

Evolución tecnológica de la generación solar fotovoltaica: una revisión de la literatura en la última década

Technological Evolution of Photovoltaic Solar Generation: A Literature Review in the Last Decade

Richard Fernando Criollo Enríquez¹ <https://orcid.org/0009-0000-5763-9225>,
Danny Paúl Guayllas Domínguez¹ <https://orcid.org/0009-0004-1260-8176>, Danny Ochoa Correa²
<https://orcid.org/0000-0001-5633-1480>

¹Facultad de Ingeniería, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador
richard.criollo@ucuenca.edu.ec, danny.guayllasd@ucuenca.edu.ec

²Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones,
Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador
danny.ochoac@ucuenca.edu.ec



Esta obra está bajo una licencia internacional
Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0.

Enviado: 2024/04/08
Aceptado: 2024/10/29
Publicado: 2024/12/30

Resumen

La innovación constante de tecnologías para generar energía eléctrica mediante el uso de recursos renovables ha permitido que en los últimos años pueda ser competitiva con las tecnologías tradicionales hasta el punto de ser una gran opción en sistemas a gran escala. Actualmente, las nuevas tecnologías fotovoltaicas permiten obtener mayores eficiencias de conversión de energía, a la vez que reducen costos con la implementación de nuevos materiales, siendo este último criterio primordial para su posterior implementación a gran escala. Este artículo presenta una revisión de la literatura sobre la evolución tecnológica de generación solar fotovoltaica, evaluando y analizando únicamente artículos publicados en el periodo 2013-2023, mediante la metodología PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews, por sus siglas en inglés). De un total de 307 artículos identificados en prestigiosas bases de datos como Science Direct, IEEEExplore y Scopus, se ha seleccionado sistemáticamente y se ha revisado un subconjunto de 12 artículos científicos acorde a determinados criterios de inclusión y exclusión definidos por los investigadores. La síntesis del contenido de los artículos seleccionados revela que las tecnologías emergentes: células de multi-unión, de perovskita, células solares orgánicas y celdas de heterounión de película delgada, han logrado superar la

Sumario: Introducción, Materiales y Métodos, Resultados, Discusión de Resultados, Conclusiones.

Como citar: Criollo, R., Guayllas, D., & Ochoa, D. (2024). Evolución tecnológica de la generación solar fotovoltaica: una revisión de la literatura en la última década. *Revista Tecnológica - Espol*, 36(2), 13-31. <https://rte.espol.edu.ec/index.php/tecnologica/article/view/1158>

eficiencia de las células solares convencionales y presentar precios más competitivos en pos facilitar la expansión de sistemas fotovoltaicos en múltiples aplicaciones.

Palabras clave: Células fotovoltaicas; paneles fotovoltaicos; tecnología de materiales fotovoltaicos, energías renovables, generación fotovoltaica.

Abstract

The constant innovation in technologies for generating electrical energy through the use of renewable resources has allowed them to become competitive with traditional technologies in recent years. This has made them a great option for large-scale systems. Currently, new photovoltaic technologies enable higher energy conversion efficiencies while reducing costs through the implementation of new materials, the latter being a key criterion for their subsequent large-scale deployment. This article presents a literature review on the technological evolution of photovoltaic solar generation, evaluating and analyzing only articles published between 2013 and 2023, using the PRISMA methodology (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). From a total of 307 articles identified in prestigious databases such as Science Direct, IEEEXplore, and Scopus, a subset of 12 scientific articles has been systematically selected and reviewed according to specific inclusion and exclusion criteria defined by the researchers. The synthesis of the content of the selected articles reveals that emerging technologies, such as multi-junction cells, perovskite cells, organic solar cells, and thin-film heterojunction cells, have achieved higher efficiencies than conventional solar cells and offer more competitive prices, facilitating the expansion of photovoltaic systems in multiple applications.

Keywords: Photovoltaic cells; Photovoltaic panels; Photovoltaic materials technology; renewable energies, photovoltaic generation.

Introducción

Actualmente, a nivel mundial, se muestra una gran dependencia de los combustibles fósiles dentro de la matriz energética. Sin embargo, esta dependencia energética anticipa un escenario futuro complejo, caracterizado por un aumento progresivo de la demanda y la emisión de gases de efecto invernadero (Ozden et al., 2020a; Parhamfar et al., 2024). Este panorama resalta la necesidad de implementar cambios significativos en la matriz energética para abordar de manera efectiva los desafíos asociados con la creciente demanda y la sostenibilidad ambiental. La energía solar emerge como una solución fundamental para abordar eficazmente este dilema, ya que constituye una fuente renovable y sostenible que no solo proporciona una alternativa más respetuosa con el medio ambiente, sino que también contribuye a reducir las emisiones de gases contaminantes (Bošnjaković et al., 2023; Zhang et al., 2023). Según varios escenarios, se proyecta que más del 16% de la demanda mundial de energía será suministrada a través de la energía fotovoltaica para el año 2050 (British Petroleum, 2022; Hallam et al., 2022), en donde el éxito de dicha tecnología dependerá de factores clave basados en la rentabilidad, la confiabilidad y la eficiencia (Ozden et al., 2020a).

La eficiencia de un panel solar está relacionada con la calidad de sus células fotovoltaicas (Li et al., 2021), por ello durante las últimas décadas, se ha llevado a cabo una intensiva investigación en nuevos materiales y estructuras de celdas solares con el fin de desarrollar nuevas tecnologías fotovoltaicas que puedan sustituir o complementar la bien establecida tecnología fotovoltaica basada en silicio y permitir las futuras demandas de consumo de energía con bajo impacto ambiental (Abdellatif et al., 2020; Boychev & Petkova, 2023).

Entre las novedosas estructuras fotovoltaicas se destacan las células tándem (Araki et al., 2020), células solares de perovskita (Xu et al., 2020), celdas solares orgánicas e híbridas (Liu et al., 2022), celdas solares de película extremadamente delgada (An et al., 2022), celdas solares de heterounión de película delgada (Saïdi et al., 2020), celdas solares sensibilizadas con tintes y semiconductores (Liu et al., 2021). Si bien algunas de estas tecnologías aún están en desarrollo y tienen una eficiencia baja, es importante destacar que al ser tecnologías de laboratorio, tienen el potencial de mejorar su eficiencia (Green et al., 2023a). Por otro lado, la tecnología de células solares de silicio cristalino de unión única está alcanzando rápidamente los límites prácticos y teóricos de eficiencia. Los procesos industriales aplicados a esta tecnología son capaces de producir células de gran área con eficiencias cercanas al 24% (White et al., 2014). A medida que la producción comercial se aproxima a estos límites, la reducción adicional de costos solo será posible mediante una fabricación más económica, a menos que se encuentre una solución práctica para elevar las eficiencias hacia el 30% y más allá (White et al., 2014).

Una solución prometedora es la exploración y combinación de nuevos materiales, tal como la célula tándem que combina tecnología de células solares de película delgada de bajo costo con células c-Si de alta eficiencia existentes en una configuración apilada mecánicamente (Wang & Wu, 2023). Otro avance significativo es la película delgada que continúa mostrando mejoras y ahora ha alcanzado un nivel de rendimiento comparable al de las obleas de p-Si, con una eficiencia máxima del 21% utilizando un absorbedor Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS) y del CdTe (Reinhard et al., 2015). Por otra parte, los módulos solares de tecnología bifacial, que aprovechan la radiación solar tanto en sus superficies delanteras como traseras (Jiang et al., 2023), han emergido como una tecnología con gran potencial para el uso en sistemas fotovoltaicos a gran escala. Esta capacidad de captación por ambas caras permite un aumento significativo en la eficiencia de conversión de energía, ya que maximiza la producción de energía eléctrica al captar la luz solar directa y la luz reflejada desde el suelo y otros objetos circundantes (Ernst et al., 2024).

