

Revisión sistemática del estudio sobre la eficiencia de células solares de película delgada

Systematic review of the study on the efficiency of thin film solar cells

Recibido: 18/04/2025 - Aceptado: 16/07/2025

Diana Estefanía Aguirre-Ruiz

<https://orcid.org/0009-0002-2263-5595>

diana.aguirre@esepoch.edu.ec

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba, Ecuador

Diana Carolina Aguay-Saquicaray

<https://orcid.org/0000-0002-2855-3876>

diana.aguay@esepoch.edu.ec

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba, Ecuador

David Sebastián Aguay-Saquicaray

<https://orcid.org/0009-0000-2072-2092>

david-seb@hotmail.com

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba, Ecuador

Alcivar Bladimir Ilbay-Telenchano

<https://orcid.org/0009-0002-3242-269X>

ilbayalcivar@gmail.com

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Ambato, Ecuador

Resumen

En el contexto actual de transición energética, las tecnologías fotovoltaicas de película delgada han cobrado protagonismo por su potencial para ofrecer soluciones energéticas más ligeras, económicas y sostenibles. El estudio tuvo como objetivo analizar cómo el grosor de la película y el tipo de material utilizado influyen en la eficiencia de las células solares, y discutir sus implicaciones para la industria fotovoltaica. Para ello, se aplicó la metodología PRISMA, revisando sistemáticamente doce investigaciones publicadas entre 2020 y 2025. Los estudios seleccionados evaluaron tecnologías como CdTe, perovskitas, CIGS, CZTSSe, TiS_3 y nuevos compuestos como AgSbS_2 y SnO_2 dopado. Los resultados demostraron que tanto la reducción de grosor como la elección adecuada de materiales permiten optimizar la absorción solar, aunque también se identificaron desafíos como la estabilidad térmica y la degradación por factores ambientales. Algunas tecnologías, como los perovskitas y el TiS_3 , alcanzaron eficiencias teóricas de hasta 22% en capas submicrométricas, lo que representa un gran avance para aplicaciones móviles y arquitectónicas. Se concluye que no solo la eficiencia, sino también factores como el costo, la durabilidad y el impacto ambiental son cruciales para la adopción industrial. Se recomienda continuar investigando materiales emergentes, mejorar la estabilidad de las celdas y fortalecer políticas de reciclaje y economía circular.

Palabras clave: Celdas fotovoltaicas, película delgada, eficiencia

Abstract

In the current context of energy transition, thin-film photovoltaic technologies have gained prominence for their potential to offer lighter, more economical and sustainable energy solutions. The study aimed to analyze how film thickness and the type of material used influence the efficiency of solar cells, and to discuss their implications for the photovoltaic industry. To do so, the PRISMA methodology was applied, systematically reviewing twelve research studies published between 2020 and 2025. The selected studies evaluated technologies such as CdTe, perovskites, CIGS, CZTSSe, TiS_3 and new compounds such as doped AgSbS_2 and SnO_2 . The results showed that both thickness reduction and appropriate choice of materials allow optimization of solar absorption, although challenges such as thermal stability and degradation by environmental factors were also identified. Some technologies, such as perovskites and TiS_3 , achieved theoretical efficiencies of up to 22% in submicrometer layers, representing a breakthrough for mobile and architectural applications. It is concluded that not only efficiency, but also factors such as cost, durability and environmental impact are crucial for industrial adoption. It is recommended

to continue researching emerging materials, improve cell stability and strengthen recycling and circular economy policies.

Keywords: Photovoltaic cells, thin film, efficiency

Introducción

En la actualidad, la transición energética a nivel global mediante la industria energética y a través de las células solares de película delgada (TFSC), han emergido como una de las tecnologías más prometedoras, tanto para aplicaciones terrestres como espaciales. A diferencia de las tradicionales células de silicio cristalino, estas células ofrecen una notable flexibilidad en su diseño y fabricación, lo que las convierte en una opción atractiva para una amplia variedad de aplicaciones (Chopra et al., 2024). La versatilidad se manifiesta no solo en la posibilidad de utilizar diferentes sustratos ya sean rígidos o flexibles, metálicos o aislantes, sino también en la capacidad de depositar múltiples capas funcionales mediante avanzadas técnicas como la deposición física en fase vapor (PVD), la deposición química en fase vapor (CVD), la deposición electroquímica (ECD), tecnologías basadas en plasma y enfoques híbridos (Iqbal et al., 2025).

