
CARACTERIZACIÓN, REGULACIÓN Y DISPOSICIÓN DE RESIDUOS PROVENIENTES DE LA ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN COLOMBIA

ROSA EUGENIA REYES GIL, ÁLVARO TURRIAGO HOYOS Y
LUIS ENRIQUE GALVÁN RICO

RESUMEN

La necesidad de utilizar fuentes de energía alternativas y avanzar en el proceso de transición energética en Colombia ha impulsado la adopción de sistemas fotovoltaicos como una opción para la generación de electricidad que es responsable con el medio ambiente y libre de emisiones de carbono. Sin embargo, los residuos generados por esta tecnología incluyen contaminantes como plomo, cadmio, estaño y silicio, que, sin procesos adecuados de recolección, transporte y disposición, pueden representar un riesgo significativo para el medio ambiente y la salud humana. A nivel global, se producen más de treinta mil toneladas de residuos de paneles solares al año, y se proyecta

que para 2035 esta cifra podría alcanzar un millón de toneladas anuales (Holger, 2022). Esta investigación documental tiene como objetivo analizar el impacto de estos desechos tecnológicos, considerando el marco regulatorio colombiano, las estrategias implementadas en otras sociedades para abordar esta problemática y las alternativas de solución propuestas en la literatura científica. Para ello, se emplea un enfoque cualitativo, descriptivo y documental, que permite identificar los componentes potencialmente peligrosos presentes en los paneles fotovoltaicos y evaluar el marco normativo colombiano, así como la postura del Estado frente a la transición energética.

Introducción

e acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2022), el año 2019 se ubicó como el segundo más cálido registrado en términos del aumento de la temperatura promedio global. Asimismo, los niveles de dióxido de

carbono (CO₂) y otros gases de efecto invernadero aumentaron significativamente, alcanzando niveles récord en ese mismo año. Como resultado, se observa un impacto global asociado al cambio climático. Por ejemplo, el período 2010-2019 fue identificado como la década más cálida registrada históricamente.

En cuanto a la economía colombiana, se ha observado una

recuperación significativa tras la crisis generada por la pandemia de COVID-19, destacándose frente a otros países latinoamericanos (PNUD-Colombia, 2021). En este contexto, la demanda de energía eléctrica ha mostrado una tendencia sostenida al alza, según los diferentes escenarios proyectados por la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) para el período 2022-2036 (UPME, 2022).

PALABRAS CLAVE / Colombia / Desechos Electrónicos / Economía Circular / Energías Renovables No Convencionales / Transición Energética /

Recibido: 28/11/2024. Modificado: 05/05/2025. Aceptado: 13/05/2025.

Rosa Eugenia Reyes Gil (Autora de correspondencia). Bióloga, con Maestría y Doctorado en Ciencias Biológicas, Universidad Simón Bolívar, Venezuela. Profesora Titular, Fundación Universitaria Los Libertadores, Bogotá, Colombia. Dirección: Carrera 16, No 63A-68, Bogotá D.C., Colombia. e-mail: rereyesg@libertadores.edu.co.

Álvaro Turriago Hoyos. Economista, Universidad del Rosario, Colombia. Maestría en Educación, Universidad de La Sabana, Colombia. Doctorado en Ciencias Económicas y Empresariales, Universidad de Navarra, España. Profesor Titular, Fundación Universitaria Los Libertadores, Bogotá, Colombia.

Luis Enrique Galván Rico. Economista, Universidad Cooperativa de Colombia, Colombia. Maestría en Gerencia de Empresas, Universidad José María Vargas, Venezuela. Doctorado en Desarrollo Económico, Universidad Federal de Paraná, Brasil. Profesor Jubilado, Universidad Simón Bolívar, Venezuela.

A nivel global, las estadísticas del Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA, 2020) revelan un crecimiento exponencial en la generación de energía solar, superando a otras fuentes de energía renovable. Esta tendencia destaca a la energía solar fotovoltaica como una fuente energética con ventajas económicas, ambientales y sociales, que contribuye a la reducción de emisiones contaminantes.

En este contexto, el Estado colombiano ha adoptado una estrategia para enfrentar el cambio climático a través de una agenda de transformación y transición energética que incorpora aspectos legales, tributarios, técnicos, ambientales y educativos. Una de las iniciativas en esta dirección es el uso de paneles fotovoltaicos como alternativa para la generación de energía limpia y eficiente.

Para 2021, con base en datos de UPME (2022), se alcanzó una capacidad instalada de 184 megavatios, lo que representó un incremento cercano al 114% en comparación con el año anterior. Se espera que para 2026, la capacidad fotovoltaica instalada en Colombia se multiplique por cinco, gracias a las adjudicaciones en subastas estatales, como las del cargo por confiabilidad y las de energías renovables a largo plazo, junto con los avances de proyectos privados ya planificados.