El avance hacia tecnologías fotovoltaicas más eficientes y asequibles desempeñará un papel determinante en el impulso y la promoción de soluciones destinadas al autoabastecimiento energético de los distintos tipos de consumidores, una meta perseguida por varios países latinoamericanos, entre ellos Ecuador (Chabla-Auqui et al., 2023; Solano et al., 2024). En este contexto, comprender los avances de la última década en el desarrollo de paneles solares y sus tendencias se vuelve esencial para enfrentar los desafíos energéticos actuales y futuros. La literatura reciente sugiere un creciente interés en las células solares de próxima generación, como las de perovskita y las células de multi-unión, que prometen superar las limitaciones de eficiencia y costo de las tecnologías de silicio tradicionales.

Este artículo ofrece una revisión exhaustiva de la literatura sobre la evolución de la energía solar fotovoltaica, enfocada principalmente en los avances en eficiencia de las células solares durante la última década. A través de un análisis detallado, empleando la metodología PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews, por sus siglas en inglés) (Page et al., 2021), se resaltan tanto los logros actuales como las perspectivas futuras de estas tecnologías. La contribución y novedad de este estudio radican en su enfoque en las células solares emergentes que están desafiando los límites establecidos por el silicio cristalino, lo cual es crucial en un momento en que las tecnologías convencionales están alcanzando sus límites teóricos. Este artículo proporciona una visión general de las innovaciones tecnológicas, además, destaca las barreras y oportunidades que enfrentan estas tecnologías en su camino hacia la comercialización masiva. Esto es fundamental para una acertada toma de decisiones e

incentivo de la implementación de este tipo de tecnologías, que gran parte de las normativas nacionales admiten y promueven.

Materiales y Métodos

Criterios aplicados para la selección de documentos

La recopilación de documentos relevantes para este artículo se basó en un principio en la investigación de artículos científicos en bases de datos importantes como: IEEEExplore, Science Direct y Scopus, aplicando una búsqueda avanzada con los términos de búsqueda “new materials photovoltaic” AND “new photovoltaic technologies” además de establecer un rango de tiempo desde el año 2013 hasta finales del año 2023. Los criterios de inclusión definidos se presentan de forma resumida en la Tabla 1.

Tabla 1

Resumen de búsqueda en bases de datos

Términos de búsqueda	Catálogo digital	Tipos de documento	Cantidad de artículos
“New” “AND materials” AND “new photovoltaic technologies”	Science Direct	Artículos	50
“All Metadata”:new materials photovoltaic AND “All Metadata”:new photovoltaic technologies	IEEEExplore	Revistas	198
TITLE-ABS-KEY (“new materials” AND “photovoltaic” AND “technology”) AND PUBYEAR >2012 AND PUBYEAR <2024 AND PUBYEAR >2012 AND PUBYEAR <2024 AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , “ar”))	Scopus	Artículos	59

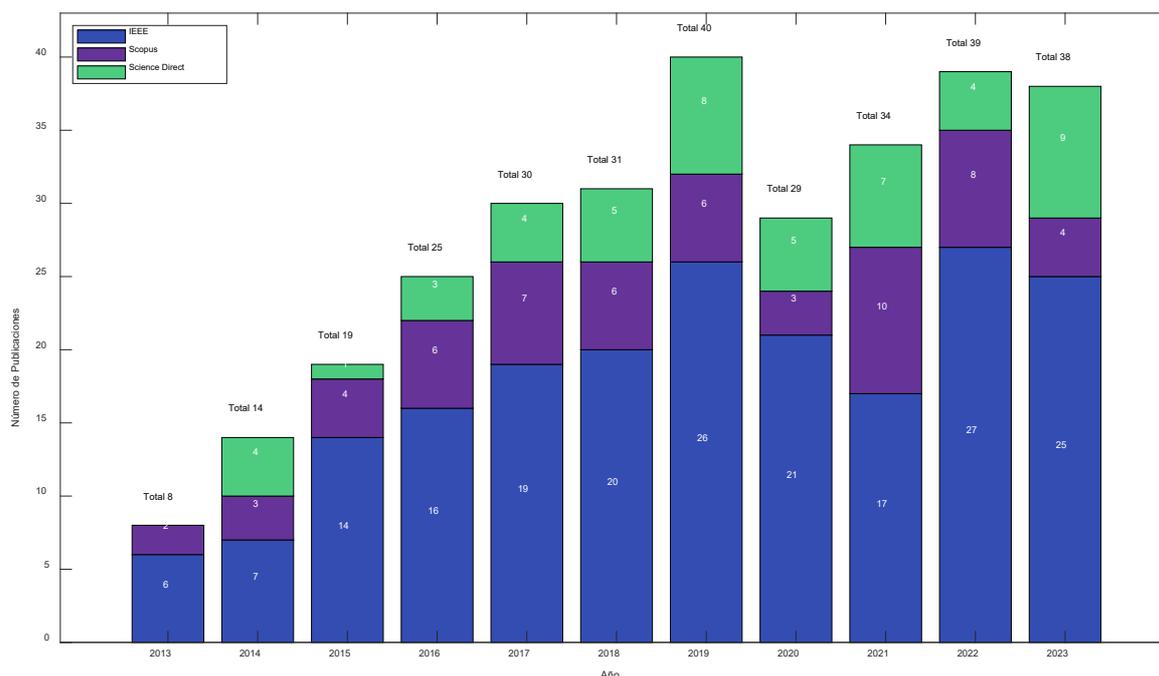
Como parte de la filtración inicial de documentos, se excluyeron aquellas publicaciones que no fueran artículos científicos aplicando además de los criterios de búsqueda anteriores los siguientes: Filtro “Revistas” en IEEE Xplore, tipo de artículo: “Artículo de investigación” en Science Direct, tipo de documento: “Artículo” en Scopus. De esta forma fue posible eliminar documentos como: artículos de opinión, revistas periódicas tipo “magazine”, artículos editoriales, libros, entre otros. El idioma de las obras consultadas no constituyó una restricción en este estudio.

Análisis de los documentos encontrados

La tendencia en la base de datos de IEEE Xplore reflejó un creciente interés en la investigación sobre la energía solar fotovoltaica, alcanzando su punto máximo de publicaciones en el año 2022 con 27 ítems. En contraste, la base de datos de Scopus mostró una distribución dispersa de artículos a lo largo de los años, sin una tendencia clara de crecimiento. Por último, en Science Direct se observó un leve aumento en el número de publicaciones en los últimos años, con un máximo de 9 ítems en el año 2023. Estos hallazgos se muestran en la Figura 1.

Figura 1

Distribución de publicaciones en el horizonte temporal que abarca a la prospección literaria



Fuente: elaboración propia.

Los datos combinados de las tres bases de datos evidenciaron una tendencia creciente en investigaciones sobre nuevas tecnologías de generación de energía solar fotovoltaica (ver Figura 1). Entre 2019 y 2020, se registró el pico de publicaciones con un total de 40 artículos.

Procesos de búsqueda, filtración y selección de documentos

Una vez recopilada una base sólida de documentos para el artículo, se aplicó la metodología PRISMA para garantizar transparencia, integridad y confiabilidad en la revisión de artículos. Este proceso se detalla en la Figura 2.

Se consultaron documentos en las bases de datos de: IEEE Xplore, Science Direct y Scopus, utilizando criterios de búsqueda avanzada para abarcar publicaciones del periodo 2013-2023. Este proceso inicial resultó en la identificación de 307 artículos científicos, cuyos metadatos fueron organizados y gestionados mediante la aplicación Zotero, facilitando la gestión de referencias bibliográficas y asegurando una recopilación exhaustiva de los documentos.

