

PEROVSKITAS: UNA ALTERNATIVA PROMETEDORA PARA LA PRÓXIMA GENERACIÓN DE PÁNELES SOLARES

*PEROVSKITES: A PROMISING ALTERNATIVE FOR THE NEXT
GENERATION OF SOLAR PANELS*

ZÚÑIGA AVILÉS, Dalía

MARTÍNEZ LÓPEZ, Miguel

TÉLLEZ LÓPEZ, Antonio

ALCÁNTARA COBOS, Adrián

RESUMEN

La crisis ambiental derivada del calentamiento global, provocado principalmente por el uso intensivo de combustibles fósiles, exige acelerar la transición energética hacia fuentes renovables. Dentro de este abanico, la energía solar fotovoltaica destaca como una de las alternativas más prometedoras, debido a la reducción sostenida de sus costos de producción en las últimas décadas y al avance en el desarrollo de nuevas tecnologías y materiales para la fabricación de células solares. Las células solares de perovskita (CSP) han cobrado gran relevancia, ya que presentan ventajas significativas frente a las elaboradas con materiales convencionales, como el silicio (Si). Una de sus principales fortalezas es la eficiencia de conversión, la cual ha alcanzado valores superiores a 26 % en apenas una década de investigación y desarrollo. Asimismo, las CSP ofrecen menores costos de producción en comparación con las tecnologías comerciales actuales y exhiben una notable flexibilidad composicional, lo que permite ajustar sus propiedades según la aplicación específica. Esta versatilidad posibilita ampliar el rango de absorción de luz solar, modificar el ancho de banda prohibida y facilitar el dopaje químico. No obstante, las CSP aún enfrentan importantes desafíos que limitan su comercialización a gran escala, entre ellos, la sensibilidad a factores ambientales como humedad, oxígeno, temperatura y radiación ultravioleta, que afectan su estabilidad y aceleran su degradación. Adicionalmente, se presentan aspectos relacionados con la sostenibilidad y la toxicidad de los materiales empleados, como el plomo, el cual constituye un problema crítico, ya que este elemento presenta alta toxicidad y representa un riesgo significativo tanto para la salud humana como para el medio ambiente, lo que hace indispensable su sustitución por materiales menos nocivos.

División de Ingeniería Industrial e
Ingeniería en Energía y Desarrollo
Sostenible, Universidad Politécnica
del Valle de Toluca. Almoloya de
Juárez, Estado de México, México.

Correspondencia
miguel.martinez@upvt.edu.mx
<https://orcid.org/0000-0002-3800-9719>

Fecha de recepción
21 de octubre de 2025.

Fecha de aceptación
16 de febrero de 2026.

Palabras clave: perovskita; energía; células solares.

ABSTRACT

The environmental crisis resulting from global warming, primarily driven by the intensive use of fossil fuels, requires accelerating the transition of the energy system toward renewable and sustainable sources. Within this range of options, photovoltaic solar energy stands out as one of the most promising alternatives, due both to the sustained decrease in production costs over recent decades and to the development of new technologies and materials used in solar cell manufacturing. In this context, perovskite solar cells (PSC) have gained significant relevance, as they present substantial advantages over cells made from conventional materials such as silicon (Si). One of their main strengths is their high-power conversion efficiency, which has exceeded 26 % within just a decade of research and development. Additionally, PSC potentially offer lower production costs compared with current commercial technologies and exhibit remarkable compositional flexibility, allowing modulation of their physicochemical properties according to specific applications. This versatility enables expansion of the solar spectrum absorption range, adjustment of the bandgap, and facilitation of controlled chemical doping processes. Nevertheless, PSC still face major challenges that limit their large-scale commercialization, including high sensitivity to environmental factors such as humidity, oxygen, temperature, and ultraviolet radiation, which affect their stability and accelerate degradation. Furthermore, challenges related to sustainability and toxicity of some employed materials remain, particularly lead, which constitutes a critical issue because this element is highly toxic and poses risks to both human health and the environment, thereby necessitating the search for and development of alternative materials with lower environmental and health impacts.

Keywords: perovskite; energy; solar cells.

INTRODUCCIÓN

La concentración de dióxido de carbono (CO_2) en la atmósfera ha aumentado de manera significativa desde el inicio de la era industrial. Según datos de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), en 1960 la

concentración de CO₂ era de 319 partes por millón (ppm). Para enero de 2025, la NASA registró un récord histórico de 428 ppm, lo que representa un incremento de 35 % en apenas 65 años. El principal problema de este aumento radica en que el CO₂ es un gas de efecto invernadero (GEI) capaz de atrapar el calor y provocar el calentamiento global, contribuyendo de manera significativa al cambio climático (NASA, 2025).

La Organización de las Naciones Unidas (ONU) estima que la población mundial actual asciende a 8 mil 200 millones de personas y alcanzará su máximo alrededor de 10 mil 300 millones a mediados de la década de 2080. Este crecimiento poblacional implicará una mayor demanda de energía, alimentos y otros recursos. Como consecuencia, se espera que diversas industrias se expandan, que el consumo de combustibles aumente y que la producción de CO₂ se intensifique (ONU, 2024b).

Como parte de su agenda de desarrollo sostenible, las Naciones Unidas han establecido 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de alcance global. Dos de estos objetivos están directamente relacionados con el cambio climático y la generación de energía limpia. El ODS 7 tiene como objetivo garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna, mientras que el ODS 13 busca promover la adopción de medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos. La transición energética hacia las energías renovables (ER) es fundamental para reducir los impactos socioeconómicos y ambientales asociados al consumo de combustibles fósiles, favoreciendo el cumplimiento de los objetivos establecidos por la ONU (ONU, 2024a).

En los últimos años ha aumentado el capital humano y financiero destinado a satisfacer la demanda de energía limpia y asequible mediante las energías renovables. Parte de estos recursos se canaliza hacia la investigación y el desarrollo, con el objetivo de reducir los costos de producción y mejorar la eficiencia energética. Una de las energías renovables que se considera una solución prometedora para mitigar el cambio climático y fortalecer la seguridad energética es la energía solar fotovoltaica. En este campo se han logrado avances significativos, especialmente en el desarrollo de nuevas tecnologías de células solares, orientadas principalmente a incrementar la eficiencia y reducir los costos. Entre estos avances destacan los paneles bifaciales, que absorben radiación por ambas caras; los seguidores solares, que ajustan la orientación del panel; las tejas solares; y las células solares transparentes que pueden integrarse en ventanas, entre otros.

