

Efecto de la temperatura en la eficiencia de paneles fotovoltaicos Effect of temperature on the efficiency of photovoltaic panels

B. H. A. Espinosa-Ramírez ^a, A. Garrido-Hernández ^a, G. García-Domínguez ^a, E.A. Vargas-León ^a
J. M. Castillo-Minjarez ^{a*}

^a Universidad Tecnológica de Tecámac. Ctra. Federal México-Pachuca Km. 37.5, Predio Sierra Hermosa, Tecámac, Estado de México. C.P. 55740. México.

Resumen

Enfriar la superficie operativa es un factor operacional clave a tener en cuenta para lograr una mayor eficiencia al operar sistemas fotovoltaicos solares. Un adecuado enfriamiento puede mejorar la eficiencia eléctrica y reducir la tasa de degradación de las celdas con el tiempo, lo que resulta en una maximización de la vida útil de los módulos fotovoltaicos. El exceso de calor eliminado por el sistema de enfriamiento puede ser utilizado en aplicaciones domésticas, comerciales o industriales. Este artículo presenta una revisión del comportamiento de la eficiencia de celdas de diferentes materiales con respecto a la temperatura, se presentan varios métodos que pueden ser utilizados para minimizar los impactos negativos de la temperatura elevada, al mismo tiempo que se intenta mejorar la eficiencia de los paneles solares fotovoltaicos que operan por encima de la temperatura recomendada en las Condiciones de Prueba Estándar (STC). Se revisan diferentes tecnologías de enfriamiento, a saber: Sistema de enfriamiento flotante con seguimiento concentrado (FTCC); Sistema híbrido solar fotovoltaico/térmico enfriado mediante rociado de agua; Sistema híbrido solar fotovoltaico/térmico con celdas PVT/TE enfriado por disipador de calor; Sistema híbrido solar fotovoltaico/térmico (PV/T) enfriado por circulación forzada de agua; Mejora del rendimiento de paneles solares mediante el uso de materiales de cambio de fase (PCM); Panel solar con técnica de enfriamiento por inmersión en agua; Panel solar fotovoltaico enfriado por recubrimiento transparente (enfriamiento de cristal fotónico); Sistema híbrido solar fotovoltaico/térmico enfriado por circulación de aire forzado y Panel solar con enfriamiento termoelectrico. Se revisan y clasifican varios artículos de investigación según su enfoque, contribución y tipo de tecnología utilizada para lograr el enfriamiento de los paneles fotovoltaicos. La discusión de los resultados se ha llevado a cabo basándose en las ventajas, desventajas, áreas de aplicación y el carácter tecnoeconómico de cada tecnología revisada.

Palabras clave: Panel fotovoltaico, fotoeléctrico, concentradores solares.

Abstract

Cooling the operating surface is a key operational factor to take into account to achieve greater efficiency when operating solar photovoltaic systems. Adequate cooling can improve electrical efficiency and reduce the rate of cell degradation over time, resulting in maximizing the useful life of photovoltaic modules. The excess heat removed by the cooling system can be used in domestic, commercial or industrial applications. This article presents a review of the efficiency behavior of cells made of different materials with respect to temperature, several methods are presented that can be used to minimize the negative impacts of elevated temperature, while attempting to improve the efficiency of the panels solar photovoltaics that operate above the temperature recommended in the Standard Test Conditions (STC). Different cooling technologies are reviewed, namely: Floating Tracked Concentrated Cooling System (FTCC); Hybrid solar photovoltaic/thermal system cooled by water spray; Hybrid solar photovoltaic/thermal system with PVT/TE cells cooled by heat sink; Hybrid solar photovoltaic/thermal (PV/T) system cooled by forced water circulation; Improving the performance of solar panels through the use of phase change materials (PCM); Solar panel with water immersion cooling technique; Photovoltaic solar panel cooled by transparent coating (photonic crystal cooling); Hybrid solar photovoltaic/thermal system cooled by forced air circulation and Solar panel with thermoelectric cooling. Various research articles are reviewed and classified according to their focus, contribution, and type of technology used to achieve cooling of photovoltaic panels. The discussion of the results has been carried out based on the advantages, disadvantages, areas of application and the techno-economic nature of each technology reviewed.

Keywords: Photovoltaic panel, photoelectric, solar concentrators.

*Autor para la correspondencia: jcastillom@uttecamac.edu.mx

Correo electrónico: bespinosar@uttecamac.edu.mx (Ben Hur Anselmo Espinosa-Ramírez), agarridoh@uttecamac.edu.mx (Aristeo Garrido-Hernández), ggarciad@uttecamac.edu.mx (Giovanni García-Domínguez), evargasl@uttecamac.edu.mx (Enaim Aída Vargas-León), jcastillom@uttecamac.edu.mx (José Miguel Castillo-Minjarez).