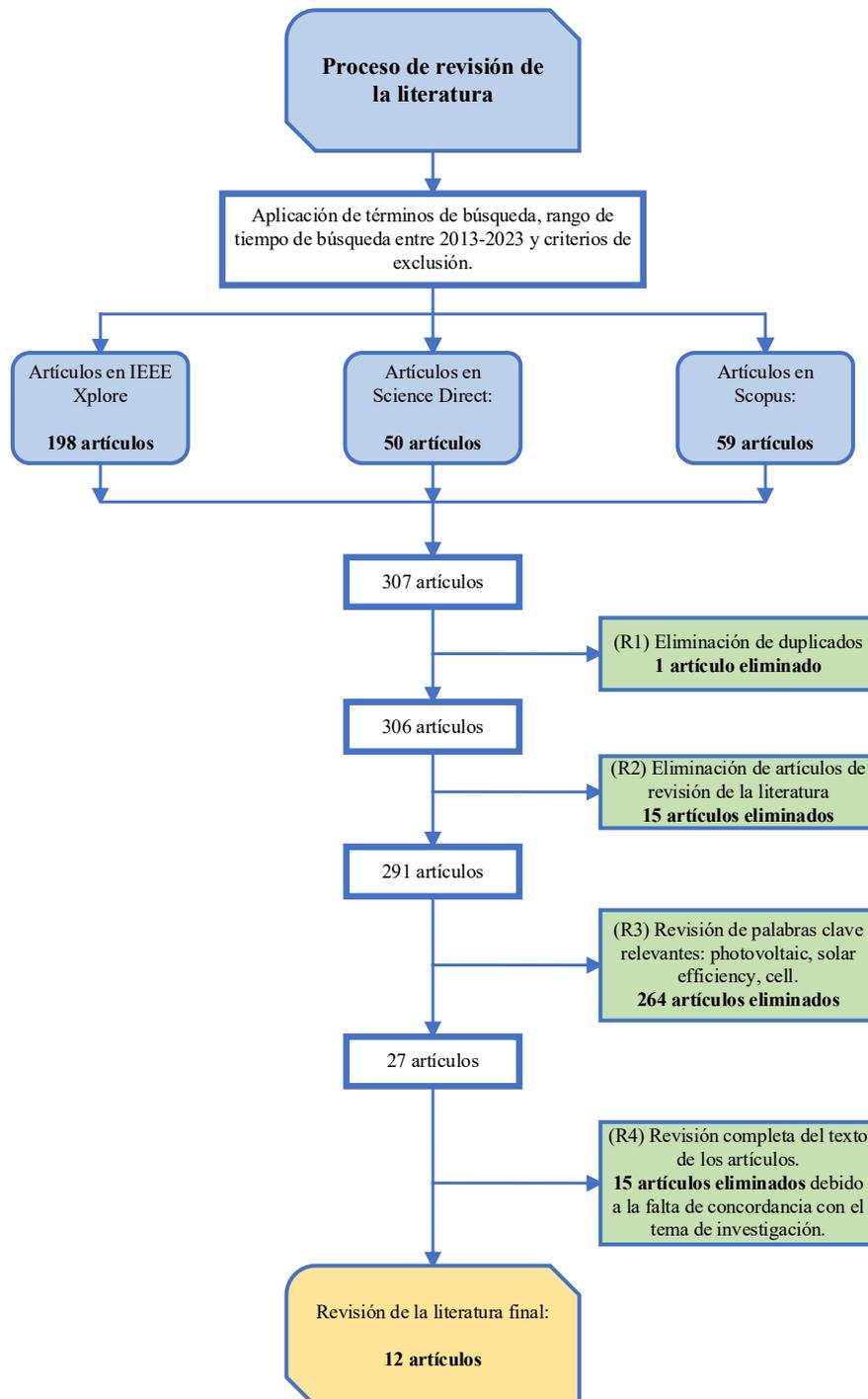
En la primera etapa de revisión (R1), se llevó a cabo una eliminación de duplicados para asegurar que cada artículo fuera único en el conjunto de datos. Esto resultó en la eliminación de un artículo, dejando un total de 306 artículos. La siguiente etapa, R2, consistió en la exclusión de artículos de revisión que no se filtraron correctamente en la parte inicial de la búsqueda, teniendo finalmente con un sobrante de 291 artículos.

La etapa R3 se centró en una revisión temática mediante la herramienta de análisis bibliométrico VOSviewer, que permitió identificar y priorizar artículos que contenían palabras clave esenciales para esta investigación, tales como “photovoltaic”, “solar”, “efficiency” y “cell”. Se generó un mapa bibliométrico de co-ocurrencia, como se ilustra en la Figura 3, que sirvió como guía para la selección de artículos cuyo contenido se alineaba con los temas de

interés de esta revisión. Este análisis bibliométrico detallado resultó en la eliminación de 264 artículos que no cumplían con los criterios de relevancia temática, dejando 27 artículos para la etapa final de revisión.

Figura 2

Metodología de revisión literaria aplicada



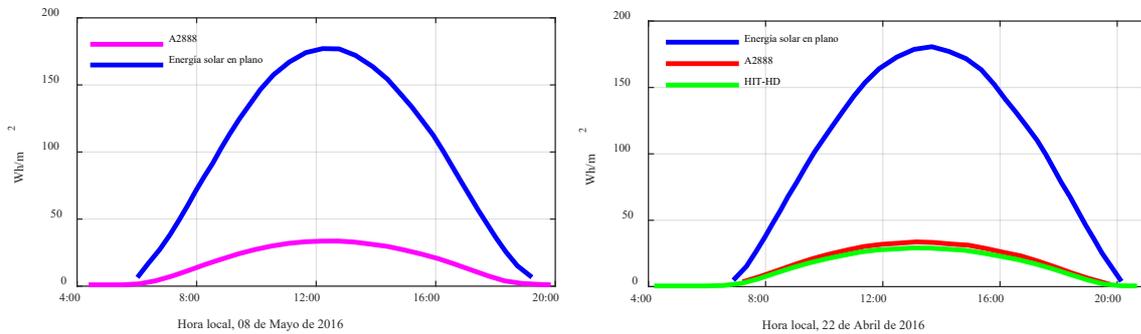
Fuente: elaboración propia basada en Page et al., (2021)

La revisión final, R4, consistió en una evaluación exhaustiva del contenido de los artículos restantes para determinar su pertinencia y contribución significativa a los objetivos de la investigación. Durante esta fase, se eliminaron 15 artículos que no ofrecían información

parecido. Es importante destacar que el rendimiento del módulo HIT convencional fue inferior al del mini-módulo IBC en el estudio conducido, como se muestra en la Figura 4.

Figura 4

Radiación solar y rendimiento de los módulos en un cielo despejado



Fuente: elaboración propia basada en Ozden et al., (2020a).

Seguido a esto, en Ozden et al., (2020a) se concluye que los mini-módulos funcionan mejor que el módulo HIT en cuanto a potencia de la placa del módulo. Sin embargo, cuando se considera los valores de potencia máxima para los módulos derivados de datos exteriores, se observa que los módulos HIT y los mini-módulos tenían relaciones de rendimiento similares. Las eficiencias exteriores promedio de un año de operación son 19.05%, 18.36% y 15.83% para IBC (ECN), IBC (GUNAM) y HIT-HD (GUNAM), respectivamente. Es importante mencionar que el módulo HIT funcionó por debajo de la clasificación nominal, sin embargo, se mantuvo estable durante el año de operación analizado.

Finalmente, lo que rescatan Ozden et al., (2020a) es que entre los tres módulos analizados y medidos, HIT parece tener la menor pérdida de energía a valores de alta temperatura. Teniendo en cuenta esto, se comprueba que la temperatura es un factor importante al considerar instalar paneles fotovoltaicos en diferentes entornos.

Eficiencias de células y paneles fotovoltaicos

En la última década, se ha encontrado que la investigación y fusión de innovadores materiales ha posibilitado el avance y competitividad de las células solares. Destacan las células Tandem, células solares orgánicas, células de película delgada CIGS, células con heterounión intrínseca de capa fina y las células de perovskita. Estas tecnologías han experimentado mejoras continuas en su eficiencia, alcanzando valores prometedores que impulsan significativamente el progreso de la eficiencia fotovoltaica.

Células de perovskita

La perovskita es un mineral formado a partir del compuesto de titanio de calcio y el óxido de titanio de calcio, el cual ha sido usado intensivamente en la última década para la fabricación de células solares, logrando conseguir mejorar su eficiencia del 3.8% al 25.7% (Green et al., 2023b). El material más estudiado para la creación de este tipo de células es el haluro de plomo de metilamonio. Este material presenta la ventaja de contar con un intervalo de energía prohibida ajustable y un coeficiente de absorción considerablemente alto (Khattoon et al., 2023).