Este desarrollo ha impulsado la implementación de proyectos solares en techos y granjas en Colombia, lo que ha requerido la importación de una cantidad significativa de insumos para su instalación, incluyendo paneles solares, inversores, baterías para almacenamiento de energía, estructuras metálicas, reguladores de carga, cables eléctricos, interruptores y otros componentes. Sin embargo, esto plantea el desafío de gestionar adecuadamente estos materiales al final de su vida útil, para evitar una acumulación masiva de residuos electrónicos en el futuro.

Se estima que los paneles solares tienen una vida útil de entre 25 y 30 años (Jordan y Kurtz, 2012), lo que implica que los primeros sistemas instalados a nivel mundial están próximos a ser retirados, generando grandes volúmenes de desechos tecnológicos con posibles impactos negativos para el medio ambiente y la salud humana.

Ante esta situación, surge la necesidad de contar con un marco normativo claro y efectivo para el manejo, almacenamiento y disposición de estos residuos, que considere tanto las leyes como los decretos y resoluciones que regulan esta área en Colombia.

Por estas razones, resulta fundamental analizar las estrategias

disponibles para el reciclaje y la reutilización de paneles solares que serán reemplazados gradualmente, con el objetivo de garantizar que estos sistemas fotovoltaicos no se conviertan en una carga para las generaciones futuras. Es crucial investigar las posibles soluciones para el manejo de paneles solares en desuso, dado el crecimiento exponencial de esta tecnología.

Además, es recomendable informar a los usuarios y a las comunidades sobre los posibles riesgos para la salud asociados a los componentes de estos sistemas, incluyendo los niveles de concentración y las mejores prácticas para su disposición, para evitar que la falta de conocimiento o experiencia se traduzca en impactos negativos para la salud humana o los ecosistemas.

El presente trabajo tiene como objetivo establecer el estado del arte en cuanto al manejo y disposición de residuos de parques fotovoltaicos, considerando los componentes de riesgo presentes en las células fotovoltaicas, el marco regulatorio colombiano para desechos electrónicos y los impactos socioambientales de estos residuos, con el fin de identificar las estrategias más efectivas para la disposición segura de estos materiales peligrosos.

Metodología

La presente investigación es de tipo mixto, con un enfoque interpretativo, diseño documental y alcance descriptivo. Se considera descriptiva porque caracteriza la situación actual del manejo y disposición de los residuos de parques fotovoltaicos en Colombia. El diseño es documental, dado que se fundamenta principalmente en información publicada en diversas fuentes académicas (Arias, 2012; Hernández-Sampieri *et al.*, 2014).

Para definir las categorías de análisis que permitieron alcanzar los objetivos planteados, se realizó la identificación y análisis de artículos científicos, capítulos de libros, documentos legales, trabajos de grado y artículos periodísticos, entre otros (Gómez *et al.*, 2015). Estos documentos se recuperaron de bases de datos como Scielo, *Web of Science*, Redalyc y Google Académico.

El instrumento para la recolección de información consistió en una matriz bibliográfica diseñada en Excel, donde se registraron todos los textos recuperados, permitiendo identificar las categorías de análisis y vincular la información correspondiente a cada una de ellas.

A partir de este análisis, se establecieron las siguientes categorías de análisis: (1) Transición energética hacia fuentes de energía no contaminantes, (2)

Energía solar fotovoltaica, (3) Residuos generados por el uso de paneles solares, y (4) Desafíos en la gestión de residuos fotovoltaicos en Colombia.

Resultados

La transición energética hacia fuentes de energías no contaminantes

Para garantizar el funcionamiento de las sociedades modernas es necesario el uso de energía. Con el crecimiento poblacional, la demanda de energía también ha crecido considerablemente. Históricamente, el carbón fue la principal fuente de energía, seguido por el petróleo, que se consolidó como el principal combustible para el desarrollo de las naciones. Ambos recursos se clasifican como no renovables debido a que sus reservas son limitadas y pueden agotarse.

La extracción de petróleo y carbón implica procesos con un alto impacto ambiental y riesgos para la salud humana, incluyendo la contaminación de recursos hídricos, degradación del suelo y la emisión de gases de efecto invernadero, que contribuyen al cambio climático (Reyes *et al.*, 2005; Galván y Reyes, 2007). Frente a esta realidad, la dinámica energética actual apunta hacia un futuro basado en energías renovables, que presentan un menor impacto ambiental.

