

Artículo de revisión

Análisis cienciométrico sobre los avances, desafíos y perspectivas de los sistemas fotovoltaicos/térmicos (PV/T)

Scientometric Analysis of the Advances, Challenges, and Perspectives of Photovoltaic/Thermal (PV/T) Systems

WILLIAMS SERGIO ALMANZA QUISPE¹

 <https://orcid.org/0000-0003-0812-7834>

Recibido: 15/01/2025

Aceptado: 24/04/2025

Publicado: 06/05/2025

¹Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann,
Tacna, Perú

E-mail: walmanzaq@unjbg.edu.pe



Esta obra está bajo licencia internacional
Creative Commons Reconocimiento 4.0



Facultad de Ingeniería
Publicación Oficial

Resumen

El crecimiento demográfico y la urbanización generaron una mayor demanda energética en todo el mundo, destacando a la energía solar como una de las principales alternativas sostenibles para enfrentar este desafío. El objetivo del estudio fue mapear los avances, desafíos y perspectivas de sistemas fotovoltaico-térmicos (PV/T), mediante un análisis bibliométrico y de las publicaciones más relevantes de la base de datos de Scopus. Aplicando criterios de exclusión e inclusión, se procesaron 1077 documentos en Biblioshiny, una interfaz basada en el software R y VosViewer. Los países con mayor producción y colaboración internacional fueron China, India e Irán, mientras que la institución más destacada fue la Universidad de Ciencia y Tecnología de China. La revista más prominente fue *Solar Energy* de Reino Unido. Las investigaciones más citadas indican avances en materiales inorgánicos, orgánicos y nanomateriales para mejorar la eficiencia de conversión y el rendimiento del sistema. No obstante, persisten desafíos en la integración económica y técnica de estos sistemas en diversos contextos climáticos y geográficos. Además, se subraya la importancia de desarrollar tecnologías híbridas, combinando inteligencia artificial y técnicas de aprendizaje automático junto a la economía circular para lograr mayor eficiencia, así como la necesidad de políticas que apoyen la investigación y la implementación de estos sistemas.

Palabras clave: energía renovable; desarrollo sostenible; sistema fotovoltaico térmico.

Abstract

Population growth and urbanization generated a greater global energy demand, positioning solar energy as one of the main sustainable alternatives to address this challenge. The aim of this study was to map the advances, challenges, and perspectives of photovoltaic-thermal (PV/T) systems through a bibliometric analysis and a review of the most relevant publications from the Scopus database. Applying predefined inclusion and exclusion criteria, a total of 1077 documents were processed using Biblioshiny, an R-based interface, and VosViewer. The countries with the highest scientific production and international collaboration were China, India, and Iran, with the University of Science and Technology of China standing out as the most influential institution. The most prominent journal was *Solar Energy*, based in the United Kingdom. The most frequently cited studies highlight significant advances in inorganic, organic, and nanomaterial-based technologies aimed at improving conversion efficiency and overall system performance. Nevertheless, challenges persist regarding the economic and technical integration of these systems across diverse climatic and geographic contexts. Additionally, the importance of developing hybrid technologies is emphasized, combining artificial intelligence and machine learning techniques with circular economy principles to achieve greater efficiency, along with policies that support research and large-scale implementation of these systems.

Keywords: renewable energy; sustainable development; photovoltaic-thermal system.



1. Introducción

La energía es un recurso fundamental en el desarrollo humano, económico y social. Su consumo per cápita es un indicador del nivel de desarrollo de un país; los mayores niveles de consumo se encuentran en naciones como Estados Unidos, Canadá y algunos países europeos, mientras que los países en desarrollo y subdesarrollados presentan cifras más bajas (Tawalare, 2021). Este consumo creciente está impulsado por el aumento de la población y la mejora de las condiciones económicas, lo que hace de la energía un factor indispensable para la generación de riqueza y el mantenimiento de los estándares de vida (Al-Waeli et al., 2017; Pastuszak y Węgierek, 2022). Las fuentes convencionales de energía han sido, históricamente, los combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas natural (Kazemian et al., 2023; Tawalare, 2021). Estos recursos han sido el motor principal del desarrollo industrial y económico durante más de un siglo debido a su alta densidad energética y disponibilidad. Sin embargo, el uso intensivo de combustibles fósiles ha provocado problemas graves y crecientes. Por un lado, estos recursos no son renovables y están siendo consumidos a un ritmo mucho mayor del que pueden ser repuestos naturalmente, lo que lleva al agotamiento de las reservas disponibles (Madurai Elavarasan et al., 2022). Por otro lado, la combustión de estos combustibles libera grandes cantidades de dióxido de carbono (CO_2) y otros contaminantes a la atmósfera, contribuyendo significativamente al cambio climático, el calentamiento global y la degradación de la capa de ozono (Hasan et al., 2023). Además, los métodos tradicionales de producción de energía son responsables de la contaminación del aire y otros peligros ambientales, como derrames de petróleo y desechos tóxicos (Pastuszak y Węgierek, 2022).

En este escenario, la necesidad de nuevas fuentes amigables con el medio ambiente se ha vuelto urgente. Las energías renovables, en particular, han aumentado su atractivo debido a su capacidad para proporcionar electricidad de forma sostenible y limpia (Hasan et al., 2023; Kazem et al., 2023). Las energías renovables incluyen la eólica, geotérmica, hidroeléctrica y solar, todas ellas inagotables y con un impacto ambiental mucho menor en comparación con los combustibles fósiles (Yazdanifard y Ameri, 2018). La energía solar, en particular, se destaca por su abundancia y accesibilidad. Cada día, la Tierra recibe una inmensa cantidad de energía del sol, mucho más de lo que la humanidad consume. Aprovechar esta fuente de energía de manera eficiente puede resolver muchos de los problemas asociados con las fuentes de energía convencionales (Tawalare, 2021).