La primera de la célula solar de perovskita, desarrollada en 2009, logró una eficiencia del 3.8% utilizando compuestos híbridos orgánicos-inorgánicos (Khattoon et al., 2023). Posteriormente, se introdujeron modificaciones, como la incorporación de nanopartículas de

MAPbI₃, que aumentaron la eficiencia al 9.7%. Más adelante, el dopaje de cloruro de metilendiamina junto con una arquitectura de doble haluro permitió alcanzar eficiencias de hasta el 23.7% (Khatoun et al., 2023).

El avance más reciente en la eficiencia de las células solares de perovskita muestra un registro del 25.7% (Green et al., 2023b). Aunque la perovskita ha experimentado un rápido avance en términos de eficiencia en la última década, sufre de una baja estabilidad frente a las células comerciales.

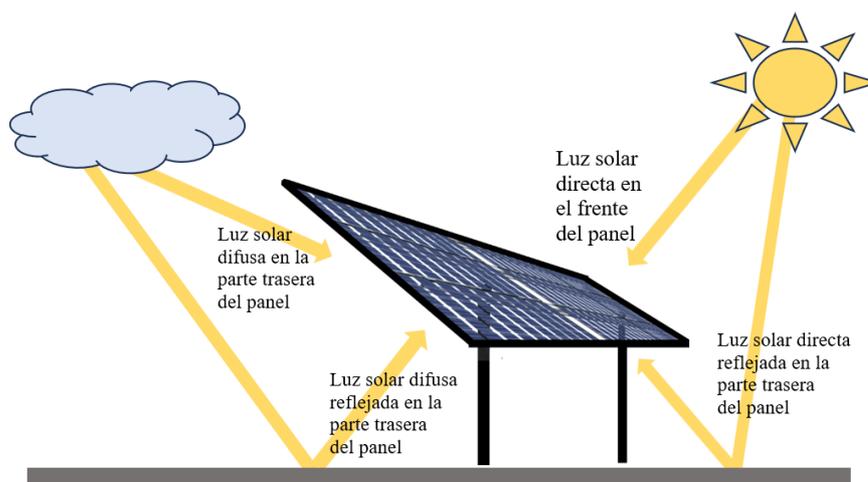
Células solares multi-unión (TSCs)

Las células solares multi-unión fabricadas con silicio cristalino de bajo costo ofrecen la posibilidad de alcanzar eficiencias superiores al 30%. En White et al., (2014) se examina una célula solar de bajo costo elaborada a partir de una celda inferior de c-Si de alta eficiencia y una ceceada superior de película delgada desarrollada en materiales de bajo costo. La unión de estos dos distintos materiales llega a ser interesante debido a que el material superior puede ser reemplazado por celdas con fuertes absorciones y mala calidad atómica electrónica que es típico de materiales semiconductores abundantes en el planeta tierra que últimamente se han estado investigando para su aplicación como materiales fotovoltaicos alternativos. Al unir estos materiales con una parte inferior de celda de silicio de alta eficiencia se llega a un material equilibrado en costos y con una eficiencia superior a otros tipos de celdas fotovoltaicas.

En Imran et al., (2018) se desarrolla una tecnología bifacial a partir de una doble tándem que tiene como objetivo aumentar la eficiencia de las células solares a partir de una mejora en la recolección del albedo de la luz solar que es reflejada por la tierra, lo que usualmente no es aprovechado por las células solares convencionales, tal como se observa en la Figura 5. La célula de doble tándem utiliza una estructura de celda en tándem que apila múltiples uniones p-n con materiales de mayor banda prohibida en la parte superior con el objetivo de reducir al máximo las pérdidas térmicas debido a la fotoabsorción del espectro solar. Como se menciona en White et al., (2014), la absorción de luz bifacial es una técnica efectiva para mejorar la eficiencia mediante la recolección de la parte reflejada de la luz solar.

Figura 5

Tecnología de paneles solares bifaciales



Fuente: Elaboración propia.

Tanto en White et al., (2014) como en Imran et al., (2018b) con distintos métodos y tecnologías de multiuniones se logran eficiencias superiores al 30%. Los resultados de la

investigación de T.P. White et al., 2014b demostraron que es posible obtener eficiencias superiores al 30% utilizando absorbentes de película delgada en la parte superior con longitudes de difusión del portador en el orden de los 100nm y eficiencia de luminiscencia de 10–5. Por otra parte, en Imran et al., (2018b) se menciona que con una célula solar multi-unión de perovskita/silicio con sus subcélulas HIT unidas a través de un óxido conductor transparente intermedio, se pudo obtener una eficiencia cercana y constante de 33.1% para un amplio rango de espesores de silicio con un albedo terrestre promedio del 30%. Por tal motivo, la célula analizada en Imran et al., (2018) muestra un potencial prometedor para ubicaciones que tienen valores de albedo de modestos a altos. Estos hallazgos coinciden con los datos presentados por Green et al., (2023a) donde se destaca la célula solar TSCs con una eficiencia promedio de $31.3 \% \pm 0.3\%$.

Células Orgánicas

En las últimas décadas, las células solares orgánicas han evolucionado desde las mezclas de elementos donantes y aceptores de electrones basados principalmente en fullerenos hacia nuevas tecnologías no basadas en moléculas de carbono, logrando eficiencias de conversión superiores al 13 % (Hou et al., 2018). Aunque estas células alcanzan altas eficiencias en áreas de dispositivo por debajo de 0.1 cm^2 , su eficiencia ha experimentado un significativo aumento con el uso de capas absorbentes como D18:Y6, alcanzando una eficiencia del 15.24%, según se asevera en Würfel et al., (2021). Además, se destacan ventajas como su bajo peso, flexibilidad mecánica y semi transparencia. Aunque aún no compiten eficientemente con otras tecnologías solares, su versatilidad en instalación las hace atractivas, y se espera que con la continua investigación su eficiencia aumente en los próximos años.

Celdas solares de película delgada CIGS

Las células solares de película delgada se producen mediante la deposición de una o varias capas delgadas sobre un sustrato, como vidrio, plástico o metal. Dentro de esta categoría, las celdas fotovoltaicas de película delgada CIGS (Figura 6) se fabrican aplicando capas muy delgadas de materiales semiconductores en un sustrato como vidrio, plástico o metal (Green et al., 2023b). Estas celdas utilizan un absorbente compuesto de cobre, indio, galio y seleniuro, justificando su designación mediante el uso de sus siglas en inglés (CIGS).

A lo largo del tiempo, las células solares CIGS han experimentado un notable avance en eficiencia y rendimiento. Inicialmente, la eficiencia de conversión de energía solar de la tecnología de película delgada era inferior a la de las células de silicio policristalino (p-Si) (Reinhard et al., 2015). No obstante, en años recientes, los avances en la ciencia de materiales han permitido mejoras significativas en la eficiencia de las células solares CIGS.

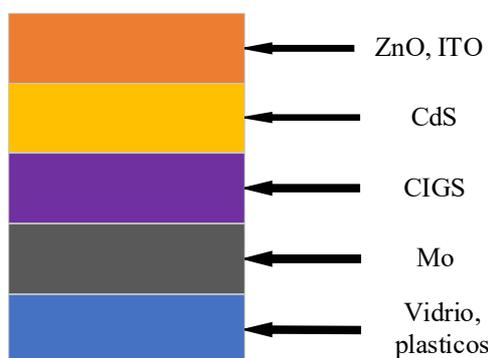
En 2014, laboratorios como el Zentrum für Sonnenenergie-und Wasserstoffforschung (ZSW) en Alemania y los Laboratorios Nacionales de Energía Renovable (NREL) en EE. UU. lograron avances significativos en este tipo de tecnología, encontrando eficiencias del 20.8% y 20.7% (Jackson et al., 2014), respectivamente, en un sustrato de vidrio. Por otro lado, los Laboratorios Federales Suizos de Ciencia y Tecnología de Materiales (Empa) demostraron una eficiencia del 20.4% en un sustrato de plástico (Reinhard et al., 2015). Estos logros se alcanzaron mediante un proceso de coevaporación multietapa a una temperatura elevada cercana a $600 \text{ }^\circ\text{C}$ en el sustrato para el caso de los laboratorios ZSW y NREL, mientras que para el caso de laboratorios Empa se utilizó una temperatura de sustrato inferior a $600 \text{ }^\circ\text{C}$. Complementario a ello, el laboratorio Solibro (Solibro GmbH, Alemania) demostró la posibilidad de aumentar aún más la eficiencia, llegando a un valor del 21% mediante un tratamiento de postdeposición (PDT) con fluoruro de potasio (KF) (Reinhard et al., 2015).