Según la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE, 2020), el sector transporte es el principal consumidor de energía en América Latina, con un 52% del consumo total, seguido por el sector industrial (18%), el sector residencial (13%), comercio y servicios (12%), agricultura, pesca y minería (3%), y construcción (2%). En esta región, la matriz energética se compone principalmente de combustibles fósiles, con un 30% de carbón y un 40% de gas natural y petróleo, utilizados principalmente para la producción de gasolina y otros combustibles líquidos. Por otro lado, las fuentes no fósiles incluyen la hidroenergía (16%), energía solar y eólica (6%), y geotermia y energía nuclear (2%), mientras que el 8% restante proviene de fuentes como carbón vegetal, bagazo y leña (OLADE, 2020).

La Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA, 2020) señala que el 75% de la electricidad en América Latina se produce a partir de fuentes renovables, principalmente hidroelectricidad, que representa aproximadamente el 70% del total. Según la CEPAL (2022), América Latina y el Caribe contribuyen con el 10% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI), de las cuales el 46%

proviene de la producción, transformación, distribución y consumo de energía en sectores clave de la economía regional.

La transición energética hacia una matriz más limpia incluye el desarrollo de fuentes renovables, que son inagotables y no generan gases de efecto invernadero, diferenciándose de los combustibles fósiles por su diversidad, abundancia y menor impacto ambiental (Pérez *et al.*, 2021). De acuerdo con Reyes *et al.* (2023a), se espera que la participación de las energías renovables en el suministro eléctrico global aumente del 26% en 2018 al 44% en 2040, impulsada principalmente por las tecnologías eólica y fotovoltaica. Esto refleja un interés creciente a nivel global en la adopción de energías limpias.

En Colombia, la necesidad de diversificar la matriz energética se fundamenta en la limitada disponibilidad de reservas probadas de hidrocarburos, estimadas en solo 6,3 años, según el Balance de Reservas de Petróleo y Gas Natural emitido por la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) con corte al 31 de diciembre de 2019 (Agencia Nacional de Hidrocarburos, 2020), y en los compromisos internacionales adquiridos, como el Acuerdo de París y la Agenda 2030.

La capacidad instalada de energía solar fotovoltaica en Colombia ha crecido rápidamente en la última década. Según la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), esta capacidad superó los 2,5GW a finales de 2023, reflejando un aumento significativo en comparación con años anteriores. Esto implica un incremento en el uso de paneles solares, lo que eventualmente resultará en un mayor volumen de residuos fotovoltaicos.

En respuesta a esta realidad, el Estado colombiano ha implementado políticas públicas para fomentar la transición hacia energías renovables no convencionales (Reyes *et al.*, 2023b). Aunque Colombia no ha definido una tecnología específica para energías renovables, la Ley No. 1715 del 13 de mayo de 2014 establece un marco general para su promoción. Esta legislación fue actualizada por la Ley 2099 del 10 de julio de 2021, que modernizó el marco regulatorio para la generación de energía renovable.

La Ley 2099 regula tres aspectos fundamentales: (1) declara de utilidad pública y de interés social las actividades de promoción y desarrollo de fuentes no convencionales de energía; (2) crea el Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía (FENOGE), que financia proyectos en este campo; y (3) establece incentivos fiscales para quienes inviertan en proyectos de fuentes no convencionales de

energía, incluyendo deducciones del impuesto de renta, exención del IVA en bienes y servicios asociados y exclusión del pago de derechos arancelarios para maquinaria y equipos importados (Ley No. 2099, 2021).

Energía solar fotovoltaica

El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) de Colombia define la energía solar fotovoltaica como “la energía producida por reacciones nucleares en el interior del Sol, que se transmite en forma de ondas electromagnéticas a través del espacio” (2023, párr. 1). Por esta razón, se considera una fuente de energía renovable e inagotable. A partir de esta fuente primaria, se han desarrollado sistemas que emplean células fotovoltaicas, diseñadas para convertir la energía solar en electricidad mediante generadores formados por paneles interconectados, capaces de transformar la energía captada en corriente alterna o directa. Esto convierte a la energía solar en una opción limpia y libre de emisiones, que contribuye de manera significativa a la protección del medio ambiente.

Los sistemas de energía fotovoltaica están formados por células que absorben la luz solar y la convierten en electricidad, aprovechando las propiedades de los materiales semiconductores que las componen. Los paneles solares, que funcionan como captadores de energía solar, están compuestos por celdas capaces de transformar fotones en electrones. La luz solar que incide sobre estas celdas separa los electrones, creando una diferencia de polaridad que genera un flujo eléctrico. El número de celdas en cada panel determina la cantidad de energía que se puede generar (Rodríguez, 2018).

Entre los materiales utilizados para fabricar estas células destacan el arseniuro de galio (GaAs) y el silicio (Si). Estos son dispositivos electrónicos que transforman la energía luminosa (fotones) en energía eléctrica (electrones) a través del efecto fotoeléctrico. La eficiencia de estos sistemas puede verse afectada por diversos factores, como la estructura del panel, la reflexión de la luz, la acumulación de suciedad y las variaciones de temperatura, que influyen directamente en su rendimiento y potencia de salida (Shahrestani *et al.*, 2017).