Además de los avances mencionados en la tecnología fotovoltaica (FV) convencional, se han desarrollado tecnologías FV alternativas orientadas a mejorar la eficiencia de la célula, reducir los costos de producción y ampliar las aplicaciones de la energía solar. Estos esfuerzos son fundamentales en la transición hacia las energías renovables, ya que abordan las limitaciones de los sistemas fotovoltaicos tradicionales. Como resultado, se han desarrollado nuevos materiales que permiten la fabricación de sistemas fotovoltaicos más eficientes, entre ellos:

- Células solares de perovskita (CSP)
- Células fotovoltaicas orgánicas (CSFVO)
- Células solares de puntos cuánticos (SPC)
- Células solares sensibilizadas con colorante (CSSC)
- Células solares en tándem (CST)

En comparación con los paneles solares tradicionales basados en silicio, los sistemas fotovoltaicos emergentes ofrecen mayores eficiencias, menores costos de producción y una ampliación significativa de sus aplicaciones, lo que los posiciona como alternativas viables para el desarrollo energético sostenible. Entre estas tecnologías, las células solares de perovskita destacan como una de las propuestas más prometedoras a nivel mundial, por su alta eficiencia de conversión energética, versatilidad y potencial para fabricarse mediante procesos de bajo costo y menor consumo energético. Estas características las convierten en un elemento estratégico para impulsar la transición hacia sistemas energéticos más sostenibles.

METODOLOGÍA

El presente trabajo correspondió a una revisión bibliográfica de tipo sistemática con enfoque cualitativo y documental, orientada al análisis del estado del arte sobre el uso de materiales tipo perovskita en aplicaciones fotovoltaicas. El objetivo general fue identificar, analizar y sintetizar la evidencia científica disponible relacionada con las propiedades estructurales, optoelectrónicas y tecnológicas de los perovskitas, así como su desempeño, estabilidad y potencial de implementación en la fabricación de celdas solares de alta eficiencia.



FUENTES DE INFORMACIÓN

La recopilación de información se llevó a cabo mediante la consulta de bases de datos científicas internacionales indexadas y revisadas por pares, reconocidas por su rigor académico y amplia cobertura en el área de materiales avanzados y energías renovables. Las bases de datos utilizadas fueron ScienceDirect, Scopus, Wiley Online Library, Taylor & Francis Online y Web of Science (WoS). Estas plataformas permitieron acceder a artículos científicos, revisiones especializadas y publicaciones de alto impacto relacionadas con materiales fotovoltaicos basados en perovskitas.

ESTRATEGIA DE BÚSQUEDA BIBLIOGRÁFICA

La búsqueda bibliográfica se realizó mediante el uso de palabras clave relacionadas con el tema de estudio, tanto en idioma inglés como en español, con el propósito de garantizar una cobertura amplia y representativa de la literatura científica. Se emplearon operadores booleanos (AND, OR, NOT) para optimizar la precisión y pertinencia de los resultados obtenidos.

Entre las principales formas de búsqueda utilizadas se incluyeron las siguientes:

- “perovskite solar cells” AND efficiency
- “perovskite photovoltaic materials” AND synthesis
- “stability of perovskite solar cells” OR degradation mechanisms
- “efficiency of perovskite photovoltaics” AND performance optimization
- “celdas solares de perovskita” AND aplicaciones fotovoltaicas
- “materiales fotovoltaicos de perovskita” AND estabilidad

El periodo temporal considerado comprendió publicaciones realizadas en los últimos quince años con el fin de incluir avances recientes y tendencias emergentes en el desarrollo tecnológico de celdas solares basadas en perovskitas.

CRITERIOS DE INCLUSIÓN Y EXCLUSIÓN

Se establecieron criterios específicos para la selección de la literatura científica con el propósito de garantizar la calidad, relevancia y pertinencia de la información recopilada.



Los criterios de inclusión fueron:

- Artículos científicos revisados por pares.
- Publicaciones relacionadas directamente con la síntesis, caracterización, propiedades optoelectrónicas, estabilidad, eficiencia y aplicaciones fotovoltaicas de materiales tipo perovskita.
- Documentos publicados en idioma inglés.
- Estudios experimentales, teóricos y revisiones científicas especializadas.

Los criterios de exclusión incluyeron:

- Estudios duplicados identificados en diferentes bases de datos.
- Publicaciones sin acceso al texto completo.
- Documentos cuyo contenido no abordara aplicaciones fotovoltaicas o que se centraran en usos no relacionados con la conversión de energía solar.

PROCESO DE SELECCIÓN DE LITERATURA

El proceso de selección de la información se realizó mediante un filtrado progresivo basado en la revisión de títulos, resúmenes y textos completos de las publicaciones identificadas. Inicialmente, se efectuó una depuración para eliminar registros duplicados obtenidos en múltiples bases de datos. Posteriormente, se evaluó la pertinencia temática de los estudios mediante la lectura de resúmenes. Finalmente, se llevó a cabo la revisión detallada de los textos completos para seleccionar los trabajos que cumplieran con los criterios establecidos.

EXTRACCIÓN Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

La información relevante obtenida de los estudios seleccionados se organizó mediante matrices de análisis estructuradas, en las cuales se registraron variables específicas relacionadas con el desempeño y desarrollo tecnológico de las perovskitas en aplicaciones fotovoltaicas. Entre las variables consideradas se incluyeron el tipo de perovskita, métodos de síntesis, eficiencia de conversión energética, estabilidad operativa, ventajas tecnológicas y limitaciones asociadas.

El análisis de la información se realizó mediante una síntesis comparativa y crítica del contenido, permitiendo identificar similitudes, diferencias, avances tecnológicos y áreas de oportunidad en el desarrollo de celdas solares basadas en perovskitas.

ORGANIZACIÓN Y SÍNTESIS

Los resultados obtenidos fueron organizados y estructurados en función de las principales tendencias tecnológicas reportadas en la literatura científica. La síntesis del conocimiento se desarrolló considerando avances recientes en la mejora de eficiencia, estrategias para el incremento de estabilidad, innovaciones en métodos de síntesis, así como los desafíos tecnológicos y perspectivas futuras para la implementación comercial de dispositivos fotovoltaicos basados en perovskitas. Esta organización permitió construir un análisis integral y actualizado del progreso científico y tecnológico en el área de estudio.

DESARROLLO Y DISCUSIÓN

CÉLULAS SOLARES DE PEROVSKITA (CSP)

La perovskita es un mineral compuesto por óxido de calcio y titanio (CaTiO_3), descubierto en 1839. Este material, abundante en la naturaleza, presenta un amplio potencial de aplicación en áreas como la superconductividad, la magnetorresistencia, la conductividad iónica y diversas propiedades eléctricas, lo que lo convierte en un recurso de gran interés para las industrias de telecomunicaciones y microelectrónica (Chauhan y col., 2024; Rehman y col., 2025; Sahoo y col., 2025).

