

Aspectos que afectan la eficiencia en los paneles fotovoltaicos y sus potenciales soluciones

Cepeda, Juan. Sierra, Adriana.

Facultad de Ingeniería Mecánica

Universidad Santo Tomás

Bogotá, Colombia

juan.cepeda@usantotomas.edu.co

adriana.sierra@usantotomas.edu.co

Resumen

La energía solar fotovoltaica se muestra como una buena alternativa para suplir el aumento de la demanda energética actual, ya que se tiene una disponibilidad de recurso inagotable y a la hora de producir energía no genera grandes impactos ambientales en comparación a las fuentes convencionales que utilizan recursos fósiles. El objetivo de este trabajo es revisar los factores que afectan la eficiencia de un panel solar fotovoltaico y determinar los avances científicos que se han propuesto para reducir estos factores. La eficiencia y potencia entregada por un panel fotovoltaico son condiciones que se ven afectadas, principalmente por aspectos ambientales y tecnologías utilizadas en su proceso de fabricación.

Palabras clave

Eficiencia, energías renovables, máximo punto de potencia (MPP), panel fotovoltaico, variaciones climáticas.

Tabla de Contenido

1.	Introducción	2
2.	Sistemas fotovoltaicos	3
2.1	Funcionamiento de las Celdas fotovoltaicas.....	3
2.2	Tecnologías de fabricación de células solares	3
2.2.1	Células mono-cristalinas	4
2.2.2	Células poli-cristalinas.....	4
2.2.3	Células de película delgada	4
2.3	Métodos para determinar la eficiencia de un panel fotovoltaico	4
2.3.1	Eficiencia en la conversión de energía	5
2.3.2	Eficiencia de Factor de forma.....	5
3.	Factores que afectan la eficiencia en los paneles fotovoltaicos.....	5
3.1	Factores propios del panel.....	5
3.1.1	Temperatura de funcionamiento del panel fotovoltaico.....	5
3.1.2	Efecto de la reflexión y suciedad en la superficie de los paneles solares	6
3.2	Factores externos del panel	6
3.2.1	Efecto de las variaciones climáticas	6
3.2.2	Ángulo de inclinación de los paneles fotovoltaicos	7
3.2.3	Sombreado en la superficie del panel solar.....	7
4.	Conclusiones	7

1. Introducción

En la actualidad, la demanda mundial de energía aumenta significativamente por el crecimiento de la población y la evolución industrial [1]. Esto ocasiona grandes inconvenientes ambientales, debido a que en su mayoría seguimos utilizando fuentes convencionales para la generación de energía. Aproximadamente el 86% de la energía consumida a nivel mundial proviene de fuentes fósiles, mientras que el 19% restante proviene de fuentes renovables asociadas al uso tradicional de la biomasa y centrales hidroeléctricas como se representa en la Fig. 1. [2], El uso de petróleo, gas y carbón producen cerca de 13.700 millones de toneladas de CO₂ que se concentran directamente en la atmósfera, esto ocasionando un incremento en la temperatura media terrestre, aumentando los niveles del mar, fenómenos de erosión y salinización en áreas costeras y propagación de enfermedades infecciosas entre otros [3]. El abuso por la sobre-explotación y el uso de los combustibles fósiles han ocasionado serios daños al medio ambiente: gases de efecto invernadero, contaminación del agua, suelo y daños irreparables a los sistemas ecológicos [4].

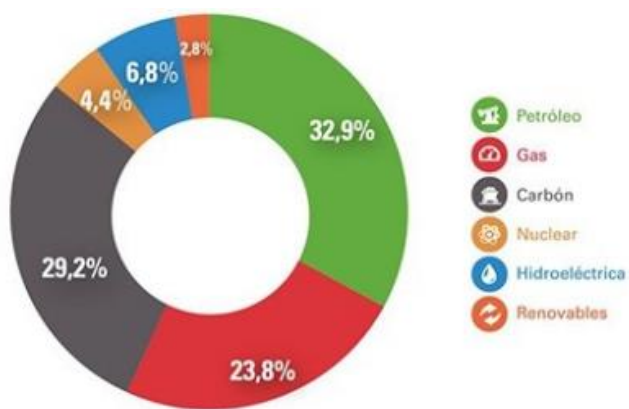


Fig. 1. Explotación y producción mundial de recursos energéticos primarios en el año 2015 [2].

Los problemas ambientales y de cambio climático que ha permitido que las energías renovables se posicionen en el mundo como una importante alternativa ya que son fuentes de energía limpia, inagotables y de creciente competitividad, debido a factores como el aumento de la rentabilidad de las tecnologías renovables, iniciativas de política aplicada, un mejor acceso al financiamiento, seguridad energética y cuestiones de medio ambiente[5].

La energía solar fotovoltaica se ha convertido en una alternativa para generar energía, puesto que cuenta con una disponibilidad de recurso inagotable [6], no requiere de una gran infraestructura, es práctica y segura y lo más importante no ocasiona impactos ambientales [7]. Esto ha permitido un incremento del 25% en el mercado de la energía solar fotovoltaica con respecto al 2014, rompiendo un récord de 50 GW y aumentando el total mundial a 227 GW para el año 2015. Como se puede observar en la Fig. 3 países como China, Alemania, Japón y Estados Unidos reportaron la mayor parte de capacidad instalada en 2015 [8].