Las células solares de película delgada son favorables debido a su uso mínimo de material y su creciente eficiencia. Las tres principales tecnologías de células solares de película delgada incluyen silicio amorfo (α -Si), seleniuro de cobre, indio y galio (CIGS) y telurio de cadmio (CdTe) (Sotavento y Ebong, 2023). Las técnicas aportan beneficios específicos a la ingeniería de dispositivos, lo que permite optimizar capas esenciales como el contacto posterior, el tampón, la capa absorbente y el reflector trasero. Este nivel de personalización ha llevado a una mejora gradual en el rendimiento de los dispositivos, aspecto fundamental para su viabilidad comercial. Como también, conforme se avanza hacia la fabricación a gran escala, destinada a cubrir extensas áreas como paneles solares comerciales o aplicaciones integradas en infraestructuras, la complejidad de los procesos se incrementa notablemente (Cepeda y Sierra, 2020).

Las células solares de película delgada se han consolidado como una alternativa prometedora a las tradicionales células solares de silicio cristalino, destacándose por su bajo costo, flexibilidad y su capacidad para ser aplicadas en superficies no convencionales (Lara, 2021). La eficiencia de estas células está profundamente relacionada con el grosor del material activo y con el tipo de semiconductores empleados. Investigaciones recientes han revelado que materiales como el telurio de cadmio (CdTe), el diseleniuro de cobre e indio galio (CIGS) y los perovskitas pueden alcanzar eficiencias superiores al 22% en condiciones de laboratorio (DS New Energy, 2021).

El grosor del material activo es un factor crucial en la eficiencia de conversión energética. Por ejemplo, estudios han demostrado que las células solares de silicio ultradelgadas, con un grosor de aproximadamente 1 μm , pueden lograr eficiencias superiores al 20% mediante técnicas avanzadas de texturización que mejoran la absorción de luz. No obstante, es esencial tener en cuenta que reducir el grosor por debajo de ciertos límites puede ocasionar una disminución en la eficiencia, debido a la recombinación de portadores minoritarios y a pérdidas ópticas.

Existen diferentes tipos de células solares, cada una presenta características propias según su estructura cristalina y el método de fabricación utilizado. Las células monocristalinas, elaboradas a partir de un único cristal continuo, destacan por su alta eficiencia, aunque su costo de producción es elevado. En contraste, las células multicristalinas, compuestas por varios cristales grandes en orientación aleatoria, ofrecen un rendimiento inferior, pero a un costo más accesible. Por otro lado, las células policristalinas, que presentan múltiples cristales de tamaño mucho más reducido (entre 1 μm y 1 mm), sacrifican aún más la eficiencia, aunque su producción se reduce en costos, especialmente en el caso de las tecnologías de lámina delgada. Los dispositivos híbridos, que combinan capas monocristalinas y policristalinas, maximizan las ventajas de ambas estructuras mediante técnicas de deposición. Finalmente, las células amorfas, que se elaboran principalmente con silicio hidrogenado, son las más económicas, pero también las que presentan el menor rendimiento, experimentando una rápida degradación de eficiencia en los primeros meses de uso (Balenzategui, 2021).

En cuanto a los materiales, los perovskitas han demostrado un gran potencial, alcanzando eficiencias de hasta 25.7% en células de heterounión. Adicionalmente, investigaciones recientes han mostrado que las células solares de $\text{Sb}_2(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_3$, pueden alcanzar eficiencias de hasta 35.5% a través de simulaciones y optimizaciones de parámetros como la densidad de portadores y el grosor del material activo (Saif et al., 2023).

Las innovaciones tienen importantes implicaciones para la industria fotovoltaica, en donde la reducción del grosor y la utilización de materiales avanzados podrían reducir los costos de producción y ampliar el rango de aplicaciones de las células solares.

Criollo et al. (2024) indican que 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 el último criterio primordial para su posterior implementación a gran escala. Además, las células solares ultradelgadas y flexibles pueden integrarse en superficies curvas o móviles, abriendo nuevas posibilidades en sectores como la construcción, la electrónica portátil y la generación de energía en entornos urbanos (Vélez y Grijalva, 2020). Asimismo, la mejora en la eficiencia y la reducción de costos podrían acelerar la adopción de la energía solar a nivel global, contribuyendo a los objetivos de sostenibilidad y transición energética.

El estudio busca la eficiencia de las células solares de película delgada, en función del grosor y del tipo de material utilizado, lo que es fundamental para avanzar en la tecnología fotovoltaica. La combinación de materiales innovadores y técnicas de fabricación avanzadas tiene el potencial de transformar la manera en que generamos y utilizamos la energía solar.

Metodología

El presente estudio se desarrolla con un enfoque cualitativo, utiliza el método exploratorio y efectúa una revisión sistemática integradora con un contexto deductivo. La revisión sistemática se llevó a cabo siguiendo el modelo PRISMA, que permite analizar y sintetizar la evidencia existente de la eficiencia de células solares de película delgada en función del grosor y material utilizado, y discutir las implicaciones para la industria fotovoltaica.