Historial del manuscrito: recibido el 11/10/2023, última versión-revisada recibida el 23/11/2023, aceptado el 23/11/2023, publicado el 11/12/2023. DOI: <https://doi.org/10.29057/icbi.v11iEspecial5.11841>



1. Introducción

En la vida moderna, prácticamente todas las actividades humanas están concatenadas al uso de la energía eléctrica, tanta es su importancia, que la pérdida de acceso a este recurso implica un retroceso en la calidad de vida de las personas. La crisis energética global debida al déficit de combustibles, se exacerbó el año pasado, debido al conflicto bélico entre Rusia y Ucrania, al ser el primero de estos países el principal exportador de combustibles fósiles, causando que al menos 75 millones de personas en el mundo perdieran el acceso a la energía eléctrica (Secretaría de Energía, 2023).

Por otra parte, el uso de estas fuentes de energía convencionales para la generación de electricidad, están asociadas con las afectaciones ambientales que se están viviendo. Por lo tanto, cada vez es más imperativo un cambio que altere radicalmente el equilibrio entre las situaciones nuevas y las conocidas, adoptando una cultura tecnológica de gestión del cambio planificado que considere el uso de energía eléctrica sostenible, asegurando la transformación de vidas, de economías y del planeta (Naciones Unidas, 2016; Toffler, 1973).

En este contexto, la sociedad con un enfoque de proactividad y proactividad, requiere de una planeación tecnológica, estratégica y sistémica de generación eléctrica a partir de fuentes renovables (Al-Shahri et al., 2021; Godet & Durance, 2011), apuntalada por políticas públicas que faciliten el acceso universal a las energías sostenibles (Secretaría de Energía, 2020), contribuyendo a la dinamización de la economía y a un nuevo constructo tecnológico que permita la democratización de la energía eléctrica sostenible con el consecuente mejoramiento económico, social y cultural de la sociedad (Cámara de Diputados, 2023). En este siglo, dentro de las energías alternativas disponibles, la aplicación de la energía solar fotovoltaica destaca como una solución significativa.

El punto de partida se remonta a 1839, cuando Edmond Becquerel identificó por primera vez el efecto fotovoltaico. Treinta y cuatro años más tarde, Willoughby Smith descubrió la fotoconductividad del selenio. Estos dos hallazgos allanaron el camino para que, en 1876, William Grylls Adams y Richard Evans Day desarrollaran la primera celda fotovoltaica de selenio. Posteriormente, en 1883, Charles Fritts creó la primera celda solar funcional (Starowicz et al., 2023). Desde entonces hasta nuestros días, uno de los desafíos más significativos ha sido mejorar la eficiencia de las celdas para convertir la energía solar en electricidad, al tiempo que se reduce el costo de su implementación.

El alto costo de inversión necesario para implementar energías renovables ha sido una desventaja significativa. Por ejemplo, en los primeros tiempos de las celdas solares, basadas en el descubrimiento de Becquerel, su eficiencia apenas alcanzaba el 1%, y la generación de energía con ellas ascendía a alrededor de 300 dólares por vatio. Posteriormente, en la década de 1950, los paneles de silicio desarrollados por Bell Labs lograron una eficiencia del 11%. En 1960, Hoffman Electronics produjo paneles con una eficiencia del 14%, lo que

redujo el costo de generación de 1 vatio de electricidad a aproximadamente 100 dólares. Sin embargo, este costo seguía siendo considerablemente más alto que la alternativa convencional basada en carbón. Durante la década de 1970, Exxon desarrolló celdas que disminuyeron el costo de producción a alrededor de 20 dólares por vatio. A partir de la década de 1980, el costo de los paneles fotovoltaicos continuó disminuyendo. A pesar de que la eficiencia de las celdas solares aumentaba constantemente en condiciones de laboratorio, este progreso era menos evidente en la industria y en los hogares. En la actualidad, las celdas fotovoltaicas fabricadas tienen una eficiencia que oscila entre el 15% y el 18%. Aunque esto podría parecer relativamente bajo, el costo de producir 1 vatio se ha reducido a menos de medio dólar (Starowicz et al., 2023).

Muteri et al., (2020) distinguen tres generaciones de sistemas fotovoltaicos. La primera generación engloba los paneles de silicio cristalino convencionales con celdas de silicio monocristalino y policristalino. La segunda generación se basa en celdas solares de película delgada, que abarcan el silicio amorfo, el telururo de cadmio (CdTe), el sulfuro de cadmio (CdS), el seleniuro de cobre, indio y galio (CIGS) / seleniuro de cobre e indio (CIS), el arseniuro de galio (GaAs) y los módulos en tándem/multiuniones basados en silicio. En cuanto a la tercera generación, también conocida como próxima generación, engloba tecnologías innovadoras que no están basadas en silicio y dispositivos de concepto novedoso, como los paneles fotovoltaicos orgánicos/semiorgánicos (OPV), las celdas solares de perovskita (PSC), las celdas solares sensibilizadas por colorante (DSSC) y las celdas de puntos cuánticos (QD).