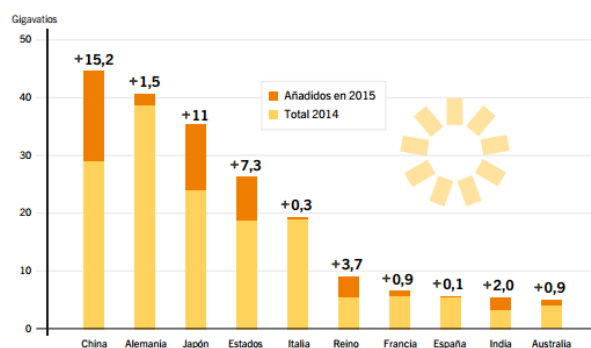


Fig. 2. Capacidad y adiciones de energía solar FV, diez países líderes, 2015 [8].

En el caso de Colombia para el año 2010 tenía alrededor de 9 MW de capacidad solar fotovoltaica instalada [9]. El gobierno colombiano Según la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) está desarrollando proyectos en la costa Atlántica de generación solar que aumentara la capacidad instalada de 120,2 MW para el año 2029, según el plan de desarrollo energético de la UPME del 2014.

En la actualidad, esta tecnología está bien posicionada con respecto a los demás tipos de energías renovables debido a su simplicidad para ser utilizada en puntos aislados de red, zonas rurales o de difícil acceso, requieren de un mantenimiento sencillo, modular y muy versátil, adaptable a diferentes situaciones [10]. Sin embargo, todavía hay espacio para mejoras adicionales principalmente en las celdas solares, que son los elementos más importantes para este tipo de generación de energía. La eficiencia de las celdas solares es probablemente el elemento más determinante para el funcionamiento de un sistema fotovoltaico por lo cual, aumentar la eficiencia mitigando los factores que afectan

el rendimiento de las celdas se ha convertido en el principal foco de investigación en los últimos años.

2. Sistemas fotovoltaicos

Un sistema fotovoltaico es el conjunto de equipo eléctrico y electrónico que producen energía eléctrica a partir de la radiación solar por medio del efecto foto eléctrico [11]. Los sistemas fotovoltaicos pueden ser, sistemas autónomos y sistemas interconectados a la red eléctrica. Los sistemas autónomos por medio de un panel solar producen energía [12], para posteriormente ser almacenada en las baterías para disponer de ella en cualquier momento. En la Fig. 3 se presentan los equipos típicos que componen una instalación fotovoltaica autónoma.



Fig. 3. Componentes de una instalación fotovoltaica autónoma [13].

En las instalaciones fotovoltaicas interconectadas a la red, la energía se pone a disposición del usuario a través de la red eléctrica para esto se requiere unos equipos adicionales como se muestra en la Fig. 4.

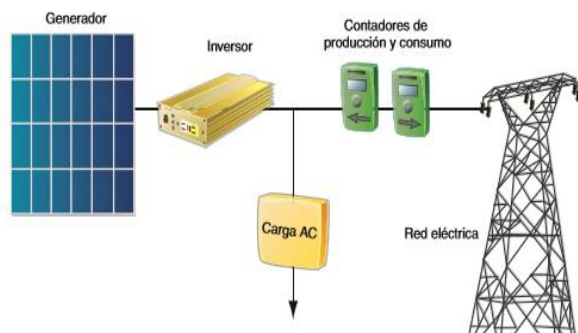


Fig. 4. Componentes de una instalación fotovoltaica conectada a la red [13].

2.1 Funcionamiento de las Celdas fotovoltaicas

Una celda fotovoltaica, es un dispositivo electrónico que permite transformar la energía luminosa (fotones) en energía eléctrica (electrones) mediante el efecto

fotovoltaico. Las celdas están conformadas por materiales semiconductores que controlan el flujo de electrones para formar corrientes eléctricas. Como se puede observar en la Fig.5 las células contienen dos capas de materiales semiconductores. La capa superior de tipo N (carga negativa) se encuentra dopada con átomos de fósforo y la capa inferior de tipo P (carga positiva) generalmente se encuentra dopada con átomos de boro [14].

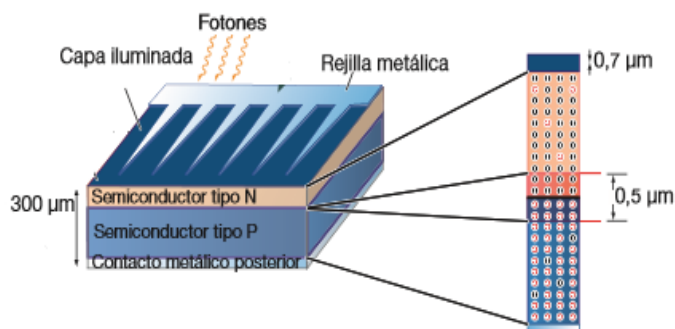


Fig. 5. Composición de una celda fotovoltaica [13]

Cuando un rayo de luz incide sobre la celda, se libera un electrón de la capa P que es atraído por la carga de la capa positiva N, el desplazamiento del electrón deja un hueco cerca de la unión de estas dos capas, otro electrón próximo a la capa P asciende para llenar el hueco. A medida que la luz incide en la celda, liberan electrones produciendo una corriente eléctrica, a este fenómeno se le denomina efecto foto eléctrico [15].