Entre las tecnologías solares, la energía solar fotovoltaica ha ganado un protagonismo considerable. Esta tecnología utiliza células fotovoltaicas para convertir la luz solar directamente en electricidad mediante el efecto fotoeléctrico. Las celdas fotovoltaicas, fabricadas principalmente de silicio, generan electricidad cuando los fotones de la luz solar excitan a los electrones en el material, creando un flujo de corriente eléctrica (Madurai Elavarasan et al., 2022; Hasan et al., 2023; Shah et al., 2023). Aunque las celdas fotovoltaicas han mejorado en eficiencia, una parte significativa de la energía solar recibida se pierde como calor, lo que puede disminuir la eficiencia eléctrica y reducir la vida útil de las celdas. Para superar estas limitaciones, se han desarrollado sistemas híbridos fotovoltaicos-térmicos (PV/T), que combinan la generación de electricidad y calor, que buscan optimizar el aprovechamiento de la energía solar y mejorar su eficiencia (Lazaroïu et al., 2023; Oni et al., 2024). De modo que el objetivo de la investigación fue mapear los avances, desafíos y perspectivas emergentes en el área temática.

2. Metodología

Los datos fueron recopilados de la base de datos de Scopus, por considerarse la fuente que registra el mayor número de revistas de impacto a nivel global. Además, utiliza criterios consistentes para la inducción de artículos en su índice. De acuerdo a la temática de estudio se creó la siguiente ecuación de búsqueda avanzada en el campo Title-Abs-Key, utilizando operadores booleanos And y Or: *(("Photovoltaic-Thermal Systems" OR "PV/T systems") AND ("solar energy" OR "solar power") AND (efficiency OR performance OR optimization))*. Para mayor relevancia del estudio, solo se consideraron artículos originales y de conferencia que se encontraban en el idioma inglés. No se aplicaron restricciones temporales.

La información obtenida se exportó al programa Microsoft Excel 2016. Luego, se empleó por una parte el paquete Biblioshiny, una interfaz web de Bibliometrix basada en el software R y de acceso abierto para evaluar cuantitativamente las publicaciones. Por otra parte, para analizar visualmente y elaborar mapas del conocimiento científico se utilizó el software VOSviewer. Esta metodología agrupa, procesa y resume grandes cantidades de datos, proporcionando así a los investigadores información valiosa para la toma de decisiones y la identificación de áreas de interés (Aria y Cuccurullo, 2017; van Eck y Waltman, 2010). Además, se analizaron los resultados científicos anuales, los autores, las revistas, instituciones y las palabras clave de alta frecuencia en esta área de investigación. La relación entre las palabras claves, los países que más contribuyen y las afiliaciones más productivas se resumió mediante un gráfico de tres campos. También, se identificaron las 10 revistas y artículos más citados. Así mismo, se evaluaron los indicadores como el factor de impacto (FI), el número de citas y el índice H. El FI de cada publicación se obtuvo del indicador SCImago Journal Rank [SJR] 2023. La clasificación en el SJR se basó en el FI de las revistas en el año, y las revistas se clasificaron en 4 regiones: Q1, Q2, Q3 y Q4, en ese orden: Q1 > Q2 > Q3 > Q4 (Q: Cuartil en categoría). El estudio no requirió la aprobación del comité de ética, ya que se trató de un análisis cienciométrico retrospectivo de documentos publicados previamente.

3. Resultados y discusión

El área temática *Energy* concentró el mayor número de publicaciones, con un total de 762 documentos, lo que evidencia el claro enfoque energético de esta tecnología híbrida. Le siguen *Engineering* (454 publicaciones) y *Materials Science* (209 publicaciones), disciplinas que reflejan la importancia del diseño de materiales avanzados y la optimización de componentes para mejorar la eficiencia y viabilidad de estos sistemas (Figura 1a). En cuanto a la producción científica anual (Figura 1b), se aprecia una tendencia ascendente a partir del año 2010, con un incremento sostenido desde 2017. Este comportamiento refleja una creciente atención de la comunidad científica hacia los sistemas PV/T, posiblemente motivada por los compromisos globales de transición energética y mitigación del cambio climático.

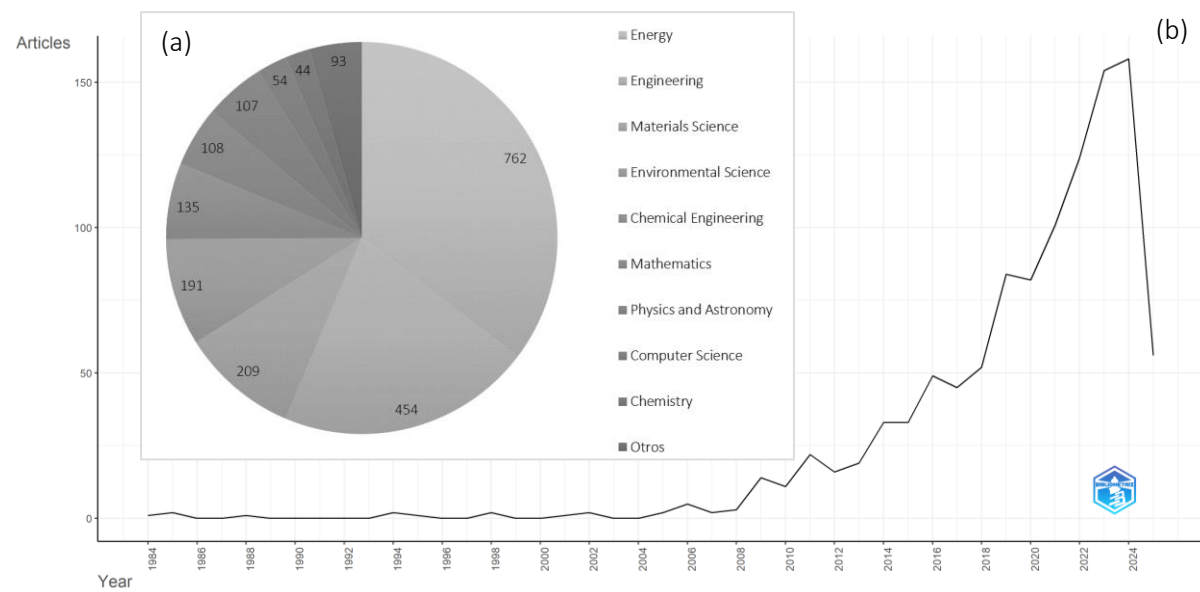
Mientras que la Figura 2a visualiza las relaciones entre los tópicos más recurrentes (izquierda), los países con mayor producción (centro) y las instituciones académicas líderes (derecha). Donde China lidera la producción científica, destacando instituciones como la *University of Science and Technology of China*, *Shanghai University of Electric Power* y *Southwest Jiaotong University*, que concentran gran parte de la actividad investigativa. Otros



países relevantes incluyen Malasia, India, Irán, y en menor medida, Estados Unidos, Italia, Reino Unido y Turquía.