Residuos derivados del uso de los paneles solares

Los residuos generados al final de la vida útil de los paneles solares provienen principalmente de sus

componentes. En promedio, un panel solar está compuesto por un 80% de vidrio, un 10-15% de aluminio, un 5% de silicio y un 5% de otros metales (Jordan y Kurtz, 2012). Los estudios más recientes indican que la mayoría de los paneles solares instalados en la actualidad son de silicio cristalino o de películas delgadas. Aunque gran parte de los materiales, como el vidrio y el aluminio, son reciclables, otros componentes, como los metales pesados, tienen tasas de recuperación significativamente más bajas.

El alto costo y la complejidad del reciclaje de estos materiales hacen que en muchos casos sea más económico desecharlos, lo que genera un problema significativo de contaminación ambiental (International Renewable Energy Agency, 2019). Entre los residuos de bajo aprovechamiento se encuentran la sílice, el plomo y el cadmio, que presentan altos niveles de toxicidad y pueden contaminar fuentes hídricas, suelos y ecosistemas, con impactos negativos para la biodiversidad y la salud humana (Berrio y Zuluaga, 2014).

Según datos de la *Renewable Energy Magazine* (2022), aunque actualmente los niveles de desechos de paneles solares son bajos debido a que muchas instalaciones son recientes, se espera que esta cantidad aumente considerablemente en las próximas décadas, creando desafíos significativos para la gestión de residuos y la protección del medio ambiente.

El 95% de los materiales que componen las celdas fotovoltaicas puede ser reciclado. Entre estos materiales se incluyen el aluminio, el vidrio, la plata y el cobre, entre otros componentes, lo que resulta superior a la capacidad de reciclaje de otros sistemas energéticos, como los derivados de la energía eólica. Sin embargo, que estos materiales sean reciclables no implica que el proceso sea simple, económico o eficiente.

En este sentido, la *Environmental Protection Agency* (2019) indica que el reciclaje de paneles solares representa uno de los mayores desafíos tecnológicos actuales, ya que implica procesos complejos, como la deslaminación, separación del silicio y purificación de materiales, que requieren tecnologías avanzadas y altos costos operativos.

De acuerdo con datos de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA, 2020), se calcula que para 2050 habrá aproximadamente 78 millones de toneladas de paneles solares en desuso a nivel global. Para minimizar el impacto ambiental de esta tecnología, se deben reciclar los paneles fotovoltaicos, los cuales tienen una vida útil de aproximadamente 30 años, aunque su eficiencia

se reduce entre un 6% y un 8% después de 25 años.

Varias fuentes bibliográficas europeas (Unión Europea, 2018) reportan que de cada tonelada de paneles fotovoltaicos, con un peso medio de 35kg por unidad, es posible recuperar: 750kg de vidrio y materiales afines al silicio; 120kg de metales (principalmente aluminio de los marcos y, en menor proporción, cobre del cableado y hierro); 20kg de plástico.

Como se ha indicado, el reciclaje de paneles solares es fundamental para la sostenibilidad y la economía circular. A continuación, se presentan algunas estrategias y herramientas que pueden facilitar este proceso.

Normativa y responsabilidad

En Colombia, la gestión de residuos fotovoltaicos está regulada a través de la Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE), formulada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en 2017. Esta normativa se complementa con la Resolución 0851 de 2022, que se aplica a productores, comercializadores, usuarios, consumidores y gestores de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE).

Proceso de reciclaje

El proceso de reciclaje de paneles solares (Masson *et al.*, 2019; Bernal *et al.*, 2022), puede variar dependiendo de la tecnología utilizada en su fabricación, las instalaciones de reciclaje disponibles y el grado de innovación tecnológica existente. Sin embargo, en términos generales, el proceso suele seguir las siguientes etapas:

- **Recepción y clasificación:** Los paneles solares se reciben en el centro de reciclaje, donde se verifica su estado y se clasifican según el tipo de tecnología y los materiales que los componen.
- **Desmontaje:** Esta es una de las partes más importantes del proceso. Se separan las partes principales, como el vidrio, las células fotovoltaicas y el marco de aluminio, que es 100 % reciclable. Este proceso puede realizarse manualmente o con maquinaria especializada, dependiendo de la escala y los recursos disponibles.
- **Separación de materiales:** Esta etapa incluye el reciclado térmico, en el que, una vez retirados el aluminio y el vidrio, el panel pasa por un tratamiento térmico a más de 500°C para eliminar los plásticos adheridos. Luego, se aplican procesos

químicos conocidos como delaminación para remover la capa de polímero y separar los contactos metálicos. Finalmente, se procesan las obleas de silicio, un material reutilizable en más de un 80%, antes de ser fundidas en placas reutilizables.