En los últimos años, la perovskita ha despertado un interés creciente en el campo de la energía fotovoltaica, gracias a sus destacadas propiedades optoelectrónicas y a su capacidad de conversión energética. El término perovskita se emplea, en efecto, para describir una amplia gama de materiales que comparten la misma estructura cristalina del CaTiO_3 . La fórmula general de estos compuestos es ABX_3 , donde A y B son cationes y X es un anión. En aplicaciones fotovoltaicas, los cationes A más comunes son

orgánicos o inorgánicos, como el metilamonio (MA), formamidinio (FA) o cesio (Cs); los cationes B suelen ser metales, principalmente plomo (Pb) o estaño (Sn), mientras que X corresponde a un anión haluro como cloro (Cl), bromo (Br) o yodo (I) (Priya y Stonier, 2025; Sahoo y col., 2025).

En los materiales con estructura de perovskita es posible ajustar propiedades clave para la industria fotovoltaica, entre ellas, las propiedades electrónicas, ópticas y mecánicas, lo que ha permitido que la eficiencia de las células solares de perovskita se incremente significativamente en los últimos años. Además, estas células pueden fabricarse mediante procesos de bajo costo, lo que les otorga un alto potencial para convertirse en una de las principales tecnologías de producción de energía limpia y asequible (Mathan Kumar y col., 2025).

Las células solares de perovskita han despertado un gran interés en la comunidad científica gracias a sus múltiples ventajas, entre ellas: alta eficiencia de conversión energética, derivada de su excelente absorción de luz, banda prohibida directa y alta movilidad de portadores de carga. Estas características permiten aprovechar una mayor fracción del espectro solar para la generación de energía, lo que incrementa notablemente su desempeño fotovoltaico. Además, se distinguen por su versatilidad, potencial reducción del impacto ambiental, procesamiento a bajo costo y su potencial para competir en los mercados de energía renovable (Jose y col., 2025a; Priya y Stonier, 2025; Roy y col., 2020).

El primer uso documentado de un material con estructura de perovskita en una célula solar se remonta a 2009. En este estudio se empleó una célula solar sensibilizada por colorante, con una delgada capa de perovskita depositada sobre óxido de titanio (TiO_2). Esta célula alcanzó una eficiencia de apenas 3.8 %, además de presentar baja estabilidad, atribuida al uso de un electrolito líquido. En 2011, un diseño similar que incorporaba puntos cuánticos como material nanocristalino logró elevar la eficiencia hasta 6.5 %. Posteriormente, en 2013, se alcanzó una eficiencia de 15 % mediante un proceso de deposición en solución en dos etapas (Purabgola y Kandasubramanian, 2021; Sahoo y col., 2025; Waththage y col., 2025).

Gracias a la intensa investigación global, actualmente se han registrado eficiencias cercanas a 25 %. Este avance se logró en poco más de una década, mientras que las tecnologías basadas en silicio requirieron varias décadas de desarrollo para alcanzar valores de eficiencia comparables.



COMPOSICIÓN Y ESTRUCTURA CRISTALINA

La estructura cristalina más común de las perovskitas es la fase cúbica. En las esquinas de la celda unitaria se encuentra el catión A, en el centro de la celda se ubica el catión B, y el anión X se localiza en el punto medio de cada arista de la celda (Figura 1). En consecuencia, cada catión B queda rodeado por seis aniones X, formando un octaedro de coordinación BX_6 (Sahu y Palei, 2023; Shah y Meyer, 2025; Waththage y col., 2025).

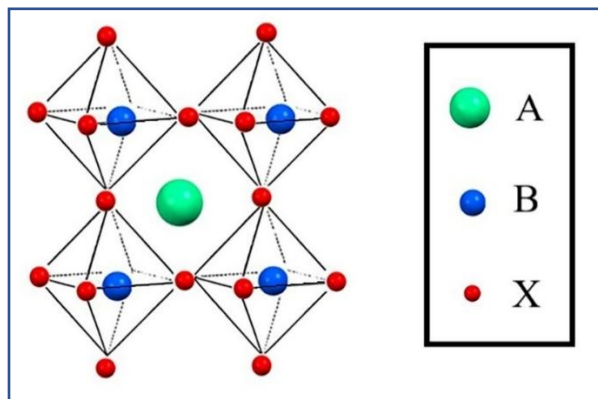


Figura 1. Estructura cristalina típica de perovskita tipo ABX_3 .

La posición del catión A contribuye a compensar la carga y a estabilizar la estructura cristalina. No obstante, con frecuencia se presentan distorsiones en la red cúbica que dan lugar a estructuras ortorrómbicas y tetragonales, lo cual afecta de manera significativa las propiedades mecánicas, ópticas y electrónicas del material (Nande y col., 2021). Actualmente, se han investigado numerosas composiciones de células solares de perovskita; sin embargo, las más estudiadas corresponden a las perovskitas híbridas orgánico-inorgánicas basadas en haluros de plomo, entre las que destacan:

- Yoduro de plomo y metilamonio ($MAPbI_3$), con una composición aproximada de 83-87 % en peso de yoduro de plomo (PbI_2) y de 13-17 % de yoduro de metilamonio (MAI).
- Yoduro de plomo y formamidinio ($FAPbI_3$), compuesto por 60-70 % de PbI_2 y 30-40 % de yoduro de formamidinio (FAI).
- Yoduro de plomo y cesio ($CsPbI_3$), que contiene aproximadamente 30-35 % de yoduro de cesio (CsI) y 50-60 % de PbI_2 .

Además, es común la incorporación de aditivos en concentraciones entre 5 y 20 %, con el objetivo de aumentar la eficiencia de la célula y mejorar la cristalinidad y la estabilidad de la película de perovskita. La fórmula general de estos materiales es APbX_3 , donde:

- A corresponde a un catión que puede ser orgánico, como metilamonio (MA) o formamidinio (FA), o inorgánico, como cesio (Cs).
- Pb representa el catión de plomo.
- X corresponde a un anión haluro, como yodo (I), bromo (Br) o cloro (Cl) (Alam y col., 2025; Roy y col., 2023; Shah y Meyer, 2025).

La Tabla 1 presenta los tipos y características de las células de perovskita híbridas, inorgánicas y de cationes y haluros mixtos.