La producción de energía fotovoltaica está sujeta a una variedad de factores que incluyen la intensidad de la irradiación solar, la temperatura de la celda y su funcionamiento, la velocidad del viento, la presencia de sombras, condiciones climáticas extremas como granizo, rayos, hielo y nieve, así como la acumulación de suciedad en la superficie fotovoltaica, la latitud de instalación y la degradación del módulo y material de la celda fotovoltaica, entre otros (Maleki et al., 2020).

En cuanto a los materiales de las celdas solares, se han utilizado una variedad de opciones como el silicio, diseleniuro de indio y cobre, fosforo de indio, siendo el silicio el material más predominante en la actualidad (Maleki et al., 2020). Por otro lado, para minimizar las pérdidas ópticas y aumentar la eficiencia de los paneles, se aplican recubrimientos antirreflejantes (Sarkin et al., 2020).

Las sombras representan un factor crítico que puede reducir el rendimiento de los paneles hasta en un 90%, bloqueando la irradiancia solar y provocando puntos calientes que pueden dañar permanentemente las celdas (Vieira et al., 2020). Además, investigaciones han demostrado que la acumulación de polvo puede afectar el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos en un rango de 21% a 89%, dependiendo de la naturaleza de los contaminantes en el aire y las condiciones climáticas locales (Dwivedi et al., 2020; Mustafa et al., 2023; Santhakumari & Sagar, 2019).

La temperatura y la humedad también pueden ser perjudiciales para los módulos fotovoltaicos, al influir en la permeabilidad de la lámina posterior del módulo. La humedad puede ingresar y degradar el material de adhesión entre la celda fotovoltaica y el metal de contacto, ocasionando corrosión y delaminación. Los rayos UV también provocan la degradación del encapsulamiento, resultando en decoloración y pérdida de transmisión óptica, lo que a su vez reduce el rendimiento del módulo. Cada aumento de 1°C en la temperatura ambiente puede reducir la eficiencia de la celda entre un 0.25% y 0.50%, dependiendo del material utilizado (Hadipour et al., 2021; Mustafa et al., 2023; Santhakumari & Sagar, 2019; Sargunanathan et al., 2016).

Por tanto, esta revisión además de presentar los elementos y el funcionamiento de los sistemas fotovoltaicos, tiene como objetivo fundamental, presentar diferentes estrategias que buscan mitigar los daños causados por la temperatura, incluyendo aquellas que involucran el aumento de la concentración de la radiación solar, con el fin último de mejorar la eficiencia. Se muestran soluciones desde un punto de vista de la aplicación de diferentes materiales con los que se logre evitar la degradación de la encapsulación, con los que se promuevan las superficies limpias usando recubrimientos hidrofóbicos, así como el empleo de concentradores luminiscentes como alternativa para incrementar la eficiencia de las celdas. También se exploran las consecuencias de estas estrategias y se discuten las perspectivas futuras en este campo.

1. Componentes de un módulo fotovoltaico

Un módulo fotovoltaico (PV), también conocido como panel solar, es un sistema empacado y protegido que consta de múltiples celdas fotovoltaicas conectadas entre sí para generar energía eléctrica a partir de la luz solar. Estas celdas pueden ser de diferentes tipos, como cristalinas, semicristalinas o amorfas. Para comprender los desafíos que enfrentan los paneles fotovoltaicos, es esencial conocer los componentes estructurales.

Celda fotovoltaica: es la unidad fundamental que convierte la luz solar en electricidad.

Cubierta frontal: a menudo se utiliza vidrio templado de aproximadamente 3.2 mm de grosor con alta transmitancia.

Encapsulado: es el material polimérico que protege las celdas fotovoltaicas contra las condiciones climáticas, ambientes corrosivos, radiación UV, bajo estrés mecánico e impactos de baja energía.

Lámina posterior: protege el módulo contra la radiación UV, la humedad, la penetración de vapor, el viento, el polvo y los productos químicos.

Caja de conexiones: a menudo está hecha de tereftalato de polietileno (PET) y su función es salvaguardar todas las conexiones eléctricas en un panel solar, protegiéndolas del medio ambiente.

Estructura: la mayoría de los módulos PV están equipados con un marco de aluminio anodizado, que abraza la cubierta frontal en la parte superior y la lámina posterior en la parte inferior.

2. Funcionamiento de un sistema solar fotovoltaico

Cuando una celda fotovoltaica es expuesta a la radiación solar, los fotones son absorbidos por la unión de semiconductores tipo P-N, lo que crea una diferencia de potencial a través de la unión. Esto da lugar a un flujo de portadores de carga y genera una corriente fotovoltaica. La investigación sobre el rendimiento de las celdas fotovoltaicas ha demostrado que la temperatura de funcionamiento de la superficie juega un papel crucial en el proceso de conversión de energía solar. Temperaturas ambientales y de superficie del panel fotovoltaico elevadas pueden llevar al sobrecalentamiento del panel, lo que a su vez reduce significativamente su eficiencia (Duffie & Beckman, 2013).