En el estudio de la investigación, se llevó a cabo una revisión exhaustiva de la literatura científica con el fin de analizar la eficiencia de las células solares de película delgada, centrándose en dos variables fundamentales: el grosor del material absorbente y el tipo de material utilizado en su fabricación. Para ello, se consultaron diversas bases de datos como Scopus, ScienceDirect, Dialnet, SciELO y Google Académico, así como otros repositorios especializados en ciencias de materiales, ingeniería energética y tecnología fotovoltaica.

El proceso de búsqueda se fundamentó en términos clave seleccionados de manera estratégica, tales como “células solares de película delgada”, “eficiencia del material”, “grosor de la capa de absorción”, “desempeño fotovoltaico” y “materiales semiconductores para células solares”. Además, se utilizaron operadores booleanos (AND, OR) para optimizar la recuperación de artículos pertinentes, asegurando un enfoque riguroso que abarcara tanto estudios empíricos como teóricos sobre la relación entre las propiedades físicas de las capas activas y la eficiencia general del dispositivo.

Tabla 1
Ruta de búsqueda para la investigación

Base de Datos	Palabras Clave con Operadores Booleanos
Scopus	"Thin film solar cells" AND ("Material efficiency" OR "Conversion Efficiency") AND ("Layer thickness" OR "Absorption thickness") AND "Photovoltaic industry"
Web of Science	"Solar cell efficiency" AND ("Thin film" OR "thin-film") AND ("CdTe" OR "CIGS" OR "Perovskite") AND ("Material selection" OR "Film thickness")
Google Scholar	("Células solares de película delgada" OR "Thin film solar cells") AND ("Eficiencia" OR "Rendimiento") AND ("Material" AND "Grosor") AND "Industria fotovoltaica"
Redalyc	"Eficiencia energética" AND ("Células solares" OR "Tecnología fotovoltaica") AND ("Película delgada" OR "Material semiconductor") AND "Grosor de capa activa"
Scopus	"Semiconductor materials" AND "Light absorption" AND ("Thin film Technology") AND ("Photovoltaic performance" OR "Power conversion efficiency")

Para asegurar la calidad y relevancia de los estudios escogidos, se utilizaron criterios de inclusión y exclusión definidos de acuerdo con las pautas del enfoque PRISMA.

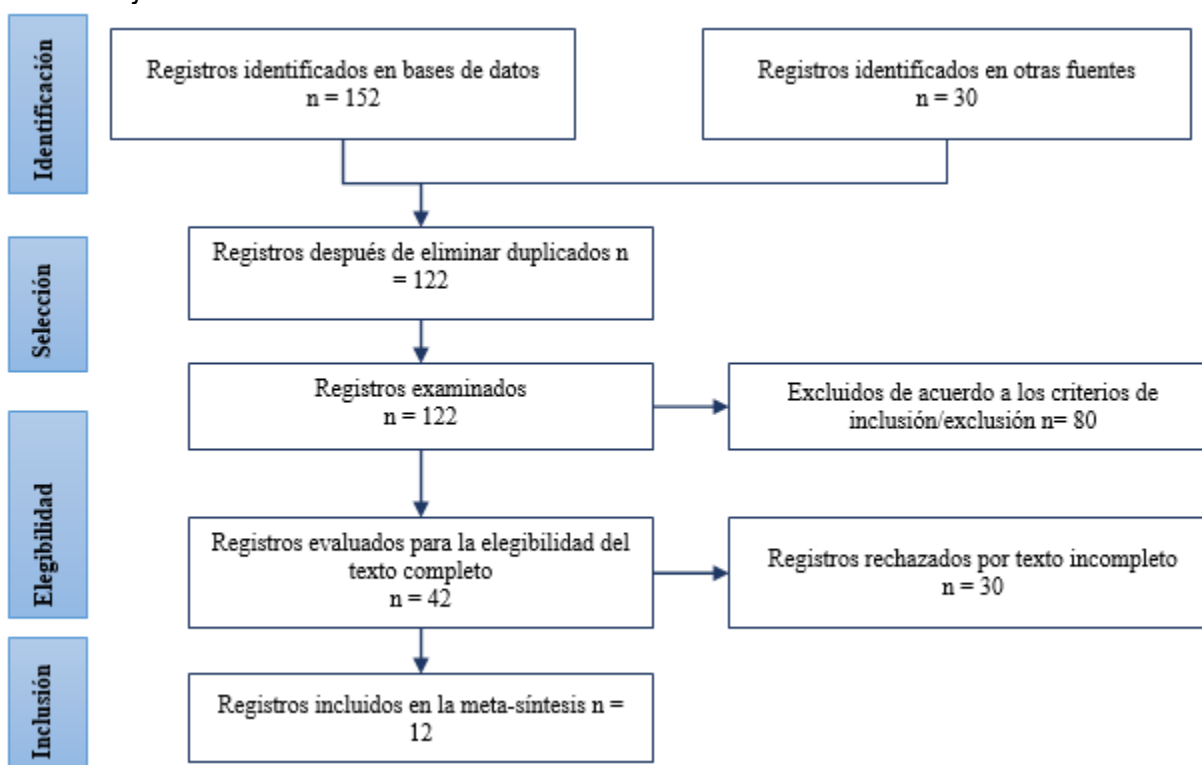
Criterios de inclusión:

- Investigaciones publicadas entre 2020 y 2025.
- Estudios en español e inglés.
- Trabajos que aborden las competencias en temas de eficiencia de células solares de película delgada en función del grosor y material utilizado, y discutir las implicaciones para la industria fotovoltaica.

Criterios de exclusión:

- Artículos duplicados o en idiomas distintos al español o inglés.
- Estudios sin acceso completo al texto.
- Artículos de opinión o que carezcan de un método definido.
- Artículos fuera de la fecha límite de publicación aceptada.

Figura 1
Diagrama de flujo PRISMA



Resultados y discusión

Tabla 2

Resultados de la revisión sistemática

N°	Autor	Título	Hallazgos	Eficiencia de células solares de película delgada en la industria fotovoltaica
1	(Grima et al., 2021)	Diseño, fabricación y caracterización de celdas solares p-CdTe/n-CdS en películas delgadas.	Las celdas obtenidas fueron caracterizadas por difracción de rayos x (DRX) y absorción óptica (AO), mientras que la eficiencia (η) de cada una de las celdas se midió mediante la técnica del análisis de característica corriente voltaje (I-V) presentando, en promedio, $\eta \sim 5\%$. La corriente de cortocircuito es relativamente baja debido seguramente a un alto valor de la resistencia shunt (Rsh). Con dichas celdas se construirá un módulo cuya caracterización será objeto de un futuro trabajo.	Se orienta a la producción de celdas solares CdTe/CdS mediante una metodología de bajo costo, alcanzando una eficiencia promedio del 5%. A pesar de no ser competitiva frente a tecnologías comerciales, su propuesta resulta atractiva por la simplicidad en el diseño y fabricación, lo que la hace viable para aplicaciones de bajo presupuesto

2	(Martínez y Seminario, 2021)	Celdas solares de perovskita como alternativa para la electrificación rural del Perú,	Se recomienda atender la necesidad energética de diversas zonas del país, aprovechando el recurso de la energía solar, especialmente en zonas rurales, las cuales evidencian mayores índices de pobreza, ya que el acceso a la electricidad está siempre asociado a la mejora de las condiciones de vida. En este sentido, las PSC se presen tan como una solución al requerimiento energético latente en las zonas remotas.	Un enfoque aplicado al contexto social peruano, en el que las celdas solares de perovskita destacan como una alternativa eficiente para la electrificación rural. Si bien no se detalla un valor específico de eficiencia, se reconocen los altos rendimientos de laboratorio que estas tecnologías ofrecen
3	(Criollo et al., 2024)	Evolución tecnológica de la generación solar fotovoltaica: una revisión de la literatura en la última década	En el campo de la energía fotovoltaica, los avances recientes han identificado tecnologías emergentes con alto potencial de eficiencia, entre ellas las células solares de multifunción, de perovskita, orgánicas y de hetero unión de película delgada. Las variantes han superado, en muchos casos, la eficiencia de las tradicionales células de silicio cristalino, posicionándose como alternativas prometedoras. Sin embargo, su adopción masiva enfrenta limitaciones técnicas y económicas.	Las tecnologías emergentes de película delgada incluidas los perovskitas, orgánicas y heterounión han logrado eficiencias que superan a las tradicionales de silicio. Sin embargo, enfatizan los desafíos técnicos y económicos que dificultan su comercialización masiva.
4	(Hernández et al., 2023)	Modelado de eficiencia energética de paneles solares fotovoltaicos	El desarrollo e implementación de sistemas fotovoltaicos ha adquirido un papel estratégico dentro de las políticas energéticas y ambientales, destacándose por su capacidad de generar electricidad limpia a partir de la radiación solar. En donde los sistemas integran diversos componentes eléctricos y electrónicos, entre los cuales los módulos fotovoltaicos representan el núcleo operativo de conversión energética.	El estudio en la eficiencia energética desde una perspectiva climática y operativa. Aunque no estudian directamente celdas de película delgada, su análisis de factores como la temperatura y la inclinación de los paneles resulta fundamental para optimizar el rendimiento de cualquier tecnología fotovoltaica.
5	(Chopra et al., 2024)	Células solares de capa delgada: una visión general	Las células solares de película delgada (TFSC) tienen un enfoque prometedor para la energía fotovoltaica terrestre y espacial, pudiendo utilizar una variedad de sustratos (flexibles	La versatilidad de las células solares de película delgada en contextos tanto terrestres como espaciales. El análisis