Tabla 1. Tipos de células de perovskitas (Astakala y col., 2026; Roy y col., 2023; Sambathkumar y Shakila, 2024; Shah y Meyer, 2025).

Perovskitas híbridas orgánico-inorgánicas	Perovskitas totalmente inorgánicas	Perovskitas de cationes y haluros mixtos
Por ejemplo, MAPbI_3 , FAPbI_3 . -Sus propiedades electrónicas y optoelectrónicas son atractivas para uso fotovoltaico. -Tienen altos coeficientes de absorción y movilidades de los portadores de carga.	Por ejemplo, CsPbI_3 y CsPbBr_3 -Mejor estabilidad térmica que perovskitas orgánicas e híbridas -Síntesis compleja. Es difícil obtener perovskitas estables y de alta calidad.	Por ejemplo, (MA, FA) $\text{Pb}(\text{I}, \text{Br})_3$. -Eficiencias mayores. -Mejor estabilidad.

La composición de los materiales de perovskita puede ajustarse en función de la aplicación deseada. Por ejemplo, la sustitución del catión A o del anión X permite modificar propiedades fundamentales de la celda fotovoltaica: la variación del catión A puede alterar la banda prohibida y la estabilidad térmica del material, mientras que la modificación del anión X puede influir en la absorción de luz y en sus propiedades electrónicas. Gracias a esta versatilidad composicional, las células de perovskita poseen un alto potencial en la industria fotovoltaica.



PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DE LAS CÉLULAS SOLARES DE PEROVSKITA

Las células solares de perovskita han adquirido gran relevancia en el campo de la conversión fotovoltaica debido a sus sobresalientes propiedades electrónicas, ópticas y de transporte de carga, las cuales favorecen altos niveles de eficiencia energética y versatilidad en el diseño de dispositivos fotovoltaicos. Estas características están estrechamente relacionadas con su estructura cristalina y su capacidad de modificación composicional, lo que permite ajustar diversas propiedades funcionales del material.

Desde el punto de vista electrónico, las CSP presentan una estructura de banda prohibida directa, lo que favorece la absorción eficiente de radiación solar y la generación de portadores de carga. Además, la posición del ancho de banda puede modificarse mediante cambios en la composición del material, permitiendo ajustar el rango espectral de absorción. Esta capacidad de ajuste constituye una ventaja significativa para el desarrollo de dispositivos adaptados a aplicaciones específicas (Roy y col., 2020; Shah y Meyer, 2025).

En términos de propiedades ópticas, las CSP destacan por sus altos coeficientes de absorción de luz, particularmente en el rango de 300 a 500 nm, lo que les permite captar grandes fracciones de radiación solar utilizando capas delgadas de material activo. Asimismo, presentan alta probabilidad de recombinación radiativa, lo que se traduce en una fotoluminiscencia eficiente y evidencia la calidad optoelectrónica del material (Roy y col., 2020).

Respecto a las propiedades de transporte, las CSP poseen elevadas movilidades de portadores de carga, típicamente en el rango de 10 a 100 cm^2/Vs , y muestran menor sensibilidad a defectos cristalinos en comparación con semiconductores convencionales. Estas características favorecen una mayor eficiencia en la recolección de carga. Adicionalmente, presentan longitudes de difusión de portadores que varían desde cientos de nanómetros hasta algunos micrómetros, así como una larga vida útil de los portadores de carga, factores que contribuyen a mejorar la extracción de carga y la eficiencia global de conversión energética. La conductividad eléctrica de estos materiales depende de su composición química y de los dopantes incorporados, lo que amplía sus posibilidades de optimización funcional (Roy y col., 2020; Shah y Meyer, 2025).



COMPARACIÓN ENTRE CÉLULAS SOLARES DE PEROVSKITA Y MATERIALES FOTOVOLTAICOS CONVENCIONALES

Las CSP han sido comparadas ampliamente con tecnologías fotovoltaicas tradicionales, como las basadas en silicio, debido a su rápido desarrollo tecnológico y potencial comercial. A continuación, se presentan sus principales ventajas y desventajas (Tabla 2).

Tabla 2. Ventajas y desventajas de las células solares de perovskita frente a materiales fotovoltaicos convencionales (Balagowtham y col., 2025; Jose y col., 2025b; Naseer y col., 2025; Priya y Stonier, 2025; Singh y col., 2025).

Ventajas	
Eficiencia	Las CSP han alcanzado eficiencias de conversión energética superiores a 25 % en menos de 15 años de desarrollo, superando en algunos casos la eficiencia de células solares de silicio comerciales.
Costo y fabricación	Los métodos de producción requieren menor consumo energético y pueden ser más económicos. Además, permiten el uso de técnicas de procesamiento en solución, como recubrimiento por centrifugación, impresión por inyección de tinta y procesamiento rollo a rollo, lo que favorece su escalabilidad industrial.
Propiedades del material y capacidad de ajuste	Presentan alta variabilidad composicional que permite modificar propiedades eléctricas y ópticas. El ancho de banda, el rango de absorción y otros parámetros pueden ajustarse mediante dopaje químico relativamente sencillo, permitiendo el diseño de dispositivos específicos y la absorción de luz en un rango espectral más amplio.
Desventajas	
Estabilidad y durabilidad	Las CSP son altamente sensibles a factores ambientales como humedad, oxígeno, calor y radiación ultravioleta, lo que provoca degradación del material, disminución de eficiencia y menor vida útil en comparación con tecnologías convencionales.
Sostenibilidad y salud	El uso de plomo en muchas composiciones de perovskita representa riesgos ambientales y para la salud. Aunque se han propuesto materiales sustitutos, aún presentan limitaciones para alcanzar eficiencias equivalentes. Además, su disposición final requiere estrategias de reciclaje para mitigar impactos ambientales.

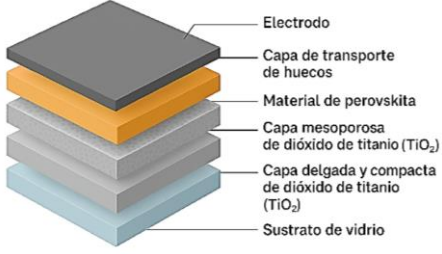
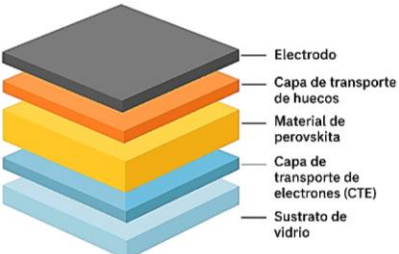
FUNCIONAMIENTO Y ARQUITECTURA DE LAS CÉLULAS SOLARES DE PEROVSKITA.