La incorporación del potasio en las células CIGS ha llevado al desarrollo de nuevas células solares con una eficiencia relativamente alta, gracias al tratamiento KF PDT aplicado a los absorbentes coevaporados (Reinhard et al., 2015). Este tratamiento implica la aplicación de fluoruro de potasio (KF) después de la deposición del material absorbente de Cu (In,Ga)Se₂ (CIGS) en las células solares de película delgada.

Los avances recientes han elevado las eficiencias de las células solares CIGS por encima del 20%. Un ejemplo es la célula evaluada por el Instituto Nacional de Ciencia y Tecnología Industrial Avanzada, que estableció un nuevo récord mundial con una eficiencia del 23,35% para células policristalinas de película delgada de 1 cm² de tamaño. Estos avances indican una mejora continua en la eficiencia de este tipo de células, lo que sugiere que en un futuro próximo podrían superar a las células de silicio que dominan el mercado actualmente.

Figura 6

Célula solar CIGS



Fuente: elaboración propia basada en Za'abar et al., (2021).

Células solares con heterojuntura solares intrínsecas de capa fina (HIT)

La heterojuntura con células solares intrínsecas de capa fina (HIT) fue desarrollada por Sanyo en 1994; este tipo de célula solar consiste en silicio amorfo ultrafino sobre capas absorbentes de silicio cristalino, con ello ofrece una fabricación de bajo costo dentro de las células solares y una alta eficiencia en comparación con las células solares de silicio cristalino con uniones p-n difusas (Vishkasougheh & Tunaboyle, 2013). Las células solares HIT se caracterizan por su eficiencia dependiente de la heterointerfaz a-Si:H/c-Si (Vishkasougheh & Tunaboyle, 2013) y por su sencillo procedimiento de fabricación, puesto que no requieren procedimientos de alta temperatura.

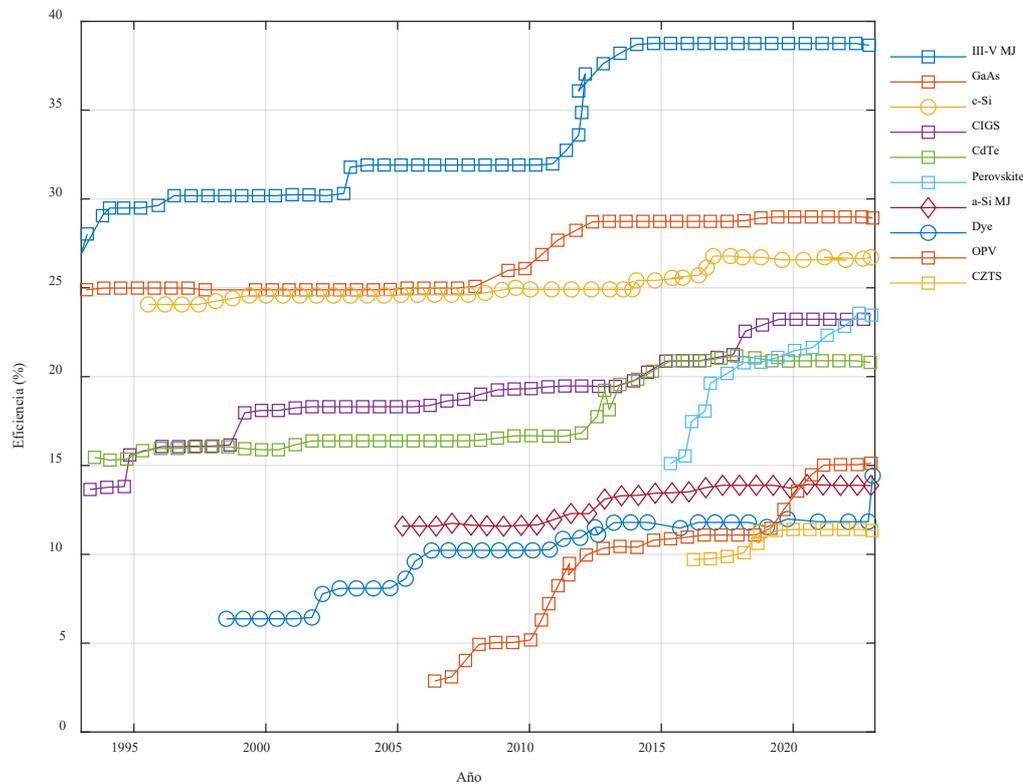
En la última década, las células solares de silicio han experimentado un notable avance, elevando la eficiencia desde el 21.2% hasta el 26.8% (Green et al., 2023b). Este último hito tecnológico se atribuye a la empresa LONGi. LONGi que ha demostrado un progreso constante en las eficiencias de conversión fotovoltaica, logrando romper el récord mundial de eficacia en células HJT.

El avance de la nanoestructura de Si de la unión p-n con una capa superficial de óxido conductor transparente mejora tanto las propiedades fotónicas como la calidad de la interfaz, mejorando significativamente las propiedades eléctricas o la eficiencia de conversión fotónica. La nanoestructura isoelectrónica en la heterounión de silicio para la fabricación de células solares de área amplia es prometedora para la progresión de la eficiencia debido a su estructura compleja o menos costosa (HIT) (Vishkasougheh & Tunaboyle, 2013), por lo cual se espera que en los próximos años esta tecnología presente mejoras significativas en cuanto a eficiencia se refiere.

En la Figura 7, construida a partir de los hallazgos de Green et al., (2023b), se presenta una recopilación de las mejoras en eficiencia en un periodo de 30 años de distintas células fotovoltaicas, incluyendo muchas de las analizadas en este artículo de revisión.

Figura 7

Mayores eficiencias alcanzadas para células fotovoltaicas



Fuente: elaboración propia basada en Green et al., (2023b).

Factores limitantes

Esta sección analiza los factores que han obstaculizado la implementación de células solares para una producción a gran escala teniendo en cuenta factores como rentabilidad y confiabilidad.

A lo largo de los años se ha evidenciado que la introducción de nuevas tecnologías trae consigo costos iniciales elevados, y las energías renovables no convencionales no son una excepción. Por lo tanto, es crucial establecer políticas que fomenten la consolidación y la adopción de las energías renovables para que estas logren establecerse y compitan con las energías convencionales de la actualidad. Los mecanismos más comunes que se han implementado durante esta trayectoria han sido: subsidios a la inversión, subsidios a la tarifa y Sistema de Cuota a las Renovables (RPS1) (Galetovic & Muñoz, 2009). Los dos primeros inicialmente fueron implementados en Europa, permitiendo la masificación de los sistemas eólicos y solares fotovoltaicos en la primera década del siglo XXI a un costo elevado, pero con respaldado político.

Las políticas y regulaciones desempeñan un papel fundamental en el impulso de las energías renovables, dado que esta tecnología, en su fase inicial, conlleva costos de inversión significativos. Estos costos se ven agravados por los esfuerzos destinados a emplear materiales de mayor calidad para alcanzar una mayor eficiencia en las células solares. En Sudamérica, por

ejemplo, las políticas y regulaciones en materia de energías renovables varían según el país, pero en general, se observa un creciente interés en promover su adopción y desarrollo. De acuerdo con Chabla-Auqui et al., (2023), Argentina ha implementado iniciativas como el Proyecto de Energía Renovable en Mercados Rurales y leyes que permiten la generación distribuida (GD) desde 2017. Bolivia cuenta con una ley que promueve el uso de energías renovables, aunque se enfrenta a desafíos en su implementación. En Brasil, se han establecido resoluciones que regulan el acceso de sistemas de GD a la red eléctrica, impulsando el crecimiento de la adopción de sistemas fotovoltaicos. Chile ha promulgado leyes que fomentan la generación de energía renovable y el acceso a la red eléctrica. Colombia ha avanzado en la integración de fuentes de energía renovable en su marco regulatorio, mientras que Ecuador ha establecido regulaciones que promueven la GD (lograda principalmente con sistemas fotovoltaicos) y el autoconsumo. Paraguay, Perú, Uruguay y Venezuela también han tomado medidas para promover el uso de energías renovables, aunque enfrentan desafíos en su implementación debido a factores económicos y políticos (Chabla-Auqui et al., 2023).