			o rígidos, metálicos o aislantes) para la deposición de diferentes capas (contacto, tampón, absorbente, reflector, etc.) utilizando diferentes técnicas (PVD, CVD, ECD, basado en plasma, híbrido, etc.). La comprensión adecuada de los procesos de deposición de película delgada puede ayudar a lograr dispositivos de alta eficiencia en grandes áreas.	destaca cómo la diversidad de técnicas de deposición y sustratos ha permitido desarrollar dispositivos de alta eficiencia, escalables y flexibles. La investigación valida el papel de las TFSC como una solución adaptable a diferentes entornos, reforzando su potencial industrial.
6	(Kishore et al., 2025)	Evolución de fase en películas delgadas de AgSbS ₂ sintetizadas a través de un proceso de dos etapas	El estudio explora la influencia del orden de apilamiento y la presión de sulfuración en la evolución de fase, las propiedades estructurales y el rendimiento optoelectrónico de las películas delgadas de AgSbS ₂ . Las presiones más altas favorecieron la fase cúbica pura AgSbS ₂ con mayor compacidad, mientras que las presiones más bajas promovieron las impurezas y redujeron la calidad de la película.	Examina películas delgadas de AgSbS ₂ , alcanzando una eficiencia modesta del 0,95%. Aunque este valor es bajo, el estudio es significativo por su enfoque en el control de fase y pureza del material, lo que podría mejorar eficiencias futuras.
7	(Reyes, 2023)	Estudio del comportamiento fotovoltaico y estabilidad en celdas solares de perovskita híbrida en función de la temperatura	Las celdas solares se han convertido en una de las tecnologías más prometedoras en el campo de la energía solar. Se realizó un estudio de la estabilidad térmica de las celdas solares de perovskita basadas en el perovskita de doble catión FAMA (MA-Metilamonio y FAFormamidinio), también conocida como doble catión	El comportamiento térmico de las celdas solares de perovskita híbrida presenta eficiencias que rondan el 20%, aunque se ven influenciadas por las condiciones ambientales. A pesar de su alta eficiencia, la estabilidad de los perovskitas representa un obstáculo para su adopción en el ámbito industrial. Por lo tanto, mejorar su resistencia térmica y durabilidad es un paso crucial para facilitar su transición del laboratorio al mercado.
8	(Ceh, 2024)	Modulación de las propiedades de	Las películas de MTO se obtuvieron mediante la	La modificación de películas delgadas de

		<p>películas delgadas de SnO₂ dopadas con Mg con aplicación en celdas solares MTO/CdTe fabricadas completamente por Sputtering”</p>	<p>incorporación de átomos de magnesio (Mg) en películas delgadas de SnO₂ utilizando la técnica de RF-Sputtering reactivo y virutas de Mg, las cuales se distribuyeron sobre la superficie del blanco de Sn metálico. La incorporación de Mg en las películas delgadas de SnO₂ fue controlado mediante la variación de la cantidad de virutas desde 0.2 hasta 1.2 g. Las propiedades estructurales, químicas, morfológicas, ópticas y eléctricas de las películas delgadas fueron caracterizadas por Difracción de Rayos X (DRX), Espectroscopia de Fotoelectrones por rayos X (XPS), Microscopia Electrónica de Barrido (SEM) y de Fuerza Atómica (AFM), Espectrofotometría y Efecto Hall, respectivamente. Los resultados mostraron que las propiedades de las películas delgadas tienen relación con la cantidad de Mg que se incorpora en la red cristalina del SnO₂.</p>	<p>SnO₂ dopadas con Mg para celdas de CdTe revela de qué manera las variaciones en la dopación influyen directamente en la estructura y, por consiguiente, en el rendimiento del dispositivo. Aunque no se presenta una cifra específica de eficiencia, el análisis enriquece el conocimiento sobre cómo optimizar materiales para potenciar el desempeño de las células de película delgada en el ámbito industrial.</p>
9	(Mukwevho et al., 2025)	<p>Enfoques metodológicos para la recuperación de recursos de paneles al final de su vida útil de diferentes generaciones de tecnologías fotovoltaicas – Una revisión</p>	<p>Las proyecciones de los residuos fotovoltaicos mundiales impulsados por la expansión de las instalaciones de sistemas solares arrojan luz sobre la afluencia de flujos de residuos que suponen una carga para el medio ambiente, si no se adoptan medidas para la gestión sostenible de los residuos. Las tecnologías de silicio cristalino y PV de película delgada han demostrado avances suficientes en las tecnologías de recuperación de recursos para uso industrial en la economía circular.</p>	<p>La eficiencia es fundamental, pero la investigación sobre el reciclaje de tecnologías fotovoltaicas, incluyendo las de película delgada, resalta un aspecto crucial: la sostenibilidad. La viabilidad de estas tecnologías no solo se mide en términos de su eficiencia energética, sino también en su impacto ambiental.</p>
10	(Ahmed et al., 2025)	<p>Nanomateriales de carbono en recubrimientos: una revisión centrada en las células solares fotovoltaicas de película delgada</p>	<p>Las células solares de película delgada están a la vanguardia de la recolección de energía renovable, ofrecen numerosos beneficios sobre sus contrapartes tradicionales que tienen menor eficiencia y</p>	<p>La utilización de nanomateriales de carbono, como el grafeno y los nanotubos, en células solares de película delgada presenta</p>