Figura 1

Áreas temáticas y producción científica anual



En esa línea, los tópicos más frecuentes, predominan los términos *photovoltaic/thermal*, *solar energy*, *efficiency*, *nanofluid*, *thermal efficiency* y *exergy*, lo cual refleja las prioridades investigativas actuales, enfocadas en la mejora de la eficiencia térmica y eléctrica. Por su parte, el mapa temático (Figura 2b) clasifica los tópicos en cuatro cuadrantes según su centralidad y densidad. No se identifican *Motor Themes*, lo que indica la ausencia de áreas plenamente consolidadas. En *Basic Themes* se agrupan conceptos estructurales como *solar energy*, *thermal efficiency* y *nanofluid*. En *Niche Themes* destaca *photovoltaic thermal systems*, desarrollado, pero con escasa conexión temática. Finalmente, en *Emerging or Declining Themes* se sitúan tópicos como *thermal energy storage* y *phase change materials*, áreas en consolidación o con necesidad de mayor integración interdisciplinar.

La red de colaboración entre países (Figura 3a) evidencia que China, India, Irán, Malasia y Turquía se posicionan como nodos centrales en la producción académica. China lidera con amplia ventaja, no solo en cantidad de publicaciones, sino también como eje articulador de colaboraciones internacionales. Los colores en la red reflejan el promedio de año de publicación, observándose que la mayor intensidad investigativa se ha dado entre 2020 y 2022 (colores entre verde y rojo), especialmente en las colaboraciones de China con India, Malasia y Turquía. Otros países como Estados Unidos, Reino Unido, Arabia Saudita y Egipto participan activamente, aunque con menor centralidad en la red.

El mapa de colaboraciones internacionales (Figura 3b) confirma esta tendencia, donde los trazos rojos indican relaciones activas entre países. Las principales conexiones se concentran en el eje Asia-Asia, seguido de Asia-Oriente Medio y Asia-Europa. El mapa resalta además la escasa participación de países de América Latina y África Subsahariana. En esa misma dirección la Figura 3c presenta producción científica por país, China lidera con más de 200 publicaciones, destacando por su alta proporción de trabajos nacionales (SCP), aunque mantiene una participación significativa en colaboraciones internacionales (MCP). India e Irán

presentan un equilibrio entre publicaciones nacionales y multinacionales, reflejando su interés por integrarse en redes globales. En contraste, países como Reino Unido, Estados Unidos, Canadá, Italia y Australia, aunque con menor volumen total, exhiben una alta proporción de MCP, evidenciando su estrategia de participación en proyectos colaborativos internacionales.