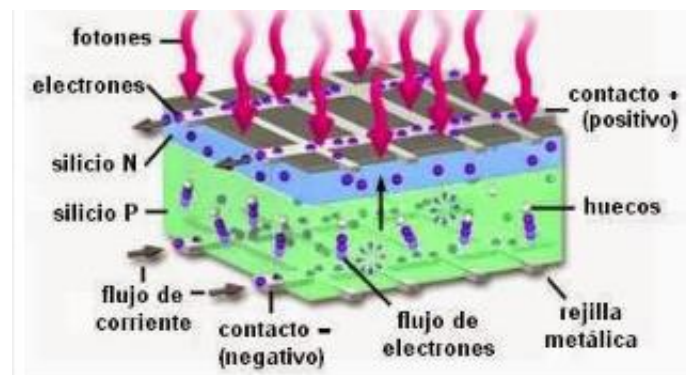


Fig. 6. Flujo de electrones en una célula solar [13]

2.2 Tecnologías de fabricación de células solares

Los módulos fotovoltaicos están compuestos por células solares, estas comúnmente se fabrican de silicio ya que este material existe en gran abundancia en la tierra, cuenta con una baja tasa de contaminación, presenta una alta durabilidad en el tiempo y cuenta con sobresalientes propiedades fisicoquímicas [16]. Las células de silicio se pueden clasificar en tres tipos dependiendo su proceso de

fabricación: Celdas solares mono-cristalinas, poli-cristalinas y de película delgada o amorfas [17].

2.2.1 Células mono-cristalinas

Las células mono-cristalinas se cortan en obleas delgadas de un cristal continuo (silicio), cada célula presenta un color uniforme normalmente va desde el azul al negro (ver Fig. 7). El silicio utilizado en este tipo de célula presenta alta pureza y una estructura cristalina perfecta. Como resultado del proceso de fabricación, las células tienen alrededor de $10 \times 10 \text{ cm}^2$ y $350 \mu\text{m}$ de espesor, con una eficiencia de uso directo entre el 14-17% [18].

2.2.2 Células poli-cristalinas

Las células poli-cristalinas están hechas de material de silicio similar al de la mono-cristalina, excepto que en lugar de crecer en un solo cristal, se funden y se vierten en un molde. Esto forma un bloque cuadrado que puede cortarse en obleas cuadradas. A medida que el material se enfría, se cristaliza de una manera imperfecta, formando tonalidades de colores diferentes en su superficie. Las células poli-cristalinas con iguales dimensiones y condiciones alcanzan un rendimiento de hasta el 12% [18].

2.2.3 Células de película delgada

Las células de película delgada son de silicio o se produce a partir de nuevos materiales, como el arseniuro de galio, telurio de cadmio o el Cobre Indio Diselenido. Estas células también llamadas amorfas están protegidas por medio de encapsulación con vidrio frontal y uno de protección posterior. La eficiencia de estas células se pueden observar en la Fig. 7 [18].

En la Fig. 7 se presentan dos tipos de eficiencia, en laboratorio y directa o de uso. La eficiencia en laboratorio es mucho mayor debido a que al estudiar las células se hace bajo condiciones estándar esto quiere decir. Irradiación de 1000 W/m^2 , temperatura de la célula 25°C y distribución espectral de 1.5 AM. Las células de eficiencia directa o de uso, se estudian bajo condiciones ambientales normales donde se puede presentar una baja irradiación, aumentar más de 25°C la temperatura da la célula, esto afectando directamente la eficiencia.

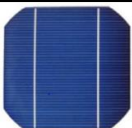
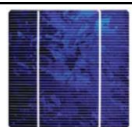
CÉLULA		EFICIENCIA EN LABORATORIO	EFICIENCIA DIRECTA
	Mono-cristalina	24%	14-17 %
	Poli-cristalina	19-20%	11-14%
	De película delgada (amorfas)	16%	<10%

Fig. 7. Células mono-cristalinas, poli-cristalinas, de película delgada y sus eficiencias [19][20].

2.3 Métodos para determinar la eficiencia de un panel fotovoltaico

La conversión de energía y el factor de forma son dos métodos para determinar la eficiencia de panel fotovoltaico. En ambos casos es indispensable conocer el punto de máxima potencia (P_{mp}), el P_{mp} corresponde cuando el panel puede entregar su máxima potencia. Este se obtiene cuando el voltaje (V_{mp}) y la corriente (I_{mp}) alcanzan sus valores máximos de forma simultánea (ver Fig. 7).

Este valor se determina de acuerdo a la ecuación (1).

$$P_{mp} = V_{mp} \times I_{mp} \quad (1)$$

Donde:

P_{mp} : Punto de potencia máxima

V_{mp} : Voltaje de máxima potencia

I_{mp} : Corriente de máxima potencia

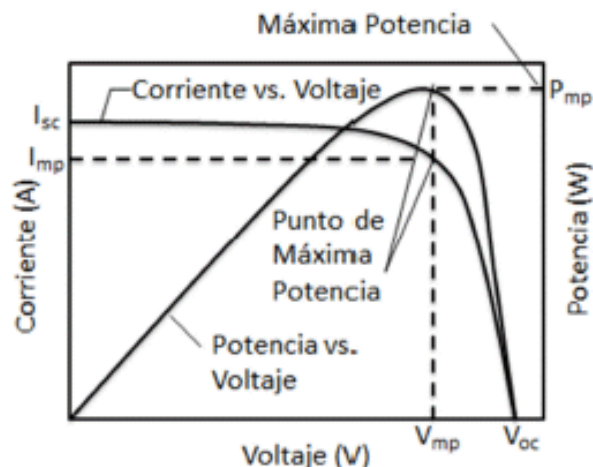


Fig. 9. Curva de productos corriente-voltaje y curva I-V [21].