- **Reciclaje:** Los materiales recuperados se someten a procesos específicos para purificarlos y prepararlos para su reutilización o reciclaje final. Por ejemplo, el silicio puede ser refinado para su uso en la fabricación de nuevos paneles solares, al igual que el vidrio y el aluminio.

Centros especializados

El reciclaje de paneles fotovoltaicos debe incluir la participación de centros especializados que son, además, oportunidades de negocio muy atractivos. Las placas solares deben trasladarse hasta un punto limpio o centro homologado para su recogida y tratamiento (De Oliveira *et al.*, 2020).

Desafíos en la Gestión de Residuos Fotovoltaicos en Colombia

Colombia enfrenta varios desafíos en cuanto a la gestión de residuos fotovoltaicos (Bernal *et al.*, 2022):

- **Normativa y regulaciones:** Aunque existen normativas para la gestión de residuos en general, aún no se dispone de un marco regulatorio específico y detallado para los residuos fotovoltaicos. En comparación, regiones como Europa y Japón han desarrollado normativas más avanzadas para este tipo de residuos, lo que pone a Colombia en una etapa inicial en este aspecto.
- **Infraestructura para el reciclaje:** La infraestructura para el reciclaje de paneles solares en Colombia es limitada. Aunque globalmente muchos paneles solares pueden ser reciclados, recuperando materiales valiosos como silicio, aluminio y vidrio, la capacidad para hacerlo no está igualmente distribuida en todos los países. En Colombia, esta práctica aún no está generalizada y requiere una mayor inversión en tecnología y capacidad instalada.
- **Educación para la sostenibilidad:** La conciencia sobre los residuos fotovoltaicos en los sectores público y privado aún está en desarrollo. A medida que el sector fotovoltaico crece, será esencial que productores, consumidores y autoridades estén mejor informados sobre las mejores prácticas para la gestión y reciclaje de estos residuos.

Economía Circular y Paneles Solares

A medida que la industria fotovoltaica se expande, se espera que surjan nuevas iniciativas vinculadas a la economía circular, cuyo objetivo es minimizar el impacto ambiental de los paneles solares mediante su reutilización y reciclaje. El reciclaje de paneles solares no solo contribuye a la sostenibilidad, sino que también genera oportunidades económicas para los países (De Oliveira *et al.*, 2020).

La economía circular busca diseñar productos y sistemas que permitan mantener los recursos en uso durante el mayor tiempo posible, minimizando la generación de residuos (Kirchherr *et al.*, 2017; De Miguel *et al.*, 2021). En el caso de los paneles solares, esto incluye principios como el Ecodiseño y la reutilización de materiales.

- **Ecodiseño:** Este enfoque busca desarrollar paneles que sean más fáciles de desarmar y reciclar, permitiendo un mayor aprovechamiento de los materiales al final de su vida útil. Esto incluye diseños modulares que facilitan el desmontaje y la recuperación de componentes.

- **Reciclaje y reutilización de materiales:** Este principio se enfoca en la recuperación de componentes valiosos como silicio, metales y vidrio, lo que reduce la necesidad de extraer nuevos recursos y disminuye la demanda de materias primas vírgenes (Gallagher *et al.*, 2019).

Beneficios de la economía circular en la energía solar

La recuperación de materiales provenientes de paneles solares al final de su vida útil contribuye a reducir la dependencia de materias primas, disminuyendo así la necesidad de extraer nuevos recursos y reduciendo el impacto ambiental. Además, el desarrollo de cadenas de reciclaje para estos sistemas puede promover la creación de empleo y el surgimiento de nuevas industrias, fomentando la innovación en el manejo de residuos y en la fabricación de productos sostenibles. Por otra parte, un manejo adecuado de estos residuos permite minimizar el riesgo de que materiales potencialmente dañinos terminen en vertederos o se dispersen en el medio ambiente, lo que contribuye a una gestión más segura y sostenible de los desechos fotovoltaicos (Sen, 2021; Nunes *et al.*, 2023).

Entre los principales desafíos para la implementación de la economía circular en los parques fotovoltaicos (Bernal *et al.*, 2022), se destacan la limitada infraestructura de reciclaje, los

altos costos asociados al proceso y la necesidad de avances tecnológicos. Actualmente, la infraestructura especializada para el reciclaje de paneles solares es insuficiente en muchas regiones, debido principalmente a la falta de inversión en tecnologías avanzadas y a la escasez de instalaciones adecuadas, lo que limita la capacidad de reciclaje a medida que aumenta la cantidad de residuos fotovoltaicos proyectada para los próximos años (Energías renovables, 2024). Además, los costos de reciclaje pueden ser elevados, considerando la necesidad de equipos especializados, mano de obra calificada y el cumplimiento de normativas, factores que frecuentemente superan el valor de los materiales recuperados, haciendo que el reciclaje sea menos competitivo frente a la producción de materiales nuevos. Sin embargo, mejoras en la eficiencia energética y en la logística podrían contribuir a reducir estos gastos (Business Plans, 2025). Finalmente, el desarrollo tecnológico es esencial para hacer el reciclaje más económico y efectivo, con innovaciones como la inteligencia artificial, la automatización y el Internet de las Cosas, que están revolucionando el campo del reciclaje, mejorando la separación y clasificación de residuos y optimizando la gestión de recursos, lo que no solo incrementa las tasas de reciclaje, sino que también reduce los costos operativos y el impacto ambiental (Ambientum, 2024).