Figura 2

Gráfica de tres campos y mapa temático

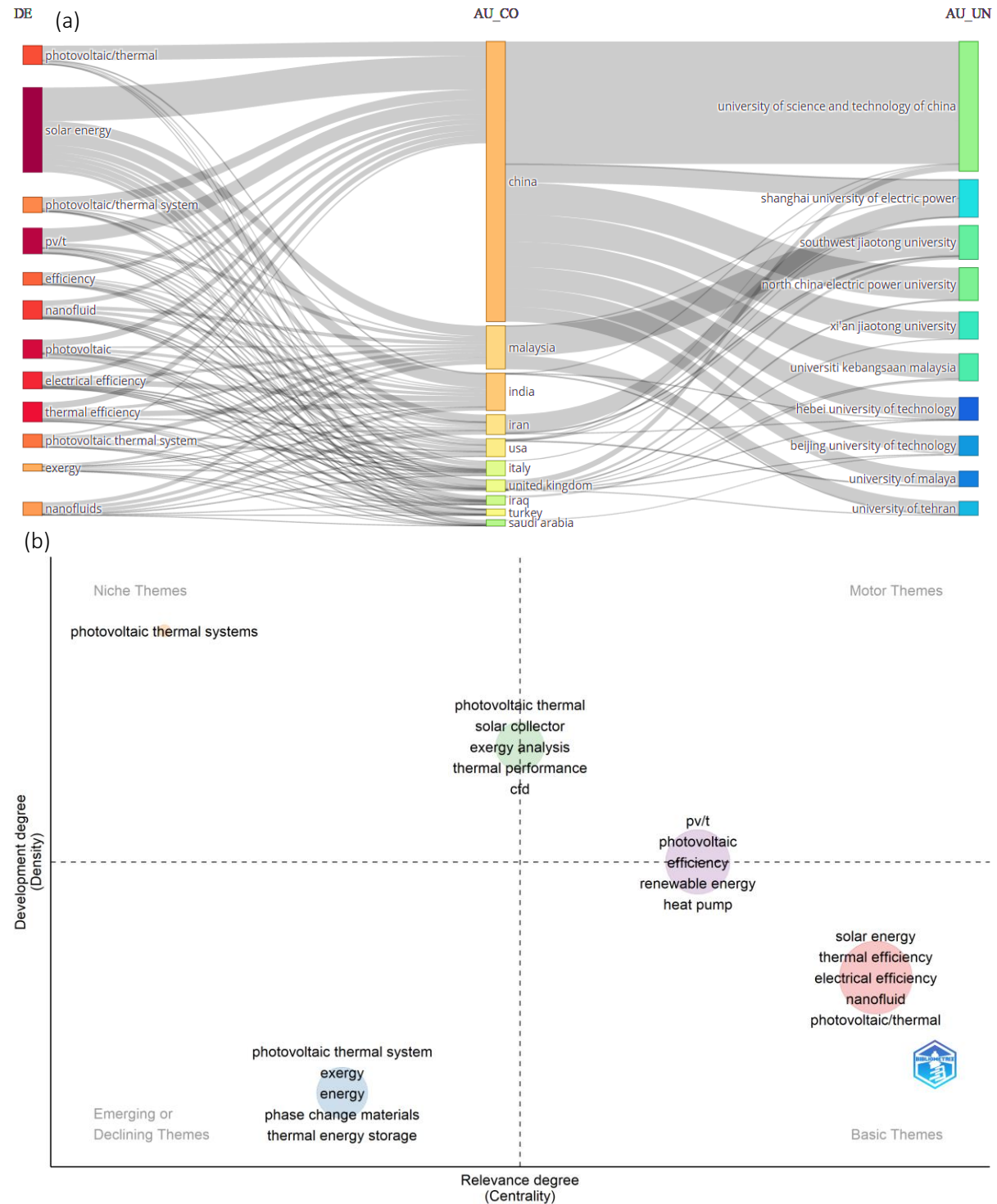
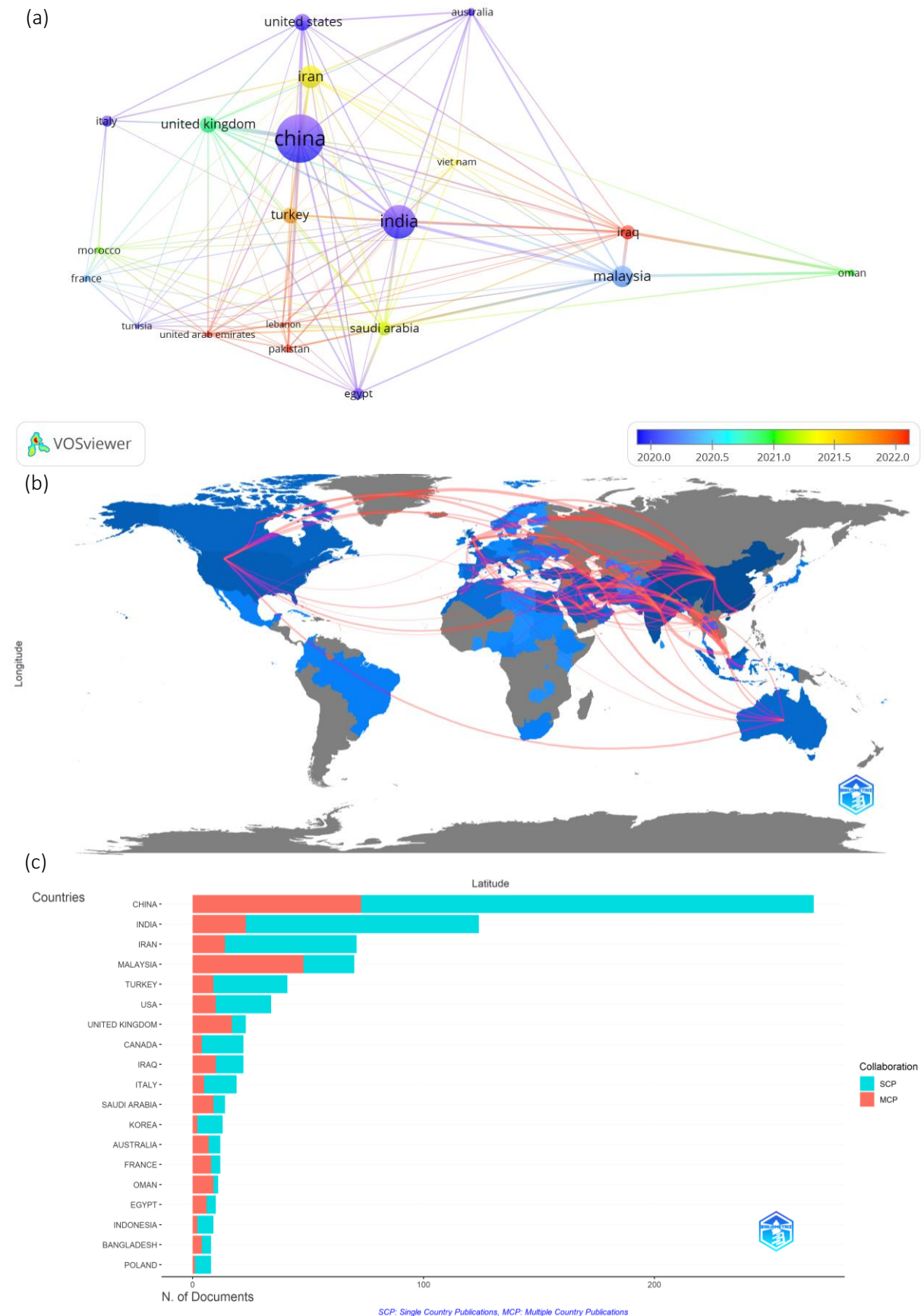




Figura 3

Colaboraciones Internacionales y Producción Científica por países



En la Tabla 1 se evidencia una marcada concentración editorial en el Reino Unido, con ocho de las diez publicaciones mejor posicionadas. Revistas como *Solar Energy*, *Renewable Energy*, y *Energy Conversion and Management* destacan no solo por su elevado número de documentos, sino también por sus altos índices H (238-274) y pertenencia al cuartil Q1. El cuartil en el que se ubica cada revista proporciona una medida de su prestigio dentro de su categoría temática. *Applied Energy* sobresale como la de mayor índice H (323) y SJR (2,90), consolidándose como una de las más influyentes en el área. Por su parte, *Energies* (Suiza) y *Energy Sources, Part A* (EE.UU.) figuran en Q2, con métricas moderadas.