2.3.1 Eficiencia en la conversión de energía

Corresponde al porcentaje de energía eléctrica generada en relación a la cantidad de energía luminosa recibida desde el sol, cuando el panel se encuentra conectado a un circuito eléctrico. Se determina con la ecuación (2) [14] [22].

$$\eta = \frac{P_{mp}}{E \times A_c} \quad (2)$$

Donde:

E : Nivel de radiación sobre la superficie del panel (W/m^2), bajo condiciones estándar.

A_c : Superficie del panel fotovoltaico (m^2)

2.3.2 Eficiencia de Factor de forma

Define la eficiencia de un panel solar, relacionando el punto de máxima potencia, dividido por el producto entre el voltaje a circuito abierto y la corriente de cortocircuito. Como se muestra en la Ecuación (3) [14].

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

V_{oc} : Voltaje a circuito abierto

I_{sc} : Corriente de cortocircuito

Los valores de voltaje de circuito abierto y corriente de circuito se pueden ver representados en la Fig. 7.

3. Factores que afectan la eficiencia en los paneles fotovoltaicos

En la última década se han desarrollado investigaciones para identificar las factores que afectan el funcionamiento de los paneles fotovoltaicos [23], con el fin de mitigar sus efectos y lograr mejoras significativas en términos de eficiencia para este tipo de sistemas. Dichos factores se clasifican en propios o externos de acuerdo con su naturaleza, de operación o de entorno respectivamente. Variaciones climáticas, alta temperatura de la célula solar y exposición al medio ambiente, por ejemplo, pueden afectar el rendimiento de los paneles solares considerablemente [19].

3.1 Factores propios del panel

Los factores propios son condiciones con las que cuenta el panel solar en su estructura interna que pueden llegar a afectar su funcionamiento, se pueden encontrar factores

como temperatura de funcionamiento del panel y efectos de reflexión y suciedad.

3.1.1 Temperatura de funcionamiento del panel fotovoltaico

La temperatura de funcionamiento del panel fotovoltaico, desempeña un papel clave en el proceso de conversión de energía. Tanto en el rendimiento eléctrico como la potencia de salida del módulo, dependen linealmente de la temperatura de funcionamiento del panel [24].

Los paneles solares absorben en promedio el 80% de la irradiación solar recibida. Sin embargo, una parte de esta irradiación se convierte en electricidad y la restante se convierte en calor [25][26]. La fracción que se convierte en calor aumenta la temperatura del módulo, formando concentraciones de portadores intrínsecos produciendo una mayor saturación de corriente, lo que provoca una reducción en la eficiencia y deterioro en el panel fotovoltaico [27].

Para regular la temperatura de los paneles solares se utilizan varios métodos con el fin de mejorar su eficiencia. De acuerdo a Bahaidarah et al. [28], Chandel [29] y Schiro et al. [30] las técnicas más utilizadas y viables para controlar el aumento de la temperatura de los paneles fotovoltaicos son:

- Aire acondicionado
- Enfriamiento a base de agua
- Enfriamiento por inmersión líquida
- Refrigeración termoelectrica
- Refrigeración del tubo de calor
- Micro-canales
- Intercambiadores de calor mejorado
- Enfriamiento por chorros
- Micro-canales híbridos
- Sistemas de cambio de fase

Shahrestan et al. [31] evaluó el rendimiento energético y térmico de un sistema fotovoltaico naturalmente ventilado, este consistía en aprovechar las corrientes de viento que se presentan en Izmir, Turquía para disminuir la temperatura del panel. Los resultados en dicho estudio mostraron una mejora en la eficiencia hasta del 4% y un aumento en la generación anual de electricidad del sistema entre 4,7 a 5,7%.

Igualmente Zhu et al. [32] adelantó un estudio comparativo entre un módulo fotovoltaico refrigerado por ventilación natural y el mismo módulo refrigerado con

agua. La temperatura del módulo fotovoltaico refrigerado por agua fue menor que la del módulo fotovoltaico refrigerado por ventilación natural. Como resultado, el módulo refrigerado por agua genera una potencia eléctrica superior y por lo tanto una mayor eficiencia.

Lucas et al. [33] Investigó el efecto del enfriamiento evaporativo sobre un panel solar y el uso del calor disipado para un ciclo de refrigeración. Por medio de esta técnica, se estableció una mejora entre el 4.9 y 7.6% en la eficiencia eléctrica del sistema fotovoltaico. Esto demuestra como las nuevas investigaciones no solo se centran en regular la temperatura de los paneles, sino también en aprovechar el calor generado en el panel para otros usos [34].