Conclusiones

Existe una percepción generalizada de que la energía solar es limpia y amigable con el medio ambiente y que no produce sustancias contaminantes. Sin embargo, esto no es completamente preciso, ya que durante el proceso de fabricación y en la disposición final de los componentes que conforman las células y los paneles fotovoltaicos se generan diversos contaminantes y emisiones que pueden ser perjudiciales para la salud humana y el medio ambiente. Por lo tanto, es necesario evaluar los beneficios de la energía solar fotovoltaica en comparación con los combustibles fósiles y proponer estrategias viables para el manejo adecuado de los residuos generados al final de los proyectos fotovoltaicos.

En este sentido, resulta fundamental que el enfoque se oriente hacia el manejo integral de los residuos, incluyendo su tratamiento, almacenamiento y disposición final, para minimizar el impacto ambiental. La literatura consultada, así como las normativas nacionales e internacionales, apoyan el desarrollo de la

industria de generación eléctrica mediante paneles fotovoltaicos hacia procesos más sostenibles, promoviendo la mejora en la eficiencia de los procesos industriales y evaluando la posibilidad de utilizar nuevos métodos y materias primas.

Considerando el incremento en el uso de paneles fotovoltaicos y las proyecciones de consumo creciente a corto y mediano plazo, es esencial que Colombia defina estrategias para el manejo de los residuos generados al final de su vida útil. Es importante tener en cuenta que no todos los componentes de los paneles fotovoltaicos son reciclables y que algunos presentan riesgos significativos para el medio ambiente y la salud humana.

De acuerdo con las referencias disponibles, los paneles utilizados en Colombia son principalmente de silicio policristalino y contienen materiales como plomo, plata, silicio, cadmio y estaño, los cuales pueden ser altamente contaminantes para los ecosistemas y perjudiciales para la salud humana. Aunque se han realizado esfuerzos para maximizar el reciclaje de estos componentes, una proporción de los residuos generados en los semiconductores y las células fotovoltaicas no es recuperable, lo que podría causar impactos negativos en el suelo y los cuerpos de agua.

La generación de energía eléctrica a partir de paneles fotovoltaicos representa una alternativa viable para reducir la huella de carbono y preservar los ecosistemas. Sin embargo, el manejo adecuado de los residuos generados por esta tecnología requiere un enfoque interdisciplinario en el que las autoridades regulen y la comunidad académica investigue las mejores prácticas para mejorar los procesos tecnológicos. Esto permitiría que productores, fabricantes y distribuidores, junto con consumidores informados, asuman el compromiso de una transición energética que no solo busque beneficios económicos, sino que también promueva un ambiente libre de contaminación para las generaciones futuras.

AGRADECIMIENTO

Este artículo es resultado de la investigación EAC-14-24 adscrita al Grupo de Reflexión Económica, Administrativa y Contable (REAC) de la Facultad de Ciencias Económicas, Administrativas y Contables y la Dirección de Investigaciones, Fundación Universitaria Los Libertadores, Bogotá, Colombia. Los autores agradecen el apoyo logístico y financiero aportado por esta institución.