Tabla 1

Métricas de 10 revistas más relevantes a nivel global

Revistas	País	Número de documentos	Cuartil	Índice H	SJR
Solar Energy	Reino Unido	104	Q1	238	1,31
Renewable Energy	Reino Unido	90	Q1	270	2,08
Energy Conversion and Management	Reino Unido	67	Q1	274	2,66
Energy	Reino Unido	52	Q1	274	2,21
Applied Thermal Engineering	Reino Unido	50	Q1	224	1,58
Applied Energy	Reino Unido	43	Q1	323	2,90
Energies	Suiza	22	Q2	175	0,71
Case Studies in Thermal Engineering	Reino Unido	21	Q1	87	1,06
Sustainable Energy Technologies and Assessments	Reino Unido	20	Q1	98	1,61
Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects	Estados Unidos	17	Q2	71	0,54

En la Tabla 1, se presenta las métricas de los 10 documentos más citados. La métrica de citas totales representa la cantidad de veces que un documento ha sido referenciado por otros estudios, lo que se interpreta como un indicador de su impacto, vigencia y capacidad de servir como referencia conceptual o metodológica. En este sentido, el artículo de Teo et al. (2012), con 738 citas, se posiciona como la publicación más influyente, indicando su rol fundacional en el desarrollo de líneas de investigación posteriores. El cuartil (Q) es otro criterio importante, ya que clasifica a las revistas según su posición relativa en su categoría temática, basada en métricas como el factor de impacto o el SJR. En este caso, todas las revistas presentes se encuentran en Q1, lo que denota que los trabajos más citados se han publicado en medios de alta calidad y prestigio internacional. Es relevante destacar que, aunque el artículo de Taylor et al. (2012) en *Light: Science and Applications* presenta un menor número de citas (304) en comparación con otros documentos más citados, su publicación se realizó en una revista con el mayor índice SJR (5,02) de la lista. Esto evidencia que, más allá del volumen de citas, el prestigio de la revista donde se publica aporta un valor adicional al reconocimiento y visibilidad académica del trabajo. Los artículos más antiguos son los más citados debido al tiempo que han



tenido para acumular citas y muchos de ellos describieron por primera vez las técnicas, teorías y metodologías que siguen siendo fundamentales. Sin embargo, eso no quiere decir que no existan artículos recientes de gran relevancia.

Tabla 2

Métricas de los 10 documentos más citados a nivel global

Autores y año	Revistas	País	Citas totales	Cuartil	Índice H	SJR
(Teo et al., 2012)	Applied Energy	Reino Unido	738	Q1	323	2,90
(Tripanagnostopoulos et al., 2002)	Solar Energy	Reino Unido	554	Q1	238	1,31
(Chow et al., 2009)	Applied Energy	Reino Unido	512	Q1	323	2,90
(Kalogirou y Tripanagnostopoulos, 2006)	Energy Conversion and Management	Reino Unido	483	Q1	274	2,66
(Joshi et al., 2009)	International Journal of Thermal Sciences	Francia	330	Q1	155	1,16
(Khanafer y Vafai, 2018)	Renewable Energy	Reino Unido	319	Q1	270	2,08
(Tiwari y Sodha, 2006)	Solar Energy	Reino Unido	316	Q1	238	1,31
(Sandnes y Rekstad, 2002)	Solar Energy	Reino Unido	313	Q1	238	1,31
(Taylor et al., 2012)	Light: Science and Applications	Reino Unido	304	Q1	174	5,02
(Tripanagnostopoulos, 2007)	Solar Energy	Reino Unido	290	Q1	238	1,31

Las crecientes preocupaciones ambientales a nivel mundial incentivan la búsqueda de fuentes de energía alternativas y sostenibles. La generación de energía a partir de recursos renovables progresa impulsada por la innovación tecnológica y una mayor conciencia ambiental en la sociedad. En esa línea, las Naciones Unidas en el año 2015 adoptó 17 objetivos de desarrollo sostenible (ODS). La ODS-7 pretende "Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos". Esta transición hacia energías renovables no solo es esencial para reducir la dependencia de los recursos fósiles y mitigar los efectos del cambio climático, sino también para garantizar la seguridad energética a largo plazo (Shin et al., 2020). La energía no solo impulsa la industria y el transporte, sino que también mejora la calidad de vida (Kazemian et al., 2023).

Países tanto desarrollados como en desarrollo están invirtiendo en grandes proyectos solares, reconociendo la necesidad de una transformación energética para lograr un futuro sostenible (Hasan et al., 2023; Kazem et al., 2023). Hace más de 20 años, Brabec (2004) evaluaba la energía fotovoltaica como una de las tecnologías clave del futuro que abriría aplicaciones y mercados completamente nuevos. No obstante, los esfuerzos para mejorar la eficiencia de conversión han sido el eje central de las investigaciones en sistemas fotovoltaicos y, por extensión, en los sistemas híbridos fotovoltaicos-térmicos (PV/T). Desde entonces, se han evaluado diferentes materiales inorgánicos (Silicio, Perovskitas, Telurio de Cadmio, Diseleniuro de Cobre, Indio y Galio), orgánicos (polímeros conductores y fullerenos en células solares orgánicas) y nanomateriales (grafeno, nanotubos de carbono y nanopartículas metálicas). Los porcentajes de eficiencia varían significativamente según el tipo de material, la tecnología y las condiciones de operación. En tecnologías fotovoltaicas convencionales, las eficiencias eléctricas alcanzan entre 20-27 % en laboratorio y 10-22 % en aplicaciones comerciales (Correa-Baena et al., 2017; Cui, Wang, et al., 2019; Cho et al., 2018; D’Innocenzo et al., 2014; Jeon et al., 2015; Lin et al., 2019; Meng et al., 2018; Zheng et al., 2022). En sistemas PV/T, si bien la eficiencia eléctrica puede reducirse ligeramente por el incremento térmico, la eficiencia combinada puede superar el 60 % en condiciones controladas (Herrando et al., 2023; Kazem et al., 2022; Ramos et al., 2017)). Los nanomateriales, por su parte, se utilizan principalmente como aditivos o recubrimientos para mejorar la absorción de luz, el transporte de carga y la transferencia térmica, potenciando así el rendimiento global de estos sistemas (Tyagi y Kumar, 2021).