Las características fotovoltaicas se refieren a la relación entre la potencia de salida y el voltaje de salida, cuando se mantienen constantes la irradiancia solar (E) y la temperatura del módulo (T_m). El impacto de la temperatura en la eficiencia eléctrica del panel solar puede ser analizado a través de la ecuación 1:

$$n_{PV} = n_{RT} [1 - \beta_R (T_C - T_R)]$$

Donde se describe la relación entre la cantidad de fotones incidentes en una celda fotovoltaica (n_{PV}) y la cantidad de fotones generados por la radiación térmica (n_{RT}). β_R es el coeficiente de emisión de fotones de la celda fotovoltaica que está relacionado con la capacidad del material para emitir fotones cuando se encuentra a una cierta temperatura. T_C es la temperatura de la celda fotovoltaica en Kelvin. T_R es la temperatura ambiente en Kelvin. La ecuación 1 cuantifica la contribución de la radiación térmica a la generación de fotones en una celda fotovoltaica y cómo esta contribución está influenciada por la diferencia de temperatura entre la celda y su entorno, así como por las características del material de la celda.

3. Deterioro de las celdas fotovoltaicas por efecto de la temperatura

En esta sección se presentan algunos de los principales tipos de daños que pueden afectar a los sistemas fotovoltaicos debido a la alta temperatura y otros factores ambientales.

Según autores como Aghaei et al., (2029) y Santhakumari & Sagar (2019), los sistemas fotovoltaicos pueden sufrir diversos tipos de daños debido a factores como la alta temperatura y otros elementos ambientales. A continuación, se detallan los principales tipos de daños:

Decoloración: El aumento de la temperatura ambiente y la humedad puede llevar a la decoloración del encapsulante fotovoltaico. Sales de plata como el fosfato, sulfuro, carbonato y acetato de plata pueden cristalizarse en la superficie frontal,

lo que resulta en la metalización de las celdas de los módulos fotovoltaicos.

Corrosión: La reacción electroquímica entre el metal y la humedad del entorno alrededor de los módulos fotovoltaicos se acelera a temperaturas más altas. Esto puede provocar grietas en las uniones de soldadura, corrosión de la celda y degradación del revestimiento antirreflectante, lo que reduce la potencia de salida.

Rupturas de vidrio: Aunque el esfuerzo mecánico durante el transporte, mantenimiento o manipulación es la principal causa de roturas y grietas en los paneles, también pueden formarse debido al estrés térmico causado por la exposición al aire libre. Esto facilita la corrosión, delaminación y decoloración.

Senderos de caracoles: Después de varios meses de exposición al ambiente exterior, los paneles pueden desarrollar decoloración a lo largo de la celda. La lámina posterior se desvanece debido a la permeabilidad al vapor de agua, lo que resulta en franjas oscuras irregulares conocidas como senderos de caracoles.

Puntos calientes: Excrementos de aves, hojas y manchas de polvo pueden cubrir algunas de las celdas del módulo fotovoltaico, bloqueando la corriente generada por otras celdas. Esto hace que el diodo funcione en modo de polarización inversa, calentando las celdas y creando un punto caliente que daña el módulo.

Delaminación: La delaminación del encapsulante es la principal causa de degradación en el módulo fotovoltaico. La exposición continua a la radiación UV, humedad y temperatura ambiente puede provocar la pérdida de adherencia entre el vidrio encapsulante, la celda encapsulante y la lámina posterior del encapsulante. Esto puede resultar en la formación de burbujas en la lámina posterior y corrosión de la celda.

4. Tecnologías para aumentar la eficiencia de la energía fotovoltaica y control de temperatura.

En esta sección se explicará el principio operativo general de las diferentes tecnologías que pueden utilizarse para minimizar el efecto del aumento de temperatura, al intentar mejorar el rendimiento de un panel fotovoltaico.

Refrigeración Activa:

La refrigeración activa es un método efectivo para mitigar el sobrecalentamiento de los módulos fotovoltaicos mediante el uso de un fluido refrigerante y un sistema de bombeo o un ventilador. Utilizar agua como refrigerante en la superficie de los paneles fotovoltaicos ha demostrado ser un proceso de enfriamiento altamente eficaz (Hadipour et al., 2021). Las gotas de agua tienen la capacidad de reducir la temperatura tanto de la superficie frontal como posterior de los paneles fotovoltaicos, lo que puede aumentar la potencia de salida del módulo hasta en un 15% (Mustafa et al., 2023; Santhakumari & Sagar, 2019). Es importante tener en cuenta, sin embargo, que se requiere una energía adicional para bombear el agua.

Un estudio llevado a cabo por Hadipour et al., (2021) reveló que el costo de generación de electricidad en un sistema sin enfriamiento por agua era ligeramente inferior al de los sistemas con enfriamiento por aspersión o pulverización de agua. Los autores concluyen que el costo adicional puede justificarse en casos donde las altas temperaturas ambientales puedan causar fallos prematuros en los módulos fotovoltaicos no refrigerados.