		<p>estabilidad, rápida degradación, mayor costo y menor vida útil. Los nanomateriales de carbono son materiales únicos que comprenden propiedades deseables para su aplicación en células solares de película delgada, lo que los convierte en material potencial para aplicaciones fotovoltaicas.</p>	<p>ventajas significativas. Estos materiales no solo mejoran la absorción de luz, sino que también incrementan la estabilidad del dispositivo, lo que podría resultar en eficiencias superiores y costos reducidos.</p>
11	(Villegas et al., 2024)	<p>Propiedades ópticas del TiS₃ como una nueva película delgada para células solares de unión simple y en tandem</p>	<p>Se proyecta que una película activa de trisulfuro de titanio (TiS₃) con un espesor de tan solo 140 nanómetros alcance una eficiencia máxima de conversión energética cercana al 22%, de acuerdo con los límites teóricos establecidos por el modelo de Shockley–Queisser. El resultado reviste gran importancia, ya que sugiere que incluso en escalas submicrométricas, el TiS₃ puede ofrecer un rendimiento competitivo respecto a las tecnologías solares convencionales basadas en silicio o perovskitas gruesas.</p> <p>El TiS₃ se destaca como un material activo prometedor en las células solares de película delgada. Las simulaciones sugieren que podrían alcanzar eficiencias de hasta el 22% con películas de solo 140 nm de grosor. Esto podría facilitar la creación de dispositivos ligeros y flexibles. Tal nivel de eficiencia teórica posiciona al TiS₃ como un competidor formidable frente a las tecnologías tradicionales, especialmente en aplicaciones móviles y en la integración arquitectónica.</p>
12	(Sivasankar et al., 2025)	<p>Progreso en energía fotovoltaica de película delgada: una revisión de las estrategias clave para mejorar la eficiencia de las células solares CIGS, CdTe y CZTSSe</p>	<p>Las células solares de capa delgada (TFSC) representan una frontera prometedora en las tecnologías de energía renovable debido a su potencial de reducción de costos, eficiencia de materiales y adaptabilidad. Los avances que componen las tecnologías TFSC, con un enfoque en Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS), telurio de cadmio (CdTe) y Cu₂ZnSnS₄ (CZTS). Las propiedades únicas de cada material, incluidas las bandas prohibidas ajustables, los altos coeficientes de absorción y la escalabilidad de bajo costo, los convierten en candidatos viables para una</p> <p>Una revisión completa de tecnologías como CIGS, CdTe y CZTSSe pone de relieve su eficiencia, adaptabilidad y potencial para la producción en rollo sobre sustratos flexibles. Estas tecnologías han evolucionado hasta consolidarse como opciones industriales robustas, y su versatilidad en distintos contextos fortalece su posición como una de las</p>

amplia gama de aplicaciones, principales apuestas desde la energía fotovoltaica para el futuro de la integrada en edificios (BIPV) energía solar en el hasta las soluciones energéticas ámbito global. portátiles, la adaptabilidad de los TFSC.

Los resultados obtenidos de los distintos estudios examinados proporcionan una visión integral sobre el estado actual y las perspectivas de las células solares de película delgada (TFSC) en la industria fotovoltaica. Esta tecnología, conocida por su ligereza, flexibilidad y potencial de bajo costo, se presenta como una alternativa viable al silicio cristalino tradicional, aunque aún enfrenta desafíos técnicos y económicos que restringen su adopción generalizada.