Así mismo, Tonui y Tripanagnostopoulos (2007) señalaron que los sistemas fotovoltaicos convierten solo una pequeña fracción de la radiación solar en electricidad, mientras que el resto se convierte en calor residual, lo que reduce la eficiencia del módulo. La tecnología fotovoltaica/térmica (PV/T) recupera parte de este calor para aplicaciones prácticas, aumentando así la eficiencia total del sistema. Los principales materiales utilizados en este último sistema, son los recubrimientos selectivos y nano fluidos con el objetivo de mejorar la transferencia de calor, pero no tienen un valor de eficiencia aislado específico. Pueden contribuir a una eficiencia total del sistema, que incluye tanto la energía eléctrica como la energía térmica producida. Pero los materiales inorgánicos mencionados anteriormente también pueden ser utilizados en sistemas PV/T combinados con tecnologías para la recuperación de calor (Praveen kumar et al., 2018).

Estas innovaciones no solo aumentan la eficiencia, sino que también mejoran la durabilidad y la vida útil de los sistemas. Ndiaye et al. (2013) destacaron que los módulos fotovoltaicos pueden tener garantías de hasta 25 años. Sin embargo, las averías que causan la degradación del módulo a menudo no se consideran. La vida útil de los sistemas fotovoltaicos depende del rendimiento energético y de los diferentes modos de degradación, siendo la corrosión y la decoloración del encapsulante los principales problemas. La temperatura y la humedad también influyen en la degradación. Pero cabe señalar que los usuarios siempre tendrán en cuenta las cuestiones económicas.

Bandaru et al. (2021) y Shahee et al. (2024) indican que, a pesar de los avances tecnológicos, la adopción a gran escala de estos sistemas enfrenta desafíos económicos, estructurales, técnicos y socioculturales que requieren soluciones innovadoras. La colaboración entre investigadores y la industria será esencial para acelerar la transición de estos materiales desde el laboratorio hasta el mercado. Además, el uso de inteligencia artificial y técnicas de



aprendizaje automático puede facilitar la optimización en tiempo real de estos sistemas. Algoritmos avanzados pueden predecir patrones de consumo energético y ajustar el funcionamiento del sistema para maximizar la eficiencia y reducir costos operativos (Ganesan et al., 2024; Kenfack et al., 2024; Mateo Romero et al., 2022). También, la exploración de la economía circular puede promover una transición energética más sostenible (De Simone, 2024; Rabaia et al., 2024).

4. Conclusiones

La cienciometría revela un incremento en la producción científica sobre sistemas híbridos desde 2010, con un pico notable entre 2023 y 2024. Este aumento puede atribuirse a la creciente concienciación sobre el cambio climático y la necesidad de energías limpias. El mapa de colaboración internacional evidencia un fuerte grado de cooperación entre países como China, India e Irán. Estos países no solo lideran en términos de producción científica, sino que también muestran redes de colaboración densa, lo que subraya la importancia de las asociaciones globales en el avance de la tecnología solar. La creciente colaboración entre naciones y la formación de redes de investigación internacional favorecen el intercambio de conocimientos, lo que a su vez impulsa el desarrollo de innovaciones tecnológicas en el campo.

A pesar de los avances significativos, persisten desafíos económicos y técnicos que afectan su adopción a gran escala. La investigación muestra que la integración de tecnologías avanzadas, como los nanomateriales y los sistemas fotovoltaicos térmicos, ofrece mejoras en la eficiencia y la vida útil de los módulos, pero la implementación comercial sigue enfrentando barreras económicas y estructurales. La colaboración entre investigadores y la industria, junto con la adopción de inteligencia artificial para la optimización de sistemas y la economía circular, representa una oportunidad importante para superar estos desafíos.

Contribución de los autores

W. S. Almanza: Conceptualización, análisis formal, investigación, desarrollo metodológico, curación de datos, visualización, validación y redacción – revisión y edición del manuscrito.

Conflictos de interés

No existen conflictos de interés vinculados a esta investigación.

5. Referencias Bibliográficas

- Al-Waeli, A. H. A., Sopian, K., Kazem, H. A., y Chaichan, M. T. (2017). Photovoltaic/Thermal (PV/T) systems: Status and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 109–130. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.126>
- Aria, M., y Cuccurullo, C. (2017). bibliometrix : An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, 11(4), 959–975. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>
- Bandaru, S. H., Becerra, V., Khanna, S., Radulovic, J., Hutchinson, D., y Khusainov, R. (2021). A review of Photovoltaic Thermal (PVT) technology for residential applications:

- Performance indicators, progress, and opportunities. *Energies*, 14(13), 3853. <https://doi.org/10.3390/en14133853>
- Brabec, C. J. (2004). Organic photovoltaics: technology and market. *Solar Energy Materials and Solar Cells: An International Journal Devoted to Photovoltaic, Photothermal, and Photochemical Solar Energy Conversion*, 83(2–3), 273–292. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2004.02.030>
- Cho, K. T., Grancini, G., Lee, Y., Oveisi, E., Ryu, J., Almora, O., Tschumi, M., Schouwink, P. A., Seo, G., Heo, S., Park, J., Jang, J., Paek, S., Garcia-Belmonte, G., y Nazeeruddin, M. K. (2018). Selective growth of layered perovskites for stable and efficient photovoltaics. *Energy & Environmental Science*, 11(4), 952–959. <https://doi.org/10.1039/c7ee03513f>
- Chow, T. T., Pei, G., Fong, K. F., Lin, Z., Chan, A. L. S., y Ji, J. (2009). Energy and exergy analysis of photovoltaic–thermal collector with and without glass cover. *Applied Energy*, 86(3), 310–316. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.04.016>
- Correa-Baena, J.-P., Abate, A., Saliba, M., Tress, W., Jesper Jacobsson, T., Grätzel, M., y Hagfeldt, A. (2017). The rapid evolution of highly efficient perovskite solar cells. *Energy & Environmental Science*, 10(3), 710–727. <https://doi.org/10.1039/c6ee03397k>
- Cui, Y., Wang, Y., Bergqvist, J., Yao, H., Xu, Y., Gao, B., Yang, C., Zhang, S., Inganäs, O., Gao, F., y Hou, J. (2019). Wide-gap non-fullerene acceptor enabling high-performance organic photovoltaic cells for indoor applications. *Nature Energy*, 4(9), 768–775. <https://doi.org/10.1038/s41560-019-0448-5>
- D’Innocenzo, V., Grancini, G., Alcocer, M. J. P., Kandada, A. R. S., Stranks, S. D., Lee, M. M., Lanzani, G., Snaith, H. J., y Petrozza, A. (2014). Excitons versus free charges in organo-lead tri-halide perovskites. *Nature Communications*, 5(1). <https://doi.org/10.1038/ncomms4586>
- De Simone, M. (2024). PV and Thermal Solar Systems Application in Buildings. A State of Art in the Context of Circular Economy. En: Bragança, L., Cvetkovska, M., Askar, R., Ungureanu, V. (eds) *Creating a Roadmap Towards Circularity in the Built Environment*, 187–197. Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-45980-1_16
- Ganesan, K., Palanisamy, S., Krishnasamy, V., Salau, A. O., Rathinam, V., y Seenii Nayakkar, S. G. (2024). Hybrid photovoltaic/thermal performance prediction based on machine learning algorithms with hyper-parameter tuning. *International Journal of Sustainable Energy*, 43(1). <https://doi.org/10.1080/14786451.2024.2364226>
- Hasan, M. M., Hossain, S., Mofijur, M., Kabir, Z., Badruddin, I. A., Yunus Khan, T. M., y Jassim, E. (2023). Harnessing solar power: A review of photovoltaic innovations, solar thermal systems, and the dawn of energy storage solutions. *Energies*, 16(18), 6456. <https://doi.org/10.3390/en16186456>
- Herrando, M., Wang, K., Huang, G., Otanicar, T., Mousa, O. B., Agathokleous, R. A., Ding, Y., Kalogirou, S., Ekins-Daukes, N., Taylor, R. A., y Markides, C. N. (2023). A review of solar hybrid photovoltaic-thermal (PV-T) collectors and systems. *Progress in Energy and Combustion Science*, 97(101072), 101072. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2023.101072>



- Jeon, N. J., Noh, J. H., Yang, W. S., Kim, Y. C., Ryu, S., Seo, J., y Seok, S. I. (2015). Compositional engineering of perovskite materials for high-performance solar cells. *Nature*, 517(7535), 476–480. <https://doi.org/10.1038/nature14133>
- Joshi, A. S., Tiwari, A., Tiwari, G. N., Dincer, I., y Reddy, B. V. (2009). Performance evaluation of a hybrid photovoltaic thermal (PV/T) (glass-to-glass) system. *International Journal of Thermal Sciences*, 48(1), 154–164. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2008.05.001>
- Kalogirou, S. A., y Tripanagnostopoulos, Y. (2006). Hybrid PV/T solar systems for domestic hot water and electricity production. *Energy Conversion and Management*, 47(18–19), 3368–3382. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.01.012>
- Kazem, H. A., Al-Waeli, A. A., Chaichan, M. T., Sopian, K., Ahmed, A.-A., y Wan Nor Roslam, W. I. (2023). Enhancement of photovoltaic module performance using passive cooling (Fins): A comprehensive review. *Case Studies in Thermal Engineering*, 49(103316), 103316. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103316>
- Kazem, H. A., Chaichan, M. T., y Sopian, K. (2022). Design and experimental evaluation of a PV /T system cooled by advanced methods. *International Journal of Energy Research*, 46(7), 9684–9709. <https://doi.org/10.1002/er.7838>
- Kazemian, A., Khatibi, M., Entezari, S., Ma, T., & Yang, H. (2023). Efficient energy generation and thermal storage in a photovoltaic thermal system partially covered by solar cells and integrated with organic phase change materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 188(113705), 113705. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113705>
- Kenfack, A. Z., Nematchoua, M. K., Simo, E., Chara-Dackou, V. S., y Pemi, B. A. P. (2024). Performance improvement of hybrid photovoltaic/thermal systems: A metaheuristic artificial intelligence approach to select the best model using 10E analysis. *Solar Energy Advances*, 4(100061), 100061. <https://doi.org/10.1016/j.seja.2024.100061>
- Khanafer, K., y Vafai, K. (2018). A review on the applications of nanofluids in solar energy field. *Renewable Energy*, 123, 398–406. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.097>
- Lazaroiu, A. C., Gmal Osman, M., Strejoiu, C.-V., y Lazaroiu, G. (2023). A comprehensive overview of photovoltaic technologies and their efficiency for climate neutrality. *Sustainability*, 15(23), 16297. <https://doi.org/10.3390/su152316297>
- Lin, R., Xiao, K., Qin, Z., Han, Q., Zhang, C., Wei, M., Saidaminov, M. I., Gao, Y., Xu, J., Xiao, M., Li, A., Zhu, J., Sargent, E. H., y Tan, H. (2019). Monolithic all-perovskite tandem solar cells with 24.8% efficiency exploiting comproportionation to suppress Sn(ii) oxidation in precursor ink. *Nature Energy*, 4(10), 864–873. <https://doi.org/10.1038/s41560-019-0466-3>
- Madurai Elavarasan, R., Mudgal, V., Selvamanohar, L., Wang, K., Huang, G., Shafiullah, G. M., Markides, C. N., Reddy, K. S., y Nadarajah, M. (2022). Pathways toward high-efficiency solar photovoltaic thermal management for electrical, thermal and combined generation applications: A critical review. *Energy Conversion and Management*, 255(115278), 115278. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115278>
- Mateo Romero, H. F., González Rebollo, M. Á., Cardeñoso-Payo, V., Alonso Gómez, V., Redondo Plaza, A., Moyo, R. T., y Hernández-Callejo, L. (2022). Applications of artificial