El enfriamiento por inmersión líquida es otra técnica que reduce las pérdidas por reflexión y aumenta la potencia de salida (Sargunanathan et al., 2016; Sato & Yamada, 2019). Además, se ha explorado el uso de un ventilador montado en un soporte metálico que induce un flujo de aire para enfriar la parte posterior del panel fotovoltaico a través de un sistema de conductos que dirigen el flujo de aire de manera eficaz, lo que puede mejorar el rendimiento en un 5 a 10%. Se han examinado los efectos de la sección transversal del canal de aire, la velocidad del aire y la temperatura del panel, concluyendo que la producción de energía es mayor en casos de convección forzada en comparación con convección natural, debido a una mayor transferencia de calor al flujo de aire (Santhakumari & Sagar, 2019; Sargunanathan et al., 2016; Sato & Yamada, 2019).

Refrigeración Pasiva:

La refrigeración pasiva se basa en la conducción o convección para facilitar la disipación del calor. Puede clasificarse en tres categorías principales: enfriamiento pasivo del aire, enfriamiento pasivo del agua y enfriamiento conductivo.

En el caso del enfriamiento pasivo del aire, se utilizan componentes adicionales como tubos de calor, disipadores o intercambiadores para promover el enfriamiento a través de convección natural (Dwivedi et al., 2020). Estas técnicas superan a las activas en términos de eficiencia energética ya que no requieren energía externa para funcionar. Un estudio comparativo entre disipadores de calor cilíndricos y colectores fotovoltaicos/T tradicionales reveló que los disipadores lograron la mayor reducción de temperatura (Santhakumari & Sagar, 2019).

Otra técnica de refrigeración pasiva es el uso de tubos de calor que están unidos a la parte posterior de las celdas fotovoltaicas para absorber el calor, utilizando fluidos como R-11, R-22, acetona, metanol, agua o aire. Esta metodología ha mostrado resultados favorables, logrando duplicar prácticamente la potencia generada en algunos casos. Se ha observado que el uso de agua proporciona mayores mejoras en la potencia en comparación con el aire, con incrementos del 9% y 6% respectivamente. Sin embargo, se requiere más investigación en términos de viabilidad económica para aplicaciones a gran escala (Sargunanathan et al., 2016; Sato & Yamada, 2019).

Además, se ha investigado el uso de disipadores de calor con aletas en la parte posterior del módulo, lo que ha llevado a mejoras en la potencia de salida y la eficiencia. Sin embargo, el rendimiento depende principalmente del área de

transferencia de calor y de la velocidad del viento, lo que requiere determinar las dimensiones óptimas de las aletas y su número necesario. También se ha desarrollado un método que utiliza agua de lluvia como medio de enfriamiento y un dispositivo de expansión de gas para distribuir el agua, lo que resultó en un aumento del rendimiento eléctrico promedio del 8.3% y mantuvo la eficiencia de las celdas por encima del 14.5% (Sargunanathan et al., 2016).

Otras técnicas de refrigeración pasiva incluyen el uso de orificios en los paneles para favorecer la convección natural, así como el uso de materiales de cambio de fase (PCM) y nanofluidos para disipar el calor. Los PCM, como los basados en parafina, y los nanofluidos, como Al_2O_3 y TiO_2 , han demostrado mejoras significativas en la potencia de salida fotovoltaica (Ma et al., 2019; Maleki et al., 2020; Santhakumari & Sagar, 2019).

En resumen, las tecnologías de refrigeración han evolucionado hacia enfoques que incluyen disipadores de calor, microcanales, intercambiadores de calor, PCM, nanofluidos, generadores termoelectricos (TEG) o combinaciones con otros sistemas. Estos avances están relacionados con la tecnología de división del haz, que distingue las longitudes de onda utilizadas para la conversión térmica y la generación fotovoltaica (Dwivedi et al., 2020).

Hassan et al., (2020) llevaron a cabo una investigación utilizando nanofluidos (grafeno/agua) y material de cambio de fase, RT-35HC, en un sistema PVT híbrido. Este sistema demostró una reducción máxima de temperatura fotovoltaica del 23.9°C, mejorando la eficiencia eléctrica en un 23.9% en comparación con el sistema convencional. Además, se observó que el sistema híbrido PVT/PCM basado en nanofluidos superó en eficiencia al sistema basado en agua.

El enfriamiento radiativo de módulos fotovoltaicos es otro enfoque pasivo que mejora la disipación de calor sin requerir dispositivos mecánicos o eléctricos adicionales, logrando una radiación/absorción térmica selectiva (Sato & Yamada, 2019).

5. Tendencias para aumentar la eficiencia de los paneles fotovoltaicos

Materiales poliméricos para la encapsulación

La eficiencia de un módulo fotovoltaico (PV) depende de la tecnología de la celda solar. Con el tiempo, las celdas PV experimentan cambios que reducen su rendimiento, como la disminución de la absorción de luz y afectaciones en sus propiedades ópticas y eléctricas. La encapsulación mejora la estabilidad al proteger las celdas PV de la degradación relacionada con el clima y fortalecer su resistencia mecánica. Actualmente, se utilizan diferentes métodos de encapsulación basados en copolímero de etileno y acetato de vinilo (EVA), aunque este último puede provocar degradación ambiental y reducir la eficiencia de producción de energía del módulo PV.