REFERENCIAS

- Agencia Internacional de Energías Renovables-IRENA (2020). *Estadísticas de capacidad renovable*. <https://irena.org/publications/2020/Mar/Renewable-Capacity-Statistics-2020-ES>.
- Ambientum (11 marzo 2024). *Sostenibilidad y Tecnología: Avances Tecnológicos que Impulsan el Reciclaje Efectivo*. <http://www.ambientum.com/ambientum/sostenibilidad/sostenibilidad-y-tecnologia-avances-tecnologicos-que-impulsan-el-reciclaje-efectivo.asp>. (Cons. 11/03/2024).
- Arias F (2012) *El Proyecto de Investigación. Introducción a la Metodología Científica*. Editorial Episteme CA Caracas, Venezuela. 146 pp.
- Bernal Aparicio WH, Martínez Cañón LE, Valencia Zuluaga M (2022) *Guía para la disposición de paneles solares al final de su ciclo de vida en Colombia*. Trabajo de grado. Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia. 52 pp. <https://hdl.handle.net/20.500.11839/8894>.
- Berrio L, Zuluaga C (2014) Smart Grid y la energía solar fotovoltaica para la generación distribuida: Una revisión en el contexto energético mundial. *Ingeniería y Desarrollo* 32: 369-396.
- Business Plans (2025) *¿Cuáles son los 9 costos operativos de un negocio de reciclaje de panel solar?* <http://www.businessplan-templates.com/es/blogs/running-costs/solar-panel-recycling>. (Cons. 04/04/2025).
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe-CEPAL (2021) *La prolongación de la crisis sanitaria y su impacto en la salud, la economía y el desarrollo social*. 39 pp. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/47301/1/S2100594_es.pdf.
- Congreso de la República de Colombia (13 Mayo 2014). Ley No 1715. *Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema eléctrico nacional*. <https://www.funcionpublica.gov.co>.
- Congreso de la República de Colombia (10 Julio 2021). Ley No 2099. *Por medio de la cual se dictan disposiciones para la transición energética*. <https://www.funcionpublica.gov.co>.
- De Miguel C, Martínez K, Pereira M, Kohout M (2021) *Economía circular en América Latina y el Caribe: oportunidad para una recuperación transformadora*. Documentos de Proyectos (LC/TS.2021/120), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- De Oliveira Azevêdo R, Rotela Junior P, Rocha LCS, Chicco G, Aquila G, Peruchi RS (2020) Identification and Analysis of Impact Factors on the Economic Feasibility of Photovoltaic Energy Investments. *Sustainability* 12: 7173.
- Energías Renovables (17 abril 2024) *La chatarra fotovoltaica crecerá en más de un 3.000% de aquí a 2030*. <http://www.energias-renovables.com/fotovoltaica/la-chatarra-fotovoltaica-crecera-en-mas-de-20240417>.
- Gallagher J, Basu B, Browne M, Kenna A, McCormack S, Pilla F, Styles, D (2019). Adapting Stand-Alone Renewable Energy Technologies for the Circular Economy through Eco-Design and Recycling. *Journal of Industrial Ecology* 23: 133-140.
- Galván L, Reyes Gil R (2007) Los macroprocesos de la industria petrolera y sus consecuencias

- ambientales. *Universidad, Ciencia y Tecnología (UCT)* 11: 91-97. http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-48212007000200006.
- Gómez M, Galeano C, Jaramillo D (2015) El estado del arte: Una metodología de investigación. *Revista Colombiana de Ciencias Sociales* 6: 423-442.
- Hernández R, Fernández C, Baptista P (2014) *Metodología de la investigación*. 6ta. edición. McGraw-Hill/Interamericana Editores, SA de CV. DF, México. 600 pp.
- Holger D (2022) The solar boom will create millions of tons of junk panels. *The Wall Street Journal*.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) (2023) *Ideam.gov.co*. <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/caracteristicas-de-la-radiacionsolar#:~:text=La%20radiaci%C3%B3n%20solar%20es%20la,emitida%20por%20la%20superficie%20solar>.
- International Renewable Energy Agency (28 de abril del 2019) *International Renewable Energy Agency*. <https://www.irena.org/solar>.
- Jordan D, Kurtz S (2012) *Photovoltaic Degradation Rates-An Analytical Review*. Journal Article NREL/JA-5200-51664. National Renewable Energy Laboratory-NREL. U.S. Department of Energy. <https://www.nrel.gov/docs/fy12osti/51664.pdf>.
- Kirchherr J, Reike D, Hekkert M (2017) Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling* 127: 221-232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>.
- Masson G, Orlandi S, Reinger M (2019) Global market outlook for photovoltaics 2014-2018. *Energía y Sociedad* 71. http://www.epia.org/fileadmin/user_upload/Publications/EPIA_Global_Market_Outlook_for_Photovoltaics_2014-2018_Medium_Res.pdf.
- Nunes AM, Coelho Junior LM, Abrahão R, Santos Júnior EP, Simioni FJ, Rotella Junior P, Rocha L (2023) Public Policies for Renewable Energy: A Review of the Perspectives for a Circular Economy. *Energies* 16: 485. <https://doi.org/10.3390/en16010485>.
- Organización de las Naciones Unidas (ONU) (2022) *Objetivos de desarrollo sostenible: Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático*. ONU. Ginebra, Suiza.
- Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) (2020) *Panorama energético de América Latina y el Caribe*. 353 pp. <http://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/ol-d0456b.pdf>.
- Pérez M, Yépez A, Tolmasquim M, Alatorre C, Rasteletti A, Stampini M, Hallack M (2021) *El papel de la transición energética en la recuperación sostenible de América Latina y el Caribe*. Banco Interamericano de Desarrollo. 50 pp. <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/El-papel-de-la-transicion-energetica-en-la-recuperacion-sostenible-de-America-Latina-y-el-Caribe.pdf>.
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo-Colombia (2021) *Un año de pandemia: impacto socioeconómico de la COVID-19 en Colombia*. <https://www.co.undp.org/content/colombia/es/home/-sabias-que/un-ano-de-pandemia-impacto-socioeconomico-de-la-covid-19-en-col.html>.
- Renewable Energy Magazine (2022) *Renewable Energy Magazine*. https://www.renewableenergymagazine.com/pv_solar.
- Reyes R, Galván L, Aguiar M (2005) El precio de la contaminación como herramienta económica e instrumento de política ambiental. *Interciencia* 30: 436-441. http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442005000700010.
- Reyes RE, Turriago A, Mercado A (2023a) Las Energías Renovables no convencionales en Colombia. Hacia una matriz energética más limpia. *Revista de Divulgación Científica, Tecnológica y Cultural* 4: 26-30. <https://repository.libertadores.edu.co/handle/11371/6059>.
- Reyes RE, Turriago A, Cárdenas M, Danna JP (2023b) Análisis de Políticas Públicas para la adopción de Energías Renovables no Convencionales en Colombia. *Cuadernos Latinoamericanos de Administración* 19(36). <https://doi.org/10.18270/cuaderlam.v19i36.4052>.
- Rodríguez S (2018) *Plan de manejo para disposición final de paneles solares de Energía Integral Andina SA*. Tesis de grado. Universidad del Bosque. Bogotá Colombia. 58 pp. <https://repositorio.unbosque.edu.co/server/api/core/bitstreams/b03f2e88-e0e7-47bc-b07a-99e88793881a/content>.
- Sen A (2021) *Incentivizing Decarbonization through the Circular Economy*. Oxford Institute for Energy Studies. JSTOR 4-8. <https://www.jstor.org/stable/resrep30965.6>.
- Shahrestani M, Yao R, Essah E, Shao L, Oliveira A, Hepbasli A, Biyik E, del Caño T, Rico E, Lechón J (2017) Experimental and numerical studies to assess the energy performance of naturally ventilated PV façade systems. *Solar Energy* 147: 37-51. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.02.034>.
- Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) (2022) *UPME.gov.co*. https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/Presentacion_Proyeccion_demanda_energeticos_2022.pdf.
- Unión Europea (9 de abril del 2018) Commission notice on technical guidance on the classification of waste. EUR-Lex. *Official Journal of the European Union* C124/01. [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52018XC0409\(01\)&from=EN](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52018XC0409(01)&from=EN).