3.1.2 Efecto de la reflexión y suciedad, en la superficie de los paneles solares

La cantidad de radiación recibida por las células solares en el interior del módulo fotovoltaico es inferior a la que llega a la superficie del mismo, debido a la reflexión y la suciedad de la superficie del módulo [35]. Las pérdidas de reflexión óptica en la interfaz (vidrio o polímero), debido a la diferencia en los índices de refracción, puede llegar hasta 8 o 9% en el espectro visible de la radiación solar. Este efecto resulta indeseable para los fotones a la hora de cargar los portadores [36], por lo cual las modificaciones superficiales de las células solares se hacen con el fin de reducir la reflexión en la interfaz del material.

Ota et al. [37] investigó el efecto de aplicar una capa de recubrimiento de sílice con propiedades de anti-reflexión y anti-suciedad. Con el fin confirmar las propiedades anti-reflexión del recubrimiento de sílice, para esto se añadió una capa delgada a un sustrato de vidrio sosa-cal con revestimiento por centrifugación. La transmitancia media de la muestra revestida fue 3,6% mayor que la de la muestra no recubierta. Con el uso de este recubrimiento se logró un aumento del 3.2% en la potencia de salida del sistema fotovoltaico, en comparación con una matriz no recubierta.

Por su parte Wang et al. [38] desarrolló una película anti-reflexión y superhidrofoba (AR-S), con el fin de reducir los costos de limpieza y aumentar el rendimiento de la generación de energía. La película muestra una excelente propiedad de auto limpieza, la producción de energía diaria logró una mejora de 10,1% con la película AR-S,

este aumento también se debe al ángulo de incidencia de la luz sobre el panel solar.

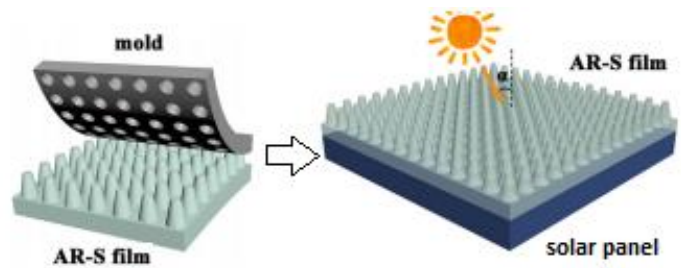


Figura 10. Esquemas de la fabricación de películas AR-S e implementación [38].

3.2 Factores externos al panel

En los factores externos al panel solar, se pueden encontrar aspectos como variaciones climáticas, ángulo de inclinación y sombreado, que pueden afectar el rendimiento del panel solar considerablemente [19].

3.2.1 Efecto de las variaciones climáticas

Las variaciones climáticas en los sistemas fotovoltaicos hacen referencia especialmente a las condiciones de radiación solar y temperatura ambiente [39]. Cuando un panel solar es sometido a variaciones climáticas drásticas o repentinas, el sistema presenta una variación de su punto máximo de potencia, esto se debe a la relación que existe entre la radiación solar, la temperatura y la resistencia, lo que genera una variación en la curva “Corriente – Tensión” (ver Fig. 7).

Las técnicas de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) son el método más simple para mejorar el rendimiento del módulo fotovoltaico [40], Permiten reducir este tipo variaciones haciendo que el sistema siempre se encuentre en su punto máximo de potencia. En la actualidad existen varios métodos como lo son [41],[42], [43]:

- Hill climbing (HC).
- logaritmo de perturbación y observación (P&O).
- logaritmo de conductancia incremental (INC).
- redes neuronales.
- algoritmos genéticos (GA).
- controladores difusos (FC).

Sin embargo el método más utilizado son los logaritmos de perturbación y observación (P&O).

Murtaza et al. [44] investigó una técnica híbrida de tensión de circuito abierto (V_{OC}), corriente de circuito (I_{SC}) y técnicas de perturbación y observación (P&O). Esta técnica establece la búsqueda del punto de potencia máxima (MPP), al encontrarlo inicia una operación estable y evalúa las condiciones ambientales en ese instante, una vez se presentan cambios en las condiciones que se ven reflejadas en la curva I-V, el algoritmo del modelo MPPT desarrolla una operación dinámica para volver a encontrar su MPP. Con la implementación de esta técnica, se obtuvo una mejora del 6.5% en la eficiencia del sistema en comparación con otros métodos normalmente utilizados.

Kofinas et Al. [45] desarrolló un método de control de aprendizaje de refuerzo para el seguimiento del punto máximo de potencia (RLMPPT), este método de aprendizaje de refuerzo (RL) permite rastrear y ajustar el punto máximo de potencia de una fuente fotovoltaica sin ningún conocimiento previo, solo analizando las variaciones que presenta las curva “Corriente – Tensión” (ver Fig. 7) en ese preciso instante.

Los métodos mencionados anteriormente, tienen como objetivo mejorar la recolección de energía en la matriz fotovoltaica sin importar las variaciones climáticas, obteniendo como resultado que el sistema siempre este en su punto máximo de potencia (MPP) [46].

3.2.2 Ángulo de inclinación de los paneles fotovoltaicos

El ángulo de inclinación del panel incide en la radiación solar que llega a la superficie de las células [47]. Cuando el panel se sitúa perpendicularmente en dirección al sol recibe la máxima radiación por un intervalo de tiempo, considerándose este el ángulo de inclinación óptimo [48]. Este ángulo está afectado por factores como la latitud, las características de la radiación solar y el período de utilización [49].