Una película de encapsulado de alto rendimiento, según Czanderna et al., (1996), debe cumplir varios requisitos clave como:

- Brindar soporte estructural a las cadenas de celdas PV en todas las etapas, desde la fabricación hasta la operación.
- Mostrar procesabilidad adecuada, resistencia química, y una alta capacidad para bloquear el oxígeno y la humedad.
- Ser compatible con las celdas PV y protegerlas de factores ambientales dañinos.
- Mantener propiedades ópticas sólidas (más del 90% de transmisión de luz y menos del 5% de pérdida de transmitancia después de 20 años).
- Tener una constante dieléctrica elevada para reducir el riesgo de degradación potencial inducida (PID) y mantener una excelente resistencia a la radiación ultravioleta y la oxidación térmica.
- Proporcionar un aislamiento eléctrico confiable a largo plazo entre las celdas PV y los componentes del circuito durante la operación.

El copolímero de etileno y acetato de vinilo (EVA), es el material principal para fabricar películas de encapsulado desde la década de 1980. Casi el 80% de los módulos fotovoltaicos utilizan EVA como encapsulante debido a su bajo costo, facilidad de procesamiento, alta transparencia, resistencia química y eléctrica, buena transmitancia de luz. Asimismo, los compuestos poliméricos reforzados con cargas de carbono/inorgánicas son altamente efectivos en la prevención de la permeabilidad de la humedad y los gases. Estos compuestos poliméricos pueden emplearse como encapsulantes en dispositivos electrónicos para protegerlos de condiciones ambientales adversas (Klampafitis et al., 2011).

Por otro lado, el uso de poliuretano (PU) como material de encapsulación para módulos fotovoltaicos es poco común, no obstante, se ha explorado su aplicación en celdas solares sensibilizadas por colorante (DSSC). Por ejemplo, se investigó el uso de un recubrimiento compuesto de poliuretano reforzado con nanocristales de celulosa (CNC) como barrera de encapsulación, y se encontró que mejoraba la vida útil del dispositivo DSSC sin reducir su eficiencia inicial de conversión de energía. La transmitancia óptica de todas las películas compuestas de PU fue superior al 80%, la vida útil del dispositivo DSSC encapsulado con compuestos poliuretano con nanocristales de celulosa se prolongó en más de 336 horas sin que disminuyera su eficiencia inicial de conversión de energía (Bonomo et al., 2020).

Además, se han reportado hallazgos usando resina epóxica reforzada con fibra de vidrio en la encapsulación de una celda fotovoltaica. Este proceso implicó colocar la celda PV entre capas de fibra de vidrio y sellarla al vacío. La resina epoxi utilizada contenía endurecedor de aminas y aditivos como absorbente de radiación ultravioleta y estabilizador fotográfico.

Por lo tanto, seleccionar el polímero adecuado contribuye a prolongar la vida útil y mejorar la eficiencia de los paneles

solares. Esto promueve su durabilidad a largo plazo y ayuda a reducir los costos de fabricación, así como la cantidad de residuos generados al reemplazarlos (García Martínez, 2015).

Alternativas para prevenir superficies polvosas en paneles solares

Un mayor contenido de polvo disminuye la corriente, la tensión y la potencia de salida de los paneles solares. Un nivel de 10 g de polvo /m² puede reducir la producción de energía en un 34%. Autores como, Elminir et al., (2006) y Mazumder et al., (2017), informaron que una capa de deposición de polvo de 4 g/m² puede reducir la eficiencia solar en un 40%. Un estudio de Hee et al., (2015) encontró que, a pesar de la lluvia intensa, la transmitancia de los paneles solares había disminuido al 87.6% desde el 90.7%. Jiang et al., (2021), estudiando el efecto de la deposición de polvo en diferentes tipos de paneles PV, encontraron que a medida que aumenta la densidad de deposición de polvo de 0 a 22 g/m², la reducción en la producción de energía aumenta del 0% al 26%.

Para evitar esta afectación, existen técnicas de limpieza manual, automática y autolimpieza para los módulos solares. La limpieza manual tiene un alto consumo de recursos como agua y electricidad. Por lo tanto, los revestimientos hidrofóbicos, especialmente los nanohidrofóbicos basados en nano-sílice, dióxido de titanio, óxido de zinc, son una buena opción para el mantenimiento de los paneles solares, ya que ayudan a evitar la acumulación de polvo y su impacto en la eficiencia.