CHARACTERIZATION, REGULATION AND DISPOSAL OF WASTE FROM PHOTOVOLTAIC ENERGY IN COLOMBIA

Rosa Eugenia Reyes Gil, Álvaro Turriago Hoyos and Luis Enrique Galván Rico

SUMMARY

The need to adopt alternative energy sources and advance the energy transition process in Colombia has driven the adoption of photovoltaic systems as an environmentally responsible and carbon-free option for electricity generation. However, the waste generated by this technology includes contaminants such as lead, cadmium, tin, and silicon, which, without proper collection, transportation, and disposal processes, can pose significant risks to both the environment and human health. Globally, more than thirty thousand tons of solar panel waste are produced annually, and this figure is projected to reach one

million tons per year by 2035 (Holger, 2022). This documentary research aims to analyze the impact of this technological waste by examining the Colombian regulatory framework, the approaches taken by other societies to address this issue, and the proposed solutions in the scientific literature. To achieve this, a qualitative, descriptive, and documentary research approach is applied, allowing the identification of potentially hazardous components present in photovoltaic panels and the evaluation of the Colombian regulatory framework, as well as the state's position on the energy transition.

RESUMO

A necessidade de adotar fontes de energia alternativas e avançar no processo de transição energética na Colômbia impulsionou a adoção de sistemas fotovoltaicos como uma opção responsável e livre de carbono para a geração de eletricidade. No entanto, os resíduos gerados por essa tecnologia incluem contaminantes como chumbo, cádmio, estanho e silício, que, sem processos adequados de coleta, transporte e disposição, podem representar riscos significativos ao meio ambiente e à saúde humana. Globalmente, são produzidas mais de trinta mil toneladas de resíduos de painéis solares por ano, e estima-se que esse

número possa atingir um milhão de toneladas anuais até 2035 (Holger, 2022). Esta pesquisa documental tem como objetivo analisar o impacto desses resíduos tecnológicos, examinando o marco regulatório colombiano, as abordagens adotadas por outras sociedades para enfrentar essa questão e as soluções propostas na literatura científica. Para isso, aplica-se uma abordagem de pesquisa qualitativa, descritiva e documental, permitindo identificar os componentes potencialmente perigosos presentes nos painéis fotovoltaicos e avaliar o marco regulatório colombiano, bem como a posição do Estado em relação à transição energética.