Una célula fotovoltaica convierte la luz solar en electricidad mediante materiales semiconductores, a través del efecto fotovoltaico. El proceso comienza con la absorción de luz, durante la cual un fotón excita un electrón, desplazándolo de la banda de valencia a la banda de conducción y generando un par electrón-hueco. La siguiente etapa es la separación de cargas, en la que un campo eléctrico induce el desplazamiento y la separación de los electrones y los huecos. Posteriormente, ocurre el transporte de cargas, proceso en el cual los electrones y los huecos se desplazan a través de capas selectivas, generando un voltaje debido a la barrera de potencial interna de la célula, lo que permite la generación de corriente eléctrica en un circuito externo. Finalmente, las cargas son recolectadas en los electrodos (Jose y col., 2025a; Manjunath y col., 2025; Priya y Stonier, 2025).

Actualmente, existen diversos materiales absorbentes de luz empleados en sistemas solares fotovoltaicos, siendo los más comunes el silicio (Si), el telurio de cadmio (CdTe) y el sulfuro de cadmio (CdS). Como resultado de los avances en la ciencia e ingeniería de materiales, se han desarrollado nuevas tecnologías que permiten absorber la luz de manera más eficiente. Entre estas tecnologías emergentes se encuentran las células solares de puntos cuánticos, las células solares sensibilizadas con colorante, las células solares en tándem, las células solares orgánicas y las células solares de perovskita, siendo estas últimas consideradas una de las innovaciones más prometedoras en el campo de la tecnología fotovoltaica (Jose y col., 2025d; Manjunath y col., 2025).

La arquitectura de las células solares de perovskita se clasifica en dos categorías principales: la estructura mesoporosa y la estructura planar. Estas configuraciones permiten alcanzar altos niveles de eficiencia y costos de producción reducidos. Cada tipo de arquitectura cuenta con componentes específicos que influyen directamente en el desempeño de la célula. En la Tabla 3 se presentan las características principales de cada estructura.

Tabla 3. Tipos de arquitectura de células solares de perovskita (Alam y col., 2025; Gantumur y col., 2025; Gopal Krishna y col., 2021; Jose y col., 2025d; Priya y Stonier, 2025; Roy y col., 2020).

Estructura mesoporosa (Figura 2).	Estructura plana (Figura 3).
1. Sustrato de vidrio. 2. Óxido conductor transparente (OCT), generalmente óxido de estaño dopado con flúor (OEF) u óxido de indio y estaño (OIE). 3. Capa delgada y compacta de dióxido de titanio (TiO_2), cuya función es el transporte de electrones y la prevención de la recombinación electrón-hueco. 4. Capa mesoporosa de dióxido de titanio (TiO_2), la cual proporciona una plataforma para la infiltración de la perovskita, aumentando el área interfacial y favoreciendo una separación de carga más eficiente. 5. Material de perovskita, depositado sobre la capa mesoporosa de TiO_2. Durante este proceso, la perovskita se infiltra en la estructura mesoporosa del TiO_2 y forma una película sólida capaz de absorber la luz y generar portadores de carga. 6. Capa de transporte de huecos, que puede estar compuesta por Spiro-OMeTAD o poli(triarylamina) (PTAA), cuya función es la extracción y el transporte de huecos hacia el ánodo. 7. Electrodo, generalmente fabricado de oro o plata, el cual se deposita sobre la capa de transporte de huecos.  Figura 2. Estructura mesoporosa. Esta estructura proporciona altas eficiencias de conversión de potencia debido a la efectiva absorción de luz y al eficiente transporte de carga.	1. Sustrato de vidrio. 2. Óxido conductor transparente (OCT). Generalmente, se emplea óxido de estaño dopado con flúor (OEF) u óxido de indio y estaño (OIE). 3. Capa de transporte de electrones (CTE). Se emplean materiales como TiO_2, SnO_2 o el éster metílico del ácido fenil-C61-butírico (PCBM). 4. Material de perovskita. Este material se deposita directamente sobre la capa de transporte de electrones, sin necesidad de una estructura mesoporosa de soporte. 5. Capa de transporte de huecos. Pueden emplearse materiales como Spiro-OMeTAD, PTAA o materiales inorgánicos como el óxido de níquel (NiO). 6. Electrodo. Generalmente está compuesto por oro o plata y se deposita sobre la capa de transporte de huecos.  Figura 3. Estructura plana. Este tipo de arquitectura presenta un proceso de fabricación más simple y mayor facilidad de escalamiento. Sin embargo, en términos de eficiencia, puede presentar valores ligeramente inferiores en comparación con la estructura mesoporosa, debido a una menor eficiencia en la separación de carga y a mayores tasas de recombinación.

AVANCES RECIENTES Y PERSPECTIVAS FUTURAS EN LA TECNOLOGÍA DE CÉLULAS SOLARES DE PEROVSKITA (CSP)

Los avances más significativos en el desarrollo de las células solares de perovskita (CSP) se han concentrado en la mejora de la eficiencia, el



incremento de la estabilidad operativa, la optimización de nuevas composiciones y el impulso hacia su comercialización e integración en tecnologías emergentes. Desde su introducción en aplicaciones fotovoltaicas en 2009, cuando las perovskitas de haluro organometálico se emplearon en células solares sensibilizadas por colorante con eficiencias de conversión de entre 3 % y 8 %, el progreso ha sido notable. La transición hacia dispositivos de estado sólido, junto con la manipulación química y el perfeccionamiento de los métodos de síntesis, permitió alcanzar eficiencias superiores a 16 % en 2015, superar 20 % en 2016 y, en la actualidad, obtener valores por encima de 25 % (Naseer y col., 2025). Este rápido desarrollo, logrado en menos de 15 años, ha consolidado a las CSP como una alternativa prometedora frente a las tecnologías basadas en silicio.

Uno de los enfoques principales para incrementar la eficiencia consiste en el desarrollo de células solares en configuración tándem, en las que las capas de perovskita se combinan con otros materiales, como el silicio, para aprovechar un espectro solar más amplio. Estas configuraciones permiten optimizar la absorción de la radiación al integrar materiales con diferentes coeficientes de absorción, lo que potencialmente posibilita alcanzar eficiencias superiores a 30 %. No obstante, esta estrategia presenta retos técnicos relevantes, entre los que destacan la optimización de las interfaces, el ajuste de la banda prohibida y la compatibilidad entre los componentes (Jose y col., 2025c; Kumar y col., 2026; Lin y col., 2026). Asimismo, el desarrollo de células multiunión basadas en perovskita requiere el empleo de modelos computacionales, aprendizaje automático, diseño asistido por computadora y métodos experimentales avanzados para optimizar la deposición capa por capa y minimizar las pérdidas interfaciales, incrementando la eficiencia global (Hussain y Gagliardi, 2022; Vengoli y col., 2025).