Por ejemplo, se reportó que el uso de un recubrimiento hidrofóbico de SiO₂ mejoró significativamente el rendimiento de los módulos solares. La potencia de salida aumentó un 15% en comparación con los módulos cubiertos de polvo y un 5% en comparación con los módulos sin recubrimiento que requerían limpieza diaria manual. El módulo revestido con recubrimiento hidrofóbico tiene una eficiencia eléctrica promedio del 13.79%, en comparación con el 13.29% del módulo sin revestir. Se encontró que los paneles revestidos generan un 13% más de potencia de salida, incluso si la superficie no se limpia con regularidad. Asimismo, el tratamiento superficial con un recubrimiento en los paneles solares puede protegerlos de la corrosión, la suciedad y las pérdidas por reflexión.

Empleo del Concentrador Solar de Luminescencia para aumentar la eficiencia de los paneles solares

Un Concentrador Solar de Luminescencia (LSC) es un dispositivo que absorbe y concentra la energía lumínica. Estos concentradores contienen pequeñas concentraciones de luminóforos o fluoróforos. Los emisores LSC absorben parte de la radiación solar y la emiten en longitudes de onda más largas a través de la fotoluminiscencia. Los Concentradores Solares Luminescentes ganaron relevancia desde su inicio en 1977, hasta alrededor de 1988. Posteriormente, hubo un resurgimiento en el año 2000 con la aparición de los puntos cuánticos que, permitieron una emisión de luz en una longitud de onda diferente. El progreso fue lento hasta 2006, pero desde 2007 hasta la actualidad, han surgido nuevos materiales

fluorescentes, como los puntos cuánticos CdSe/CdS y los puntos de carbono C-dots (Debije et al., 2012).

6. Conclusión

Este artículo examina detalladamente diversas técnicas de enfriamiento utilizadas para mejorar el rendimiento de un sistema fotovoltaico (PV). Un adecuado enfriamiento de los sistemas PV mejora la eficiencia térmica, eléctrica y global, reduciendo así, la tasa de degradación de las celdas y maximizando la vida útil del módulo. Se analizan y comparan estas tecnologías que abordan la influencia no deseada de la temperatura en la eficiencia del PV, considerando sus ventajas, desventajas y sus implicaciones tecnoeconómicas y ambientales. Asimismo, se revisaron y clasificaron varios artículos de diferentes campos de investigación según su enfoque, contribución y el tipo de tecnología utilizada para lograr el enfriamiento y, al mismo tiempo, aumentar la eficiencia del panel. Finalmente, las investigaciones futuras deberán centrarse en la extracción efectiva de calor de la superficie de un módulo PV y en su enfriamiento de una manera más controlada y estable. Según lo aprendido de los estudios revisados, las siguientes tecnologías de enfriamiento muestran promesas en función de cuatro ejes primordiales, los materiales utilizados, el costo de capital, el rendimiento y su impacto ambiental.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Tecnológica de Tecámac por las facilidades otorgadas para la realización del documento.

Referencias

- Aghaei, M., Fairbrother, A., Gok, A., Ahmad, S., Kazim, S., Lobato, K., ... & Kettle, J. (2022). Review of degradation and failure phenomena in photovoltaic modules. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 159, 112160. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112160>
- Al-Shahri, O. A., Ismail, F. B., Hannan, M. A., Lipu, M. H., Al-Shetwi, A. Q., Begum, R. A., & Soujeri, E. (2021). Solar photovoltaic energy optimization methods, challenges and issues: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 284, 125465. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125465>
- Bayrak, F., Oztop, H. F., & Selimefendigil, F. (2020). Experimental study for the application of different cooling techniques in photovoltaic (PV) panels. *Energy Conversion and Management*, 212, 112789. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112789>
- Bonomo, M., Taheri, B., Bonandini, L., Castro-Hermosa, S., Brown, T. M., Zanetti, M., ... & Brunetti, F. (2020). Thermosetting polyurethane resins as low-cost, easily scalable, and effective oxygen and moisture barriers for perovskite solar cells. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12(49), 54862-54875 <https://doi.org/10.1021/acsami.0c17652>
- Czanderna, A. W., & Pern, F. J. (1996). Encapsulation of PV modules using ethylene vinyl acetate copolymer as a pottant: A critical review. *Solar energy materials and solar cells*, 43(2), 101-181. [https://doi.org/10.1016/0927-0248\(95\)00150-6](https://doi.org/10.1016/0927-0248(95)00150-6)
- Debije, M. G., & Verbunt, P. P. (2012). Thirty years of luminescent solar concentrator research: solar energy for the built environment. *Advanced Energy Materials*, 2(1), 12-35. <https://doi.org/10.1002/aenm.201100554>
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes*. John Wiley & Sons.
- Dwivedi, P., Sudhakar, K., Soni, A., Solomin, E., & Kirpichnikova, I. (2020). Advanced cooling techniques of PV modules: A state of art. *Case studies*