Las investigaciones de Grima et al. (2021) revelan que, a pesar de que las celdas CdTe/CdS tienen una eficiencia relativamente baja (~5%), su fabricación mediante metodologías sencillas y económicas permite su implementación en proyectos con presupuestos limitados. El vínculo entre la simplicidad de fabricación y la viabilidad económica constituye un hilo conductor en la evolución de las TFSC, donde no siempre se prioriza la máxima eficiencia, sino un equilibrio entre rendimiento y accesibilidad. Martínez y Seminario (2021) destacan la dimensión social de estas tecnologías, subrayando el papel de las celdas de perovskita como una alternativa energética efectiva para electrificar zonas rurales que no están conectadas a la red, lo que pone de manifiesto que la tecnología fotovoltaica no debe evaluarse únicamente por sus métricas técnicas, sino también por su capacidad para promover la inclusión energética y el desarrollo sostenible.

Criollo et al. (2024) enriquece esta discusión al evidenciar que las tecnologías emergentes, como los perovskitas, orgánicas y de hetero unión, están logrando eficiencias que superan a las del silicio cristalino. En esa misma línea, Reyes (2023) aborda uno de los mayores retos de las celdas de perovskita: su inestabilidad ante condiciones ambientales. Kishore et al. (2025) y Ceh (2024) se centran en el desarrollo y la modificación de nuevos materiales para mejorar el rendimiento de las películas delgadas. En particular, el AgSbS_2 y el SnO_2 dopado con Mg surgen como opciones prometedoras que, aunque aún no alcanzan altos niveles de eficiencia, ofrecen caminos innovadores para optimizar propiedades estructurales y ópticas, aspectos esenciales para mejorar el desempeño general de estas tecnologías.

Por su parte, Ahmed et al. (2025) introducen el uso de nanomateriales de carbono, como grafeno y nanotubos, en las capas activas de las celdas de película delgada, donde los innovadores materiales no solo mejoran la absorción de luz, sino que también aumentan la estabilidad del dispositivo, ofreciendo soluciones inteligentes que no elevan significativamente los costos de producción. Por otro lado, Villegas et al. (2024), presentan el TiS_3 como un material con un alto potencial, capaz de alcanzar eficiencias teóricas cercanas al 22% utilizando películas extremadamente delgadas, este descubrimiento es particularmente relevante para aplicaciones donde el peso y la flexibilidad son fundamentales, como en dispositivos portátiles o en soluciones arquitectónicas integradas (BIPV).

En el ámbito de la aplicación práctica, Hernández et al. (2023) subrayan que factores como el ángulo de inclinación, la temperatura ambiente y las condiciones climáticas locales juegan un papel crucial en la eficiencia real de los sistemas fotovoltaicos. Mukwevho et al. (2025) enfatizan la importancia de una gestión adecuada del final de vida útil de los paneles solares, resaltando que la circularidad de los materiales será fundamental para evitar impactos ambientales negativos. Simultáneamente, Sivasankar et al. (2025) destacan los avances en materiales como CIGS, CdTe y CZTSSe, posicionándolos como líderes en la industria debido a su escalabilidad, eficiencia y versatilidad en diversas aplicaciones, que incluyen soluciones móviles y sistemas integrados en edificaciones.

Conclusiones

La eficiencia de las células solares de película delgada está profundamente determinada por el tipo de material utilizado, esto ha quedado claro en estudios que examinan tecnologías como CdTe, CIGS, CZTSSe, perovskitas, AgSbS_2 y TiS_3 , cada uno de estos materiales presenta características electrónicas, ópticas y estructurales únicas que influyen en su rendimiento energético. Por ejemplo, el TiS_3 según Villegas et al. (2024) y los perovskitas híbridos según Reyes (2023) han logrado alcanzar eficiencias tanto teóricas como prácticas de hasta un 22% y un 20% respectivamente, lo que resalta su atractivo competitivo frente al silicio cristalino. Además, la capacidad permite optimizar el uso de materiales, reduciendo tanto el peso como el costo del panel, lo cual resulta esencial para aplicaciones portátiles y arquitectónicas. No obstante, la estabilidad y durabilidad de estos materiales emergentes siguen siendo un reto para su adopción a gran escala. En el caso especial de los

perovskitas, factores ambientales como la temperatura, la humedad y la radiación UV pueden perjudicar su rendimiento a largo plazo, lo que significa que, aunque la eficiencia es un aspecto importante, la viabilidad industrial requiere desarrollar soluciones que equilibren tanto el rendimiento como la estabilidad operativa.