Los seguidores solares se presentan como un avance tecnológico que busca disminuir totalmente las pérdidas debido a la inclinación fija que presenta el panel solar, ya que el seguidor tiene la capacidad de orientación hacia el sol, lo que permite al panel siempre estar orientado perpendicularmente al sol y de esta forma recibir la máxima radiación solar durante todo el día, para que de esta manera aumente su rendimiento. Como lo demostró

Fathabadi [50], quien propuso un nuevo seguidor solar bidireccional de alta precisión, que rastrea la dirección del sol con un pequeño error de seguimiento de sólo 0,43 °. Los resultados obtenidos con la implementación de este nuevo seguidor solar, fueron del 19,1% al 30,2% más que en la recolección de energía solar con respecto a los paneles solares sin seguidor solar.

3.2.3 Sombreado en la superficie del panel solar

El efecto de sombreado es causado cuando se obstaculiza la luz que impacta sobre la superficie del panel provocando desajustes de voltaje y corriente en el sistema. Esto se debe principalmente a formaciones de sombras producidas por elementos cercanos a los paneles como árboles, estructuras o agentes externos que impide a la luz solar llegar uniformemente sobre la superficie del panel [51]. El efecto de sombreado provoca pérdidas en la recolección de energía y así se reduce la potencia de salida y la eficiencia en la conversión de energía de los sistemas fotovoltaicos [52]. Un panel solar que está bajo los efectos de sombreado recolecta energía de forma desigual, lo que conlleva a presentar fluctuaciones en la potencia entregada ocasiona daños en los componentes del sistema fotovoltaico como el inversor o las baterías.

4. Conclusiones

En este documento se analizó los factores que afectan la eficiencia de los paneles solares ya sean internos y externos al panel. Estos factores generan que la potencia de salida del panel y por lo tanto la eficiencia sean severamente afectadas. Además se presentan algunas investigaciones desarrolladas con resultados positivos para reducir algunos factores que no permiten el rendimiento óptimo de los paneles solares.

Dentro de los factores internos que afectan el panel solar, (técnicas de fabricación, aumento de la temperatura del panel, efectos de reflexión y suciedad y el ángulo de inclinación), el que más afecta en términos de eficiencia y durabilidad es el aumento de temperatura en panel, ocasiona una saturación de corriente impidiendo una óptima salida potencia y generando daños en la célula. Implementar algunas técnicas para regular la temperatura de los paneles cuando está en funcionamiento, se presentan como una alternativa confiable para aumentar la eficiencia de los paneles fotovoltaicos como lo

demuestran las investigaciones de Shahrestan, Zhu y Lucas.

Los efectos del nivel de radiación, la temperatura del ambiente (variaciones climáticas), inclinación de panel y sombreados son factores externos que afectan el buen funcionamiento de panel solar. La variación de la radiación es efecto más notorio para reducir la producción de energía de un panel. Esto se debe que al variar la intensidad de radiación el panel también va a variar su punto máximo de potencia, así el panel no va a entregar su máxima potencia y presentara una baja eficiencia.

El método más simple para mejorar el rendimiento de un sistema fotovoltaico son las técnicas de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT). Se debe a la gran variedad de posibilidades para implementar diferentes métodos y su fácil implementación en el sistema fotovoltaicos. La implantación del algoritmo propuesto por Murtaza es la mejor forma para reducir las variaciones del punto máximo de potencia, ya que alcanzo una mejora del 6.5% en la eficiencia del sistema con la implementación de este algoritmo híbrido.

Las investigaciones desarrolladas para mejorar la eficiencia de los paneles solares, implementando las posibles soluciones mostradas anteriormente demostraron que se puede mejorar la eficiencia eléctrica de estos sistemas entre 3% y 7% aproximadamente.