Paralelamente, la estabilidad y la vida útil de las CSP continúan siendo desafíos fundamentales. Factores ambientales como la humedad, el oxígeno, el calor y la radiación ultravioleta provocan la degradación del material. Para contrarrestar estos efectos, se han desarrollado nuevos métodos de síntesis, composiciones químicas más estables, técnicas avanzadas de encapsulación y ajustes en las capas de interfaz. En este contexto, las perovskitas bidimensionales (2D) han demostrado mayor resistencia frente a condiciones ambientales adversas. Además, se investigan sistemas de encapsulación multicapa que combinan materiales de barrera orgánicos e inorgánicos, así como recubrimientos ultrafinos obtenidos mediante deposición de capas atómicas (ALD) y deposición química de vapor (CVD), que proporcionan

protección adicional y mejoran la estabilidad operativa (Balagowtham y col., 2025; Wu y col., 2025).

Otro aspecto relevante en la evolución de las CSP es la búsqueda de composiciones químicas alternativas que permitan mantener o mejorar las propiedades electrónicas del material, al tiempo que se reduce su impacto ambiental. En particular, el desarrollo de perovskitas sin plomo representa una línea de investigación prioritaria debido a la toxicidad de este elemento y los riesgos asociados para la salud y el medio ambiente. Asimismo, la exploración de nuevas combinaciones de cationes, aniones y haluros ha permitido diseñar perovskitas de haluros mixtos, como las de yoduro-bromuro, que facilitan el ajuste de la banda prohibida y favorecen su aplicación en estructuras tándem. El desarrollo de perovskitas dobles también constituye una alternativa prometedora para reducir la toxicidad y mejorar la eficiencia y estabilidad de los dispositivos (Astakala y col., 2026; Battula y col., 2022; Menon y Krishnamoorthy, 2025; Yadav y col., 2025).

En términos de aplicación tecnológica, los esfuerzos hacia la comercialización han demostrado la viabilidad de las CSP para la fabricación de paneles solares integrados, flexibles y ligeros, ampliando sus posibilidades de uso en dispositivos portátiles, electrónica flexible, fuentes de energía móviles y sistemas integrados en edificaciones, como ventanas fotovoltaicas. Para lograr estas aplicaciones, es necesario optimizar la estabilidad mecánica, la eficiencia energética, la selección de sustratos adecuados, los métodos de encapsulación y la arquitectura del dispositivo (Jose y col., 2025c; Khir y col., 2025; Maniarasu y col., 2025; Salem y col., 2026).

La viabilidad industrial de las CSP depende del desarrollo de técnicas de fabricación escalables y económicamente competitivas. Entre las estrategias más relevantes destacan la impresión por inyección de tinta, la producción rollo a rollo y la deposición de vapor, que permiten reducir costos y tiempos de producción. Además, la implementación de controles de calidad en tiempo real, la automatización de procesos y el establecimiento de normas de calidad son factores esenciales para garantizar la consistencia y uniformidad de las películas de perovskita, favoreciendo su comercialización masiva (Balagowtham y col., 2025; Kumar y col., 2026).

Finalmente, la integración de las CSP con sistemas de almacenamiento de energía constituye una línea de investigación emergente orientada a mitigar la intermitencia inherente a la generación fotovoltaica. En este contexto, se

explora la combinación de células de perovskita con baterías y supercondensadores para asegurar un suministro energético más estable. Paralelamente, se investigan células de perovskita transparentes, estrategias de gestión térmica y sistemas de control inteligente que contribuyan a maximizar la eficiencia energética global (Almutairi y col., 2025). En conjunto, estos avances reflejan el potencial de las CSP para consolidarse como una tecnología clave en el desarrollo de sistemas fotovoltaicos de próxima generación.

CONCLUSIONES

La crisis climática actual, impulsada principalmente por el uso excesivo de combustibles fósiles, exige la implementación de medidas urgentes de mitigación mediante una transición energética hacia fuentes renovables sostenibles. Entre estas, la energía solar fotovoltaica destaca como una de las alternativas más prometedoras. El desarrollo de esta tecnología ha mostrado avances significativos en un periodo relativamente corto, en comparación con otras fuentes de energía renovable.

Uno de los principales enfoques de la investigación reciente se ha centrado en la búsqueda de materiales alternativos al silicio convencional. En este contexto, los materiales basados en perovskitas han surgido como una solución con alto potencial tecnológico. Su versatilidad radica en la posibilidad de sintetizarlos a partir de una amplia variedad de compuestos, lo que permite ajustar su banda prohibida y mejorar su estabilidad térmica. Esta capacidad favorece la ampliación del espectro de absorción de la luz, optimizando las propiedades electrónicas y contribuyendo al incremento significativo de la eficiencia de los dispositivos fotovoltaicos.

Las células solares basadas en perovskita han alcanzado eficiencias destacadas; sin embargo, su comercialización sigue limitada por desafíos tecnológicos, entre ellos la inestabilidad frente a la humedad, al oxígeno, a la radiación UV y al estrés térmico, factores que favorecen su degradación y disminuyen la vida útil de los dispositivos. Asimismo, la toxicidad asociada al uso de plomo plantea preocupaciones ambientales, mientras que la escalabilidad y la reproducibilidad de películas homogéneas continúan



representando obstáculos significativos para la producción industrial. En este sentido, las investigaciones futuras deberán enfocarse en el desarrollo de nuevas composiciones con mayor estabilidad y menor toxicidad, así como en estrategias avanzadas de encapsulamiento y en la optimización de interfaces, junto con el desarrollo de métodos de fabricación compatibles con procesos industriales y la implementación de enfoques sostenibles que fortalezcan la viabilidad tecnológica, ambiental y económica de esta tecnología.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECyT) por el apoyo económico otorgado para la realización de este proyecto de investigación, a través del Programa "Investigadoras e Investigadores COMECyT 2025", folio EESP2025-0006.