Por tal motivo, para alcanzar una implementación exitosa de la energía solar fotovoltaica, es fundamental que la política, rentabilidad, la confiabilidad y la eficiencia se fusionen de manera sinérgica (Ozden et al., 2020b). En este contexto, al analizar la eficiencia de las células solares, es crucial considerar su impacto directo en la rentabilidad del sistema, ya que se puede lograr conseguir una célula solar bastante eficiente, pero con materiales demasiado costosos que eviten su circulación comercial.

Además, los materiales semiconductores III-V, como las células solares de arseniuro de galio (GaAs), han demostrado eficiencias notables, incluso superando a las células de silicio. Sin embargo, el alto costo de fabricación limita su aplicación a la exploración espacial (Srivishnu et al., 2023). Para reducir el costo de producción de las células solares III-V, el Laboratorio Nacional de Energía Renovable ha propuesto un nuevo enfoque llamado "germanio sobre nada" (Enaganti et al., 2022). Este nuevo concepto implica que las células de GaAs se cultiven en una fina capa de germanio que se deposita preliminarmente en un sustrato de germanio reutilizable, sin embargo, los resultados no fueron los mejores y se continúa en procesos de mejora.

Sumado al alto costo de producción de las nuevas tecnologías de células solares, existen barreras técnicas, las que necesitan ser superadas para lograr una producción a gran escala. Estas barreras técnicas se deben a la falta de estudios de estabilidad de la célula solar para garantizar que funcionen incluso después de la sombra parcial, el almacenamiento en la oscuridad y la fatiga mecánica (Srivishnu et al., 2023).

Desafíos y Futuro de la Tecnología Fotovoltaica

La generación eléctrica mediante tecnologías renovables no convencionales como la solar fotovoltaica es variable y depende del clima diario, a diferencia de las tecnologías tradicionales como la hidroeléctrica o térmica (carbón, diésel y vapor). Esto implica que la energía solar no puede proveer electricidad de manera continua, lo que resalta la necesidad de complementarla con otras tecnologías y buscar sistemas de almacenamiento, aunque estos últimos pueden resultar costosos (Pica & Sauma, 2015).

Un ejemplo de este complemento de tecnologías son los colectores híbridos fotovoltaicos/ térmicos (PVT) que convierten la radiación solar simultáneamente en energía térmica y eléctrica con lo cual es posible obtener una tasa de conversión solar más alta por unidad de superficie (Evola & Marletta, 2014a). Los colectores PVT constan de una placa delgada hecha de un material altamente conductor, sobre la cual se encuentran las células

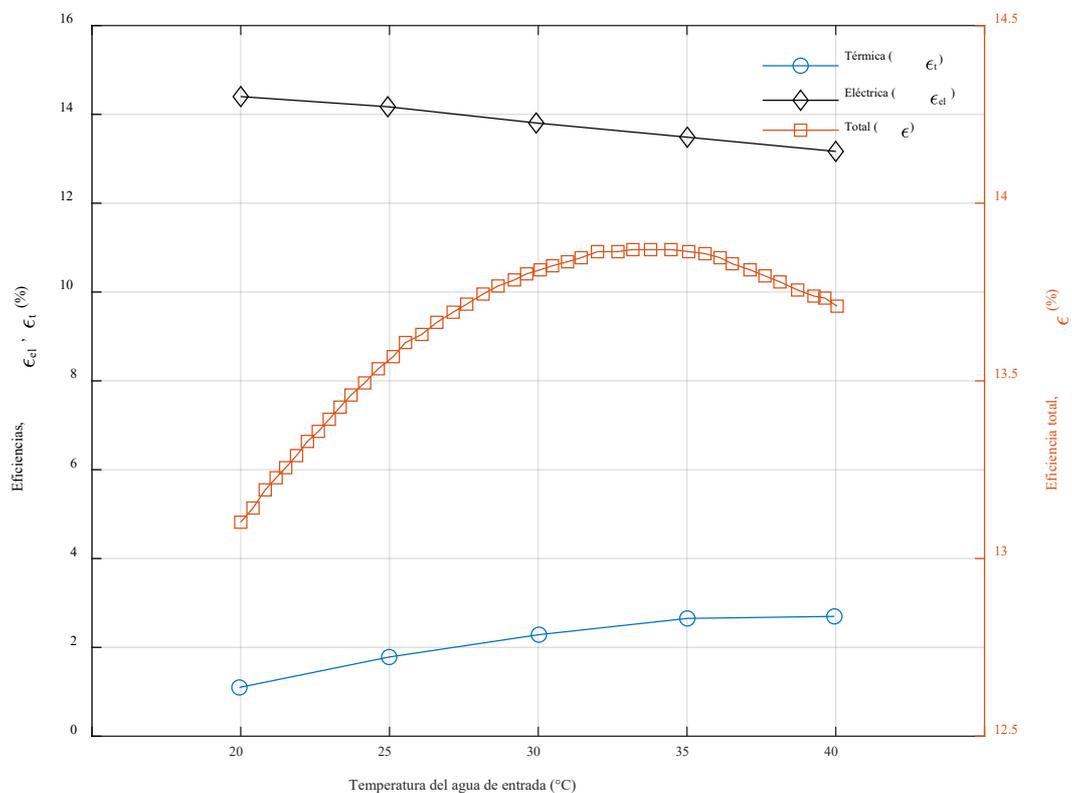
fotovoltaicas insertadas por laminación. En esta fase se absorbe radiación solar y se convierte parcialmente en electricidad. De forma simultánea se permite la circulación de un fluido (normalmente aire o agua) contra la placa absorbente, este fluido es capaz de eliminar exceso de calor de las células fotovoltaicas, reduciendo su temperatura y mejorando de manera significativa su eficiencia eléctrica. Además de esto, es posible disponer de calor de baja calidad para usos apropiados (Evola & Marletta, 2014a).

Este tipo de tecnología se ha venido estudiando en los últimos años, con algunos cambios y mejoras en su desempeño. En Evola & Marletta, (2014a) se plantea un prototipo de colector PVT híbrido refrigerado por agua. Aplicando la primera y segunda Ley de la Termodinámica son capaces de modelar térmicamente el comportamiento del sistema PVT. Lo que se concluye inicialmente en el artículo es que el colector PVT al operar a temperaturas lo más bajas posible, permite obtener altas eficiencias energéticas generales. Sin embargo, dado que se basan únicamente en la Primera Ley de la Termodinámica, estos resultados no hacen referencia a la calidad termodinámica real de las diferentes formas de energía producida por el colector PVT (eléctrica y térmica).

En la Figura 8 se muestra el efecto de la temperatura de entrada de agua en la eficiencia energética promedio anual simulada en el artículo. Se observa dos tendencias diferentes para la eficiencia energética eléctrica y térmica: mientras que la energía eléctrica es favorecida por temperaturas bajas de entrada de agua, la segunda disminuye a temperaturas de entrada bajas. Una tercera tendencia se observa en la Figura 8 cuando se combinan las dos gráficas anteriores obteniendo un rendimiento óptimo al trabajar en el rango de 30°C a 35°C.

Figura 8

Eficiencia energética promedio anual del colector PVT en función de la temperatura del agua de entrada



Fuente: elaboración propia basada en Evola & Marletta, (2014a)

Si bien es cierto que al integrar la energía fotovoltaica con otras tecnologías se logra aumentar la eficiencia del sistema, esto no sería lo más óptimo, ya que dichos complementos implican costos significativos y nuevos factores a considerar para optimizar al máximo la generación de energía, creando nuevos costos de inversión. Por lo tanto, para mejorar la eficiencia de las tecnologías solares, la opción más viable debería enfocarse en estudios que busquen directamente maximizar el rendimiento de las células solares con materiales innovadores y alta estabilidad frente a diversas variaciones con la finalidad de que puedan establecerse comercialmente.