Referencias

- Ahmed, W., Newaz, S., Zaman, Z., Mohd, N., Hoong, Y., Shaikh, K., . . . Hasnain, S. (2025). Carbon nanomaterials in coatings: A review focusing thin film photovoltaic solar cells. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 185, 108929. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2024.108929>
- Balenzategui, J. (2021). *Tecnología de Células Solares de Silicio Cristalino*. [Tesis de Doctorado, Escuela de Negocios EOI]. <https://www.eoi.es/sites/default/files/savia/documents/componente45343.pdf>
- Ceh, F. (2024). *Modulación de las propiedades de películas delgadas de SnO₂ dopadas con Mg con aplicación en celdas solares MTO/CdTe*. [Tesis de Doctorado, Instituto Politécnico Nacional]. <https://repositorio.cinvestav.mx/SSIT0018479.pdf>
- Cepeda, J., y Sierra, A. (2020). Aspectos que afectan la eficiencia en los paneles fotovoltaicos y sus potenciales soluciones. *Revista de la Universidad Santo Tomás*, 32(4), 1-123. <https://document/aspectos-afectan-eficiencia-paneles-fotovoltaicos-potenciales-soluciones.html>
- Chopra, K., Paulson, P., y Dutta, V. (2024). Células solares de capa delgada: una visión general. *Revista de Investigación Científica*, 12(2-3), 69-92. <https://doi.org/10.1002/pip.541>
- Criollo, R., Guailas, D., y 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://doi.org/10.37815/rte.v36n2.1158>
- DS New Energy. (9 de Agosto de 2021). *Fundamentos de células solares fotovoltaicas*. <https://www.dsisolar.com/info/solar-photovoltaic-cell-basics-60109776.html>
- Grima, P., Ruiz, L., Conquet, B., Sánchez, E., Contreras, M., Velásquez, A., y Gonzáles, W. (2021). Diseño, fabricación y caracterización de celdas solares p-CdTe/n-CdS en películas. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Zulia*, 44(2), 1-13. <https://www.researchgate.net/publication/343583267.pdf>
- Hernández, I., Espitia, D., Olguín, J., Tolentino, J., Juárez, A., y Violante, A. (2023). Modelado de eficiencia energética de paneles solares fotovoltaicos. *Revista Jóvenes En La Ciencia*, 21, 1–15. <https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/4163>
- Iqbal, T., Afsheen, S., y Kausar, S. (2025). Aplicaciones de película delgada en diferentes campos. En S. Singapur (Ed.), *Técnicas de deposición de película delgada y sus aplicaciones en diferentes campos*, 1(3), 279-304. <https://doi.org/10.1007/978-981-96-1364-9>
- Kishore, Y., Radhalayam, Y., Ouladsmaned, M., Sangarajue, Sambasivam, Goniguntla, V., . . . Chalapathi, U. (2025). Evolución de fase en películas delgadas de AgSbS₂ sintetizadas a través de un proceso de dos etapas. *Boletín de Investigación de Materiales*, 189, 121-134. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2025.113430>
- Lara, D. (2021). *Películas delgadas y celdas solares de SnSXSe1-X*. [Tesis de Doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México]. <https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000806782/3/0806782.pdf>
- Martínez, V., y Seminario, R. (2021). Celdas solares de perovskita como alternativa para la electrificación rural del Perú. *Social Innova Sciences Revista de Ciencia*, 2(2), 42-50. <https://doi.org/10.58720/sis.v2i2.52>
- Mukwevho, N., Mkhohlakali, A., Ntsasa, N., Sehata, J., Chimuka, L., Tshilongo, J., y Letsoalo, M. (2025). Methodological approaches for resource recovery from end-of-life panels of different generations of photovoltaic technologies—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 207, 114980. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114980>
- Reyes, J. (2023). *Estudio del comportamiento fotovoltaico y estabilidad en celdas solares de perovskita híbrida en función de la temperatura*. [Tesis de Maestría, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla]. <https://hdl.handle.net/20.500.12371/20740>
- Saif, O., Elogail, Y., Abdolkader, T., Shaker, A., y Zekry, A. (2023). Revisión completa sobre las células solares de homojunción de película delgada: tecnologías, avances y desafíos. *Revista Energies*, 16(11),. <https://doi.org/10.3390/en16114402>
- Sivasankar, S., Amorim, C., y Cunha, A. (2025). Progress in Thin-Film Photovoltaics: A Review of Key Strategies to Enhance the Efficiency of CIGS, CdTe, and CZTSSe Solar Cells. *Journal of Composites Science*, 9(3), 143. <https://doi.org/10.3390/jcs9030143>

- Sotavento, T., y Ebong, A. (2023). Una revisión de las tecnologías y los desafíos de las células solares de película delgada. *Revisiones de Energía Renovable y Sostenible*, 36(2), 1286-1297. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.028>
- Vélez, F., y Grijalva, C. (2020). *Estudio e Implementación de un Sistema Fotovoltaico Aplicado a Luminarias: Caso de Estudio Unidad Educativa Dr. Francisco Falquez Ampuero*. [Tesis de Pregrado, Universidad Politécnica Salesiana]. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/18646>
- Villegas, C., Marinho, E., Dias, A., Venezuela, P., y Rocha, A. (2024). Optical properties of TiS₃ as a novel thin film for single-junction and tandem solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 289, 113635. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2504.06368>