- intelligence to photovoltaic systems: A review. *Applied Sciences* (Basel, Switzerland), 12(19), 10056. <https://doi.org/10.3390/app121910056>
- Meng, L., Zhang, Y., Wan, X., Li, C., Zhang, X., Wang, Y., Ke, X., Xiao, Z., Ding, L., Xia, R., Yip, H.-L., Cao, Y., y Chen, Y. (2018). Organic and solution-processed tandem solar cells with 17.3% efficiency. *Science* (New York, N.Y.), 361(6407), 1094–1098. <https://doi.org/10.1126/science.aat2612>
- Ndiaye, A., Charki, A., Kobi, A., Kébé, C. M. F., Ndiaye, P. A., y Sambou, V. (2013). Degradations of silicon photovoltaic modules: A literature review. *Solar Energy* (Phoenix, Ariz.), 96, 140–151. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.07.005>
- Oni, A. M., Mohsin, A. S. M., Rahman, M. M., y Hossain Bhuiyan, M. B. (2024). A comprehensive evaluation of solar cell technologies, associated loss mechanisms, and efficiency enhancement strategies for photovoltaic cells. *Energy Reports*, 11, 3345–3366. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.03.007>
- Pastuszak, J., y Węgierek, P. (2022). Photovoltaic cell generations and current research directions for their development. *Materials*, 15(16), 5542. <https://doi.org/10.3390/ma15165542>
- Praveen kumar, B., Prince Winston, D., Pounraj, P., Muthu Manokar, A., Sathyamurthy, R., y Kabeel, A. E. (2018). Experimental investigation on hybrid PV/T active solar still with effective heating and cover cooling method. *Desalination*, 435, 140–151. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.11.007>
- Rabaia, M. K. H., Shehata, N., Olabi, V., Abdelkareem, M. A., Semeraro, C., Chae, K.-J., y Sayed, E. T. (2024). Enabling the circular economy of solar PV through the 10Rs of sustainability: Critical review, conceptualization, barriers, and role in achieving SDGs. *Sustainable Horizons*, 11(100106), 100106. <https://doi.org/10.1016/j.horiz.2024.100106>
- Ramos, A., Chatzopoulou, M. A., Guarracino, I., Freeman, J., y Markides, C. N. (2017). Hybrid photovoltaic-thermal solar systems for combined heating, cooling and power provision in the urban environment. *Energy Conversion and Management*, 150, 838–850. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.03.024>
- Sandnes, B., y Rekstad, J. (2002). A photovoltaic/thermal (PV/T) collector with a polymer absorber plate. Experimental study and analytical model. *Solar Energy* (Phoenix, Ariz.), 72(1), 63–73. [https://doi.org/10.1016/s0038-092x\(01\)00091-3](https://doi.org/10.1016/s0038-092x(01)00091-3)
- Shah, N., Shah, A. A., Leung, P. K., Khan, S., Sun, K., Zhu, X., y Liao, Q. (2023). A review of third generation solar cells. *Processes* (Basel, Switzerland), 11(6), 1852. <https://doi.org/10.3390/pr11061852>
- Shahee, A., Abdoos, M., Aslani, A., y Zahedi, R. (2024). Reducing the energy consumption of buildings by implementing insulation scenarios and using renewable energies. *Energy Informatics*, 7(1). <https://doi.org/10.1186/s42162-024-00311-9>
- Shin, G., Jeon, J. G., Kim, J. H., Lee, J. H., Kim, H. J., Lee, J., Kang, K. M., y Kang, T. J. (2020). Thermocells for hybrid photovoltaic/thermal systems. *Molecules* (Basel, Switzerland), 25(8), 1928. <https://doi.org/10.3390/molecules25081928>



- Tawalare, P. K. (2021). Optimizing photovoltaic conversion of solar energy. *AIP Advances*, 11(10). <https://doi.org/10.1063/5.0064202>
- Taylor, R. A., Otanicar, T., & Rosengarten, G. (2012). Nanofluid-based optical filter optimization for PV/T systems. *Light, Science & Applications*, 1(10), e34–e34. <https://doi.org/10.1038/lsa.2012.34>
- Teo, H. G., Lee, P. S., & Hawlader, M. N. A. (2012). An active cooling system for photovoltaic modules. *Applied Energy*, 90(1), 309–315. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.01.017>
- Tiwari, A., & Sodha, M. S. (2006). Performance evaluation of solar PV/T system: An experimental validation. *Solar Energy (Phoenix, Ariz.)*, 80(7), 751–759. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.07.006>
- Tonui, J. K., & Tripanagnostopoulos, Y. (2007). Air-cooled PV/T solar collectors with low cost performance improvements. *Solar Energy (Phoenix, Ariz.)*, 81(4), 498–511. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.08.002>
- Tripanagnostopoulos, Y. (2007). Aspects and improvements of hybrid photovoltaic/thermal solar energy systems. *Solar Energy (Phoenix, Ariz.)*, 81(9), 1117–1131. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.04.002>
- Tripanagnostopoulos, Y., Nousia, T., Souliotis, M., & Yianoulis, P. (2002). Hybrid photovoltaic/thermal solar systems. *Solar Energy (Phoenix, Ariz.)*, 72(3), 217–234. [https://doi.org/10.1016/s0038-092x\(01\)00096-2](https://doi.org/10.1016/s0038-092x(01)00096-2)
- Tyagi, P. K., & Kumar, R. (2021). Emerging trends on the implementation of nanomaterials for improving the performance of photovoltaic thermal systems: Energetic, exergetic, environmental, and economic perspectives. *Energy Technology*, 9(12), 2100619. <https://doi.org/10.1002/ente.202100619>
- van Eck, N. J., & Waltman, L. (2010). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, 84(2), 523–538. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>
- Yazdanifard, F., & Ameri, M. (2018). Exergetic advancement of photovoltaic/thermal systems (PV/T): A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 97, 529–553. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.08.053>
- Zheng, Z., Wang, J., Bi, P., Ren, J., Wang, Y., Yang, Y., Liu, X., Zhang, S., & Hou, J. (2022). Tandem organic solar cell with 20.2% efficiency. *Joule*, 6(1), 171–184. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.12.017>