Discusión de Resultados

Después de analizar la evolución tecnológica de la generación solar fotovoltaica en la última década y seleccionar los estudios más relevantes mediante la metodología PRISMA, se destaca una clara tendencia hacia la mejora de la eficiencia y la reducción de costos de las células solares. Aunque se han identificado tecnologías prometedoras, como las células solares multi-unión, que han alcanzado eficiencias superiores al 30%, y las células de perovskita, que muestran avances significativos en eficiencia, aún existen barreras limitantes, como la estabilidad de las células y los altos costos de los materiales. Aunque las células solares multi-unión utilizan materiales de bajo costo, su proceso de fabricación es complejo y representa un desafío para su implementación a gran escala. Estos hallazgos resaltan la necesidad de continuar investigando para superar estas limitaciones y aprovechar todo el potencial de la energía solar fotovoltaica.

La revisión de la literatura destaca la importancia de la temperatura en la eficiencia de las células solares, teniendo eficiencias de conversión de energía mayores a bajas temperaturas. Por otra parte, al mezclar células solares con otros tipos de tecnologías y formar sistemas híbridos, las temperaturas bajas ya no son la mejor opción debido a que hay que considerar nuevos factores para optimizar al máximo el sistema híbrido.

En cuanto a resultados obtenidos a gran escala, la revisión resalta la investigación adicional en temas como aplicación de nuevas tecnologías a gran escala, los impactos ambientales de la implementación de estas nuevas tecnologías y la vida útil de las nuevas células solares.

Conclusiones

La revisión literaria reportada en este artículo muestra la evolución tecnológica de la generación solar fotovoltaica con un enfoque principal a las células solares no convencionales de la última década, con el objetivo principal de mostrar prometedoras alternativas que permitan superar la eficiencia del silicio cristalino, el cual está alcanzando rápidamente sus límites prácticos y teóricos. Este estudio ofrece una visión integral que puede servir de referencia tanto para investigadores del mismo campo como para aquellos de disciplinas afines.

Para los investigadores en el campo de la energía fotovoltaica, los hallazgos de esta investigación proporcionan un compendio de las tecnologías más prometedoras, destacándolas células de multi-unión, de perovskita, células solares orgánicas, celdas de heterounión de película delgada, entre otras. Todas estas células han logrado alcanzar, incluso superar, la eficiencia de las células solares convencionales. Sin embargo, diferentes barreras de confiabilidad y rentabilidad han impedido su producción a escala.

Se evidencia que las células solares multi-unión destacan como el caso más prometedor en términos de eficiencia en la última década, superando el umbral del 30%. Estas células,

aparte de aprovechar materiales abundantes en el universo para su construcción, también ofrecen una rentabilidad más aceptable en comparación con tecnologías como las células de GaAs, que requieren materiales costosos, limitando su aplicación a niveles como la exploración espacial. Sin embargo, a pesar de su eficiencia y el uso de materiales económicos, las células solares multi-unión enfrentan desafíos relacionados con la estabilidad y la optimización de procesos para su producción y comercialización a gran escala. Este hallazgo subraya la importancia de seguir explorando nuevos materiales y técnicas de fabricación que puedan integrarse en tecnologías fotovoltaicas avanzadas; un aspecto de interés para investigadores de otros campos, como la ingeniería de materiales y ambiental.

Referente a los factores limitantes y desafíos futuros se observa que la alta variabilidad del recurso solar supondría la necesidad de contar con sistemas complementarios para las horas de ausencia solar, sin embargo la coordinación entre dos tecnologías supone mayores factores de control y un mayor costo de inversión tal como se analizó el caso del colector PVT, por lo que una mejora de eficiencia supondría sacrificar el criterio de rentabilidad, por esta razón, se concluye que para tener una verdadera evolución tecnológica de generación solar fotovoltaica se debería seguir realizando estudios para encontrar células solares de bajo costo, fácil fabricación y con una alta estabilidad que aseguren su confiabilidad.

Además, este estudio también identifica ciertas limitaciones. Entre ellas, la rápida evolución de las tecnologías fotovoltaicas lo que significa que las mejoras continuas pueden hacer que algunas conclusiones se vuelvan rápidamente obsoletas. Además, muchos de los estudios revisados se encuentran todavía en etapas experimentales o de laboratorio, lo que podría no reflejar completamente su rendimiento en aplicaciones comerciales.

Los resultados de este estudio reflejan una tendencia alentadora: los precios de la tecnología fotovoltaica están disminuyendo mientras su eficiencia aumenta. Este panorama augura una expansión de los sistemas fotovoltaicos a nivel nacional y regional, marcando un paso hacia una matriz energética más sostenible y económica. El acceso generalizado a la energía solar como fuente limpia y renovable se ve facilitado por estas mejoras tecnológicas. Con una creciente disponibilidad de opciones rentables y eficientes, se estimula una mayor adopción de la energía solar en diversos ámbitos, desde el residencial hasta el industrial. Este impulso contribuye significativamente al despliegue generalizado de sistemas fotovoltaicos en la región.

Reconocimientos

Los autores agradecen a la Universidad de Cuenca por facilitar el acceso al Laboratorio de Micro-Red, Facultad de Ingeniería, en cuyas instalaciones fue realizada la presente investigación. Este trabajo forma parte de las actividades investigativas del proyecto titulado «Promoviendo la sostenibilidad energética: Transferencia de conocimientos en generación solar y micromovilidad eléctrica dirigida a la población infantil y adolescente de la parroquia Cumbe», ganador de la XI Convocatoria de proyectos de servicio a la comunidad organizado por la Dirección de Vinculación con la Sociedad de la Universidad de Cuenca, Ecuador, bajo la dirección del autor Danny Ochoa Correa.

Los autores declaran la contribución y participación equitativa de roles de autoría para esta publicación.