5. Bibliografía

- [1] N. Kannan and D. Vakeesan, "Solar energy for future world: - A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 62, pp. 1092–1105, 2016.
- [2] "Banco Mundial." [Online]. Available: <http://www.bancomundial.org/>. [Accessed: 05-May-2017].
- [3] "International Energy Agency." [Online]. Available: <https://www.iea.org/>. [Accessed: 05-May-2017].
- [4] M. A. V. Zapata, O. S. Ferial, R. de G. G. Huerta, O. V. Galan, S. A. Hernandez, R. S. Flores, Y. Matsumoto, and K. S. Alcantara, *Tecnologías Solar-Eólica-Hidrógeno-Pilas de Combustible como fuentes de energía*. 2009.
- [5] "Home - REN21." [Online]. Available: <http://www.ren21.net/>. [Accessed: 05-May-2017].
- [6] P. Gonçalves, V. Sampaio, M. Orestes, and A. González, "Photovoltaic solar energy : Conceptual framework," vol. 74, no. December 2016, pp. 590–601, 2017.
- [7] F. Corcelli, M. Ripa, and S. Ulgiati, "End-of-life treatment of crystalline silicon photovoltaic panels . An emergy-based case study," *J. Clean. Prod.*, 2017.
- [8] REN21, "Energías renovables 2016. Reporte de la situación mundial," 2016.
- [9] Consorcio Energético CORPOEMA, "Plan de Desarrollo para las Fuentes no Convencionales de Energía en Colombia (PDFNCE)," *Formulación un plan Desarro. para las fuentes no Conv. en Colomb. V1*, vol. 1, pp. 25–28, 2010.
- [10] "ACCIONA - Líder Mundial en Energía Renovable e Infraestructuras." [Online]. Available: <https://www.acciona.com/es/>. [Accessed: 21-Jun-2017].
- [11] M. A. Lamigueiro, Óscar Perpiñán, Antonio Colmenar, *Diseño de sistemas fotovoltaicos*. 2012.
- [12] D. M. Morales, M. Cappelletti, G. Casas, W. Hasperue, and E. P. Y Blanca, "Estudio basado en Algoritmos Genticos de celdas solares expuestas a radiación," *2016 IEEE Bienn. Congr. Argentina, ARGENCON 2016*, pp. 1–5, 2016.
- [13] Anónimo, "Componentes de una instalación solar fotovoltaica," 2012.
- [14] Grupo Simec Chile SRL, "Análisis de un Sistema e Iluminación, utilizando ampollitas de bajo Consumo y alimentado por paneles fotovoltaicos," vol. 1, p. 138, 2010.
- [15] E. E. Granda-Gutiérrez, O. A. Orta-Salomón, J. C. Díaz-Guillén, M. A. Jimenez, M. Osorio, and M. A. González, "Modelado y Simulación de Celdas y Paneles Solares. ISSN:1405-2172," *Congr. Int. Ing. Electrón. Mem. Electro 2013*, no. October, pp. 17–22, 2013.
- [16] C. E. C. Nogueira, J. Bedin, R. K. Niedzialkoski, S. N. M. De Souza, and J. C. M. Das Neves, "Performance of monocrystalline and

- polycrystalline solar panels in a water pumping system in Brazil," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 51, pp. 1610–1616, 2015.
- [17] Ente Vasco, "La Energia Solar Fotovoltaica," p. 90, 2000.
- [18] K. H. Kapumpa and A. S. Viridi, "A Review Paper on Solar Photovoltaic Systems," vol. 9, no. 41, pp. 43–52, 2016.
- [19] A. Basnet, "Architectural Integration of Photovoltaic and Solar Thermal Collector Systems into buildings," *Master's Thesis*, no. June, 2012.
- [20] M. Mirzaei and M. Z. Mohiabadi, "A comparative analysis of long-term field test of monocrystalline and polycrystalline PV power generation in semi-arid climate conditions," *Energy Sustain. Dev.*, vol. 38, pp. 93–101, 2017.
- [21] S. Edwin and T. Salamanca, "AN OPEN-SOURCE HARDWARE I-V CURVE TRACER FOR MONITORING PV OUTPUT IN BOLIVIA," vol. 2, no. 14, pp. 42–64, 2014.
- [22] O. D. Basak and B. S. Sazak, "Effect of developments on a PV system efficiency," *2013 4th Int. Symp. Electr. Electron. Eng. ISEEE 2013 - Proc.*, 2013.
- [23] R. Bhol, R. Dash, A. Pradhan, and S. M. Ali, "Environmental effect assessment on performance of solar PV panel," *2015 Int. Conf. Circuits, Power Comput. Technol. [ICCPCT-2015]*, pp. 1–5, 2015.
- [24] S. Dubey, J. N. Sarvaiya, and B. Seshadri, "Temperature dependent photovoltaic (PV) efficiency and its effect on PV production in the world - A review," *Energy Procedia*, vol. 33, pp. 311–321, 2013.
- [25] W. G. J. Van Helden, R. J. C. Van Zolingen, and H. A. Zondag, "PV Thermal systems: PV panels supplying renewable electricity and heat," *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 12, no. 6, pp. 415–426, 2004.
- [26] K. Kant, A. Shukla, A. Sharma, and P. Henry, "Thermal response of poly-crystalline silicon photovoltaic panels : Numerical simulation and experimental study," *Sol. Energy*, vol. 134, pp. 147–155, 2016.
- [27] M. D. Kempe, D. C. Miller, J. H. Wohlgemuth, S. R. Kurtz, J. M. Moseley, Q. A. Shah, G. Tamizhmani, K. Sakurai, M. Inoue, T. Doi, A. Masuda, S. L. Samuels, and C. E. Vanderpan, "Field testing of thermoplastic encapsulants in high-temperature installations," *Energy Sci. Eng.*, vol. 3, no. 6, pp. 565–580, 2015.
- [28] H. M. S. Bahaidarah, A. A. B. Baloch, and P. Gandhidasan, "Uniform cooling of photovoltaic panels: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 57, pp. 1520–1544, 2016.
- [29] T. A. S.S. Chandel, "Review of cooling techniques using phase change materials for enhancing efficiency of photovoltaic power systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 73, no. October 2016, pp. 1342–1351, 2017.
- [30] F. Schiro, A. Benato, A. Stoppato, and N. Destro, "Improving photovoltaics efficiency by water cooling : Modelling and experimental approach," *Energy*, 2017.
- [31] M. Shahrestani, R. Yao, E. Essah, L. Shao, A. C. Oliveira, A. Hepbasli, E. Biyik, T. del Caño, E. Rico, and J. L. Lechón, "Experimental and numerical studies to assess the energy performance of naturally ventilated PV façade systems," *Sol. Energy*, vol. 147, pp. 37–51, 2017.
- [32] A. Shukla, K. Kant, A. Sharma, and P. H. Biwole, "Cooling methodologies of photovoltaic module for enhancing electrical efficiency: A review," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 160, no. July 2016, pp. 275–286, 2017.
- [33] M. Lucas, F. J. Aguilar, J. Ruiz, C. G. Cutillas, A. S. Kaiser, and P. G. Vicente, "Photovoltaic Evaporative Chimney as a new alternative to enhance solar cooling," *Renew. Energy*, vol. 111, pp. 26–37, 2017.
- [34] M. Rosa-clot, P. Rosa-clot, G. M. Tina, and C. Ventura, "ScienceDirect Experimental photovoltaic-thermal Power Plants based on TESPI panel," *Sol. Energy*, vol. 133, pp. 305–314, 2016.
- [35] M. Abderrezek and M. Fathi, "Experimental study of the dust effect on photovoltaic panels' energy yield," *Sol. Energy*, vol. 142, pp. 308–320, 2017.
- [36] D. Karthik, S. Pendse, S. Sakthivel, E. Ramasamy, and S. V. Joshi, "High performance broad band

