eléctrica mediante fuentes renovables, uso eficiente de la energía y calidad de la energía.



EBER E. OROZCO G. Es Licenciado en Física por la Universidad de los Andes (Venezuela), cuenta con Maestría y Doctorado en Ciencias por el Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica (INAOE-México), además tiene una especialidad en Formación de Docentes. Actualmente es profesor a tiempo completo en la carrera de Ing. en Energía de la Universidad Politécnica de Sinaloa en Mazatlán.



NÉSTOR D. GALÁN H Obtuvo el grado de Ingeniero Electromecánico por el Instituto Tecnológico de Acapulco, México. La maestría y el Doctorado en Ciencias en el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN (CINVESTAV-Guadalajara), México, en la especialidad de Sistemas Eléctricos de Potencia. Actualmente es profesor de tiempo completo en la carrera de Ing. en Energías de la Universidad Politécnica de Sinaloa en Mazatlán México. Sus líneas de interés son los Sistemas de Potencia, Generación Distribuida con Energías Renovables.



GUILLERMO J. RUBIO A. Recibió el título de Ingeniero en Ingeniería Eléctrica del Instituto Tecnológico de Culiacán, en 1998, en 2001 obtuvo el grado de Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica por el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Campus Guadalajara, México, y el grado de Doctor en Ciencias por el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Campus Guadalajara, México, en 2013. Sus líneas de investigación actuales incluyen el control no lineal de máquinas eléctrica.