REFERENCIAS

- Alam, N., Tulka, T. K. & Hossain, M. M. (2025). Materials, stability, and environmental aspects of perovskite solar cell: A topical review. *E-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 13:101093. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prime.2025.101093>
- Almutairi, M. M., Alalwan, M. H., Algharash, H. K., Aldossary, R. A., Al-Saleem, N. K., Alzahrani, Y. A. & Alkahtani, M. (2025). Hybrid energy platforms: A review of perovskite solar cells coupled with graphene supercapacitors. *Results in Engineering*, 28: 107200. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107200>
- Astakala, A. K., Lee, S.-Y., Gautam, J., Thapa, K. B., In, I., Lee, S. J. & Park, S.-J. (2026). Engineering inorganic perovskite solar cells: overcoming efficiency and stability barriers for next-generation photovoltaics. *Advanced Powder Materials*, 5: 100354. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apmate.2025.100354>
- Balogowtham, N., Acchutharaman, K. R., Pandian, M. S., Kumar, M., Chang, J.-H. & Ramasamy, P. (2025). Challenges in commercializing perovskite solar cells with focus on sustainability, stability, and cost efficiency. *Solar Energy*, 301: 113892. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2025.113892>

- Battula, R. K., Ramasamy, E., Bhyrappa, P., Sudakar, C. & Veerappan, G. (2022). Chapter 12 - Oxide free materials for perovskite solar cells. In P. Arunachalam, J. Theerthagiri, A. M. Al-Mayouf, M. Y. Choi & M. Jagannathan (Eds.), *Oxide Free Nanomaterials for Energy Storage and Conversion Applications* (pp. 287–306). Amsterdam: Elsevier, Netherlands. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823936-0.00001-2>
- Chauhan, A. K., Kumar, P. & Sharma, S. N. (2024). Chapter Three - Perovskite solar cells: Past, present, and future. In S. Sundaram, V. Subramaniam, R. P. Raffaele, M. K. Nazeeruddin, A. Morales-Acevedo, M. B. Navarro & A. F. Hepp (Eds.), *Photovoltaics Beyond Silicon* (pp. 113–163). Amsterdam: Elsevier, Netherlands. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90188-8.00015-4>
- Gantumur, M., Shahiduzzaman, Md., Hossain, M. I., Akhtaruzzaman, Md., Nakano, M., Karakawa, M., Nunzi, J. M. & Taima, T. (2025). Revolutionizing light capture: a comprehensive review of back-contact perovskite solar cell architectures. *Materials Today*, 90: 441–465. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matmod.2025.08.017>
- Gopal Krishna, B., Rathore, G. S., Shukla, N. & Tiwari, S. (2021). 18 - Perovskite solar cells: A review of architecture, processing methods, and future prospects. In I. Khan, A. Khan, M. M. A. Khan, S. Khan, F. Verpoort & A. Umar (Eds.), *Hybrid Perovskite Composite Materials* (pp. 375–412). Amsterdam: Woodhead Publishing, Netherlands. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819977-0.00018-4>
- Hussain, K. & Gagliardi, A. (2022). Modelling tandem/multi-junction hybrid perovskite–organic solar cells: A combined drift–diffusion and kinetic Monte Carlo study. *Solar Energy*, 243: 193–202. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.07.033>
- Jose, R., Brown, T. M. & Ling, J. (2025a). Chapter One - Perovskite solar cells: amid the rise of photovoltaic technologies. In R. Jose, T. M. Brown, & J. Ling (Eds.), *Perovskite Solar Cells* (pp. 1–20). Amsterdam: Elsevier, Netherlands. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-19134-3.00006-8>
- Jose, R., Brown, T. M. & Ling, J. (2025b). Chapter Seven - Power and price of perovskite solar cells. In R. Jose, T. M. Brown, & J. Ling (Eds.), *Perovskite Solar Cells* (pp. 125–138). Amsterdam: Elsevier, Netherlands. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-19134-3.00012-3>
- Jose, R., Brown, T. M. & Ling, J. (2025c). Chapter Six - Perovskite solar cell products. In R. Jose, T. M. Brown, & J. Ling (Eds.), *Perovskite Solar Cells* (pp. 99–124). Amsterdam: Elsevier, Netherlands. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-19134-3.00011-1>
- Jose, R., Brown, T. M. & Ling, J. (2025d). Chapter Two - Material systems of perovskite solar cells. In R. Jose, T. M. Brown, & J. Ling (Eds.), *Perovskite Solar Cells* (pp. 21–42). Amsterdam: Elsevier, Netherlands. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-19134-3.00007-X>
- Khair, H., Pandey, A. K., Saidur, R., Ahmad, M. S. & Samykano, M. (2025). Advancements, challenges and future prospects of flexible Pb-free perovskite solar cells. *Journal of*

Power Sources, 656: 238025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2025.238025>

Kumar, P., Shankar, G., Kumar, A., Najar, A. & Pradhan, B. (2026). Recent progress in all-perovskite tandem solar cells and modules: redefining limits. *Progress in Materials Science*, 156: 101560. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2025.101560>

Lin, W., Cao, Y., Ke, Z., & Hassan, A. (2026). Shape-driven optimization strategy for efficient and stable lead-free all-perovskite tandem solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 295: 113971. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2025.113971>

Maniarasu, S., Manjunath, V., Veerappan, G. & Ramasamy, E. (2025). Chapter 17 - Flexible perovskite solar cells. In A. Thankappan, S. Thomas, & Y. Wang (Eds.), *Perovskite Photovoltaics* (Second Edition) (pp. 511–540). Amsterdam: Academic Press, Netherlands. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-21983-2.00018-5>

Manjunath, V., Krishna, R., Maniarasu, S., Ramasamy, E., Shanmugasundaram, S., & Veerappan, G. (2025). Chapter 4 - Perovskite solar cell architectures. In A. Thankappan, S. Thomas, & Y. Wang (Eds.), *Perovskite Photovoltaics* (Second Edition) (pp. 89–118). Amsterdam: Academic Press, Netherlands. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-21983-2.00004-5>

Mathan Kumar, P., Das, A., Seban, L. & Nair, R. G. (2025). Chapter 15.1 - Fabrication of perovskite solar cells. In A. Thankappan, S. Thomas, & Y. Wang (Eds.), *Perovskite Photovoltaics* (Second Edition) (pp. 413–450). Amsterdam: Academic Press, Netherlands. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-21983-2.00015-X>

Menon, V. S., & Krishnamoorthy, A. (2025). Chapter 15 - Nanoengineering of solution processed metal oxide interfacial layers for perovskite solar cells: impact on device performance and stability. In S. S. Ramamurthy, S. Bhaskar, & N. Reddy (Eds.), *Nano-Engineering at Functional Interfaces for Multi-Disciplinary Applications* (pp. 371–397). Amsterdam: Elsevier, Netherlands. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-21691-6.00016-0>

NASA, Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (2025). Cambio climático. Dióxido de Carbono. [En línea]. Disponible en: <https://ciencia.nasa.gov/cambio-climatico/>