antireflective coatings using a facile synthesis of ink-bottle mesoporous MgF₂ nanoparticles for solar applications," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 159, pp. 204–211, 2017.

- [37] Y. Ota, N. Ahmad, and K. Nishioka, "A 3.2% output increase in an existing photovoltaic system using an anti-reflection and anti-soiling silica-based coat," *Sol. Energy*, vol. 136, pp. 547–552, 2016.
- [38] M. Wang, X. Gu, P. Ma, W. Zhang, D. Yu, P. Chang, X. Chen, and D. Li, "Microstructured superhydrophobic anti-reflection films for performance improvement of photovoltaic devices," *Mater. Res. Bull.*, vol. 91, pp. 208–213, 2017.
- [39] S. Cuestas and L. Lebus, "Diseño de un seguidor de punto máximo de potencia," pp. 37–42.
- [40] M. Nabipour, M. Razaz, S. G. Seifossadat, and S. S. Mortazavi, "A new MPPT scheme based on a novel fuzzy approach," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 74, no. October 2016, pp. 1147–1169, 2017.
- [41] R. Boukenoui, R. Bradai, A. Mellit, M. Ghanes, and H. Salhi, "Comparative Analysis of P & O , Modified Hill Climbing-FLC , and Adaptive P & O-FLC MPPTs for Microgrid Standalone PV System," vol. 5, pp. 1095–1099, 2015.
- [42] K. L. Lian, J. H. Jhang, and I. S. Tian, "A Maximum Power Point Tracking Method Based on Perturb-and-Observe Combined With Particle Swarm Optimization," *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 4, no. 2, pp. 626–633, 2014.
- [43] O. Guenounou, B. Dahhou, and F. Chabour, "Adaptive fuzzy controller based MPPT for photovoltaic systems," *Energy Convers. Manag.*, vol. 78, pp. 843–850, 2014.
- [44] A. F. Murtaza, M. Chiaberge, F. Spertino, U. T. Shami, D. Boero, and M. De Giuseppe, "MPPT technique based on improved evaluation of photovoltaic parameters for uniformly irradiated photovoltaic array," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 145, pp. 248–263, 2017.
- [45] P. Kofinas, S. Doltsinis, A. I. Dounis, and G. A. Vouros, "A reinforcement learning approach for MPPT control method of photovoltaic sources," *Renew. Energy*, vol. 108, 2017.
- [46] N. Chatrenour, H. Razmi, and H. Doagou-Mojarrad, "Improved double integral sliding mode MPPT controller based parameter estimation for a stand-alone photovoltaic system," *Energy Convers. Manag.*, vol. 139, pp. 97–109, 2017.
- [47] M. Benghanem, "Optimization of tilt angle for solar panel: Case study for Madinah, Saudi Arabia," *Appl. Energy*, vol. 88, no. 4, pp. 1427–1433, 2011.
- [48] S. Akhlaghi, S. Member, M. Sarailoo, and S. Member, "Study of Sufficient Number of Optimal Tilt Angle Adjustment to Maximize Residential Solar Panels Yield," 2017.
- [49] A. Marucci and A. Cappuccini, "Dynamic photovoltaic greenhouse : Energy efficiency in clear sky conditions," *Appl. Energy*, vol. 170, pp. 362–376, 2016.
- [50] H. Fathabadi, "Novel high efficient of line sensorless dual-axis solar tracker for using in photovoltaic systems and solar concentrators," *Renew. Energy*, vol. 95, pp. 485–494, 2016.
- [51] B. J. G. Montano, Di. J. F. Rombaoa, R. A. S. Pena, and E. Q. B. MacAbebe, "Effects of shading on current, voltage and power output of total cross-tied photovoltaic array configuration," *IEEE Reg. 10 Annu. Int. Conf. Proceedings/TENCON*, vol. 2016–Janua, pp. 2–6, 2016.
- [52] D. La Manna, V. Li Vigni, E. Riva Sanseverino, V. Di Dio, and P. Romano, "Reconfigurable electrical interconnection strategies for photovoltaic arrays: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 33, pp. 412–426, 2014.