- in thermal engineering, 21, 100674. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100674>
- Elminir, H. K., Ghitas, A. E., Hamid, R. H., El-Hussainy, F., Beheary, M. M., & Abdel-Moneim, K. M. (2006). Effect of dust on the transparent cover of solar collectors. *Energy conversion and management*, 47(18-19), 3192-3203. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.02.014>
- García Martínez, R. (2015). Utilización de polímeros de bajo band-gap en células fotovoltaicas. <http://hdl.handle.net/10317/4997>
- Godet, M. & Durance, P. (2011). La prospectiva estratégica para las empresas y los territorios. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. Cuadernos de LIPSOR. Foundation Prospective et Innovation. Recuperado en: <http://www.lapropective.fr/dyn/francais/actualites/SR10vSpa.pdf>
- Hadipour, A., Zargarabadi, M. R., & Rashidi, S. (2021). An efficient pulsed-spray water cooling system for photovoltaic panels: Experimental study and cost analysis. *Renewable Energy*, 164, 867-875. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.021>
- Hassan, A., Wahab, A., Qasim, M. A., Janjua, M. M., Ali, M. A., Ali, H. M., ... & Javaid, N. (2020). Thermal management and uniform temperature regulation of photovoltaic modules using hybrid phase change materials-nanofluids system. *Renewable Energy*, 145, 282-293. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.130>
- Hee, W. J., Alghoul, M. A., Bakhtyar, B., Elayeb, O., Shameri, M. A., Alrubaih, M. S., & Sopian, K. (2015). The role of window glazing on daylighting and energy saving in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 323-343. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.020>
- Jiang, H., Yao, L., Lu, N., Qin, J., Liu, T., Liu, Y., & Zhou, C. (2021). Multi-resolution dataset for photovoltaic panel segmentation from satellite and aerial imagery. *Earth System Science Data*, 13(11), 5389-5401. <https://doi.org/10.5194/essd-13-5389-2021>
- Klampafitis, E., & Richards, B. S. (2011). Improvement in multi-crystalline silicon solar cell efficiency via addition of luminescent material to EVA encapsulation layer. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 19(3), 345-351. <https://doi.org/10.1002/pip.1019>
- Ma, T., Li, Z., & Zhao, J. (2019). Photovoltaic panel integrated with phase change materials (PV-PCM): technology overview and materials selection. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 116, 109406. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109406>
- Maleki, A., Haghighi, A., Assad, M. E. H., Mahariq, I., & Nazari, M. A. (2020). A review on the approaches employed for cooling PV cells. *Solar Energy*, 209, 170-185. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.08.083>
- Mazumder, M. K., Horenstein, M. N., Joglekar, N. R., Sayyah, A., Stark, J. W., Bernard, A. A., ... & Lloyd, A. H. (2017). Mitigation of dust impact on solar collectors by water-free cleaning with transparent electrodynamic films: progress and challenges. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 7(5), 1342-1353. doi: 10.1109/JPHOTOV.2017.2721462.
- Mustafa, R. J., Gomaa, M. R., Al-Dhaifallah, M., & Rezk, H. (2020). Environmental impacts on the performance of solar photovoltaic systems. *Sustainability*, 12(2), 608. <https://doi.org/10.3390/su12020608>
- Muteri, V., Cellura, M., Curto, D., Franzitta, V., Longo, S., Mistretta, M., & Parisi, M. L. (2020). Review on life cycle assessment of solar photovoltaic panels. *Energies*, 13(1), 252. <https://doi.org/10.3390/en13010252>
- Naciones Unidas. (2016). Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible, una oportunidad para América Latina y el Caribe. Santiago: CEPAL.
- Santhakumari, M., & Sagar, N. (2019). A review of the environmental factors degrading the performance of silicon wafer-based photovoltaic modules: Failure detection methods and essential mitigation techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 110, 83-100. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.024>
- Sargunanathan, S., Elango, A., & Mohideen, S. T. (2016). Performance enhancement of solar photovoltaic cells using effective cooling methods: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64, 382-393. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.024>
- Sarkın, A. S., Ekren, N., & Sağlam, Ş. (2020). A review of anti-reflection and self-cleaning coatings on photovoltaic panels. *Solar Energy*, 199, 63-73. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.01.084>
- Sato, D., & Yamada, N. (2019). Review of photovoltaic module cooling methods and performance evaluation of the radiative cooling method. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 104, 151-166. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.051>
- Starowicz, A., Rusanowska, P., & Zieliński, M. (2023). Photovoltaic cell—the history of invention—review. *Polityka Energetyczna-Energy Policy Journal*, 169-180. DOI: 10.33223/epj/161290
- Toffler, A. (1973). *El shock del futuro*. Barcelona: Plaza & Janes
- Vieira, R. G., de Araújo, F. M., Dhimish, M., & Guerra, M. I. (2020). A comprehensive review on bypass diode application on photovoltaic modules. *Energies*, 13(10), 2472. <https://doi.org/10.3390/en13102472>
- Vieira, R. G., de Araújo, F. M., Dhimish, M., & Guerra, M. I. (2020). A comprehensive review on bypass diode application on photovoltaic modules. *Energies*, 13(10), 2472. <https://doi.org/10.3390/en13102472>