ONU, Organización de las Naciones Unidas (2024a). Desarrollo Sostenible. Objetivos de Desarrollo Sostenible. [En línea]. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/>

ONU, Organización de las Naciones Unidas (2024b). La Población Mundial Llegará a Un Máximo de 10.300 Millones En Este Siglo. [En línea]. Disponible en: <https://news.un.org/es/story/2024/07/1531126>

Nande, A., Raut, S. & Dhoble, S. J. (2021). Chapter 9 - Perovskite solar cells. In S. J. Dhoble, N. T. Kalyani, B. Vengadaesvaran, & A. Kariem Arof (Eds.), *Energy Materials* (pp. 249–281). Amsterdam: Elsevier, Netherlands. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823710-6.00002-9>



- Naseer, S., Aamir, M., Akhtar, J. & Khan, M. E. (2025). Chapter 8 - Developing high efficiency perovskite solar cells through defect engineering. In A. Thankappan, S. Thomas, & Y. Wang (Eds.), *Perovskite Photovoltaics (Second Edition)* (pp. 227–250). Amsterdam: Academic Press, Netherlands. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-21983-2.00008-2>
- Priya, P. & Stonier, A. A. (2025). Emerging innovations in solar photovoltaic (PV) technologies: The perovskite solar cells and more. *Energy Reports*, 14: 216–242. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2025.06.003>
- Purabgola, A. & Kandasubramanian, B. (2021). 3 - Thin films for planar solar cells of organic-inorganic perovskite composites. In I. Khan, A. Khan, M. M. A. Khan, S. Khan, F. Verpoort, & A. Umar (Eds.), *Hybrid Perovskite Composite Materials* (pp. 95–115). Amsterdam: Woodhead Publishing, Netherlands. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819977-0.00003-2>
- Rehman, Q., Aamir, M., Akhtar, J., Wali, Q. & Khan, A. D. (2025). Chapter 11 - Development of single crystal perovskite solar cells. In A. Thankappan, S. Thomas & Y. Wang (Eds.), *Perovskite Photovoltaics (Second Edition)* (pp. 301–325). Amsterdam: Academic Press, Netherlands. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-21983-2.00011-2>
- Roy, P., Kumar Sinha, N., Tiwari, S. & Khare, A. (2020). A review on perovskite solar cells: Evolution of architecture, fabrication techniques, commercialization issues and status. *Solar Energy*, 198: 665–688. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.01.080>
- Roy, P., Yadav, N. & Khare, A. (2023). 25 - Development of less toxic perovskite materials for solar cell applications. In S. Moharana, T. Badapanda, S. K. Satpathy, R. N. Mahaling, & R. Kumar (Eds.), *Perovskite Metal Oxides* (pp. 645–669). Amsterdam: Elsevier, Netherlands. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99529-0.00012-6>
- Sahoo, S. K., Balamurugan, M. & Narendiran, S. (2025). Chapter 1 - Introduction: why perovskite and perovskite solar cells? In A. Thankappan, S. Thomas, & Y. Wang (Eds.), *Perovskite Photovoltaics (Second Edition)* (pp. 1–24). Amsterdam: Academic Press, Netherlands. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-21983-2.00001-X>
- Sahu, P. & Palei, S. (2023). 19 - Application of perovskites in solar cells. In S. Moharana, T. Badapanda, S. K. Satpathy, R. N. Mahaling, & R. Kumar (Eds.), *Perovskite Metal Oxides* (pp. 485–517). Amsterdam: Elsevier, Netherlands. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99529-0.00025-4>
- Salem, M. S., Shaker, A., Al-Dhlan, K. A., Alshammari, M. T., Qureshi, M. T., Abouelatta, M. & Okil, M. (2026). Design of fully flexible monolithic lead-free perovskite/Si tandem solar cells: Advanced TCAD simulations. *Renewable Energy*, 256: 124522. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.124522>
- Sambathkumar, S. & Shakila, P. B. (2024). Chapter Six - Organic hole-transporting materials for perovskite solar cells: Progress and prospects. In S. Sundaram, V. Subramaniam, R. P. Raffaele, M. K. Nazeeruddin, A. Morales-Acevedo, M. B. Navarro, & A. F. Hepp

(Eds.), *Photovoltaics Beyond Silicon* (pp. 195–220). Amsterdam: Elsevier, Netherlands. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90188-8.00005-1>

Shah, A. U. I. & Meyer, E. L. (2025). Perovskite-based solar cells in photovoltaics for commercial scalability: Current progress, challenges, mitigations and future prospectus. *Solar Energy*, 286: 113172. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.113172>

Singh, A., Challa, R. K., Suhail, A. & Raavi, S. S. K. (2025). Chapter 12 - Advanced optical characterization techniques for perovskite solar cells. In A. Thankappan, S. Thomas, & Y. Wang (Eds.), *Perovskite Photovoltaics (Second Edition)* (pp. 327–357). Amsterdam: Academic Press, Netherlands. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-21983-2.00012-4>

Vengoli, M. N., Muhammed Swalih, P. M. & Thankappan, A. (2025). Chapter 14 - Mathematical modeling of perovskite solar cells. In A. Thankappan, S. Thomas, & Y. Wang (Eds.), *Perovskite Photovoltaics (Second Edition)* (pp. 383–411). Amsterdam: Academic Press, Netherlands. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-21983-2.00014-8>

Wattthage, S. C., Song, Z., Phillips, A. B. & Heben, M. J. (2025). Chapter 3.1 - Evolution of perovskite solar cells. In A. Thankappan, S. Thomas, & Y. Wang (Eds.), *Perovskite Photovoltaics (Second Edition)* (pp. 43–67). Amsterdam: Academic Press, Netherlands. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-21983-2.00003-3>

Wu, F., Gao, Y., Zeng, Y., Tan, J., Zhong, C., Gao, X., Yang, Y., Liu, Y. & Zhu, L. (2025). Quasi-pure-phase 2D perovskites for high-efficiency and stable 2D/3D perovskite heterojunction solar cells. *Chemical Engineering Journal*, 523: 168799. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.168799>

Yadav, A., Ghafel Shakier, H., Fahdil, F., Sulaiman, J. M. A. & Tariq, H. (2025). 17 - A comparative study on nickel oxide-based hole transport materials for inverted perovskite solar cells. In A. Kumar, P. Kumar, V. Gambhir, & R. C. Kuhad (Eds.), *Advances in Sustainable Materials* (pp. 349–362). Amsterdam: Elsevier, Netherlands. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-13849-2.00017-X>