Referencias

- Abdellatif, S., Josten, A. S. G., Khalil, D., Erni, & F. Marlow. (2020). Transparency and Diffused Light Efficiency of Dye-Sensitized Solar Cells: Tuning and a New Figure of Merit. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 10(2), 522–530. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2020.2965399>
- An, J., Shen, Y., Roca i Cabarrocas, P., & Chen, W. (2022). Fabrication of Crystalline Si Thin Films for Photovoltaics. *Physica Status Solidi - Rapid Research Letters*, 16(12). <https://doi.org/10.1002/pssr.202200290>
- Araki, K., Tawa, H., Saiki, H., Ota, Y., Nishioka, K., & Yamaguchi, M. (2020). The outdoor field test and energy yield model of the four-terminal on si tandem PV module. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(7). <https://doi.org/10.3390/app10072529>
- Bošnjaković, M., Santa, R., Crnac, Z., & Bošnjaković, T. (2023). Environmental Impact of PV Power Systems. *Sustainability (Switzerland)*, 15(15). <https://doi.org/10.3390/su151511888>
- Boychev, B., & Petkova, P. (2023). Assessment of the Economic Efficiency of a Photovoltaic Plant for a Small and Medium-Sized Production Facility. *2023 15th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF)*, 1–3. <https://doi.org/10.1109/BulEF59783.2023.10406203>
- British Petroleum. (2022). *Statistical Review of World Energy 2022*. https://www.bp.com/content/dam/bp/country-sites/es_es/spain/home/pdfs/noticias/Resumen%20Ejecutivo%20-%20STR.pdf
- Chabla-Auqui, L., Ochoa-Correa, D., Villa-Ávila, E., & Astudillo-Salinas, P. (2023). Distributed Generation Applied to Residential Self-Supply in South America in the Decade 2013–2023: A Literature Review. *Energies*, 16(17), 6207. <https://doi.org/10.3390/en16176207>
- Enaganti, P. K., Soman, S., Devan, S. S., Pradhan, S. C., Srivastava, A. K., Pearce, J. M., & Goel, S. (2022). Dye-sensitized solar cells as promising candidates for underwater photovoltaic applications. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 30(6), 632–639. <https://doi.org/10.1002/pip.3535>
- Ernst, M., Liu, X., Asselineau, C.-A., Chen, D., Huang, C., & Lennon, A. (2024). Accurate modelling of the bifacial gain potential of rooftop solar photovoltaic systems. *Energy Conversion and Management*, 300, 117947. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117947>
- Evola, G., & Marletta, L. (2014a). Exergy and thermoeconomic optimization of a water-cooled glazed hybrid photovoltaic/thermal (PVT) collector. *Solar Energy*, 107, 12–25. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.05.041>
- Galetovic, A., & Muñoz, C. (2009). Energías renovables no convencionales: ¿Cuánto nos va a costar? *Estudios Públicos*, 112. <https://doi.org/10.38178/cep.vi112.461>
- Green, M. A., Dunlop, E. D., Siefert, G., Yoshita, M., Kopidakis, N., Bothe, K., & Hao, X. (2023). Solar cell efficiency tables (Version 61). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 31(1), 3–16. <https://doi.org/10.1002/pip.3646>
- Hallam, B., Kim, M., Underwood, R., Drury, S., Wang, L., & Dias, P. (2022). A Polysilicon Learning Curve and the Material Requirements for Broad Electrification with Photovoltaics by 2050. *Solar RRL*, 6(10). <https://doi.org/10.1002/solr.202200458>
- Hou, J., Inganäs, O., Friend, R. H., & Gao, F. (2018). Organic solar cells based on non-fullerene acceptors. *Nature Materials*, 17(2), 119–128. <https://doi.org/10.1038/nmat5063>
- Imran, H., Durrani, I., Kamran, M., Abdolkader, T. M., Faryad, M., & Butt, N. Z. (2018). High-Performance Bifacial Perovskite/Silicon Double-Tandem Solar Cell. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 8(5), 1222–1229. *IEEE Journal of Photovoltaics*. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2018.2846519>
- Jackson, P., Hariskos, D., Wuerz, R., Wischmann, W., & Powalla, M. (2014). Compositional investigation of potassium doped Cu(In,Ga)Se₂ solar cells with efficiencies up to 20.8%. *Physica Status Solidi (RRL) – Rapid Research Letters*, 8(3), 219–222. <https://doi.org/10.1002/pssr.201409040>

- Jiang, Q., Song, Z., Bramante, R. C., Ndione, P. F., Tirawat, R., Berry, J. J., Yan, Y., & Zhu, K. (2023). Highly efficient bifacial single-junction perovskite solar cells. *Joule*, 7(7), 1543–1555. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2023.06.001>
- Khatoon, S., Kumar Yadav, S., Chakravorty, V., Singh, J., Bahadur Singh, R., Hasnain, M. S., & Hasnain, S. M. (2023). Perovskite solar cell's efficiency, stability and scalability: A review. *Materials Science for Energy Technologies*, 6, 437–459. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2023.04.007>
- Li, W., Wang, D., Zhou, Q., & Dong, H. (2021). Energy Efficiency Evaluation of Photovoltaic Power Generation System Based on Analytic Hierarchy Process and Fuzzy Comprehensive Evaluation. *2021 IEEE 5th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, 1029–1034. <https://doi.org/10.1109/EI252483.2021.9713643>
- Liu, Shi, G., Liu, Z., & Ma, W. (2021). Toward printable solar cells based on PbX colloidal quantum dot inks. *Nanoscale Horizons*, 6(1), 8–23. <https://doi.org/10.1039/d0nh00488j>
- Liu, Zhou, K., Wang, J., Gui, R., Xian, K., Gao, M., Yin, H., Hao, X., Zhou, Z., & Ye, L. (2022). An Aggregation-Suppressed Polymer Blending Strategy Enables High-Performance Organic and Quantum Dot Hybrid Solar Cells. *Small*, 18(19). <https://doi.org/10.1002/sml.202201387>
- Ozden, T., Carr, A. J., Geerligs, B. (L. J.), Turan, R., & Akinoglu, B. G. (2020). One-year performance evaluation of two newly developed back-contact solar modules in two different climates. *Renewable Energy*, 145, 557–568. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.045>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lahu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *The BMJ*, 372. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Parhamfar, M., Sadeghkhan, I., & Adeli, A. M. (2024). Towards the net zero carbon future: A review of blockchain-enabled peer-to-peer carbon trading. *Energy Science and Engineering*, 12(3), 1242–1264. <https://doi.org/10.1002/ese3.1697>
- Pica, A. T., & Sauma, E. E. (2015). *Los desafíos de la utilización de energías renovables no convencionales intermitentes*. Centro de Políticas Públicas UC, Temas de la Agenda Pública, (81), 1-15.
- Reinhard, F. Pianezzi, B. Bissig, A. Chirilă, P. Blösch, S. Nishiwaki, S. Buecheler, & A. N. Tiwari. (2015). Cu(In,Ga)Se₂ Thin-Film Solar Cells and Modules—A Boost in Efficiency Due to Potassium. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 5(2), 656–663. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2014.2377516>
- Saïdi, H., Ben Alaya, C., Boujmil, M. F., Durand, B., Lazzari, J. L., & Bouaïcha, M. (2020). Physical properties of electrodeposited CIGS films on crystalline silicon: Application for photovoltaic hetero-junction. *Current Applied Physics*, 20(1), 29–36. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2019.09.015>
- Solano, J. C., Herrera, V., Ordóñez, Á., Caraballo, M., & Lozano, A. (2024). Economic Analysis of Residential Photovoltaic Self-Consumption in Ecuador: Simulation Tool. *Green Energy and Technology*, 57–69. https://doi.org/10.1007/978-3-031-52171-3_4
- Srivishnu, K. S., Rajesh, M. N., Prasanthkumar, S., & Giribabu, L. (2023). Photovoltaics for indoor applications: Progress, challenges and perspectives. *Solar Energy*, 264, 112057. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.112057>
- Vishkasougheh, M. H., & Tunaboylu, B. (2013). Simulation of high efficiency silicon solar cells with a hetero-junction microcrystalline intrinsic thin layer. *Energy Conversion and Management*, 72, 141–146. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.10.025>
- Wang, F., & Wu, J. (2023). Applications in solar thin films. En *Modern Ion Plating Technology: Fundamentals and Applications* (pp. 321–340). Elsevier.

- White, N. N. Lal, & K. R. Catchpole. (2014). Tandem Solar Cells Based on High-Efficiency c-Si Bottom Cells: Top Cell Requirements for >30% Efficiency. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 4(1), 208–214. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2013.2283342>
- Würfel, U., Herterich, J., List, M., Faisst, J., Bhuyian, M. F. M., Schleiermacher, H.-F., Knupfer, K. T., & Zimmermann, B. (2021). A 1 cm² Organic Solar Cell with 15.2% Certified Efficiency: Detailed Characterization and Identification of Optimization Potential. *Solar RRL*, 5(4), 2000802. <https://doi.org/10.1002/solr.202000802>
- Xu, W., Yao, X., Wu, H., Zhu, T., & Gong, X. (2020). The compositional engineering of organic–inorganic hybrid perovskites for high-performance perovskite solar cells. *Emergent Materials*, 3(6), 727–750. <https://doi.org/10.1007/s42247-020-00128-8>
- Za'abar, F. I., Yusoff, Y., Mohamed, H., Abdullah, S. F., Mahmood Zuhdi, A. W., Amin, N., Chelvanathan, P., Bahrudin, Mohd. S., Rahman, K. S., Samsudin, N. A., & Wan Abdullah, W. S. (2021). A Numerical Investigation on the Combined Effects of MoSe₂ Interface Layer and Graded Bandgap Absorber in CIGS Thin Film Solar Cells. *Coatings*, 11(8), 930. <https://doi.org/10.3390/coatings11080930>
- Zhang, H., Yu, Z., Zhu, C., Yang, R., Yan, B., & Jiang, G. (2023). Green or not? Environmental challenges from photovoltaic technology. *Environmental Pollution*, 320. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121066>