

ECONOMÍA CIRCULAR EN LA INDUSTRIA SOLAR FOTOVOLTAICA, UN CAMINO HACIA LA SUSTENTABILIDAD

CIRCULAR ECONOMY IN THE PHOTOVOLTAIC INDUSTRY ON THE WAY TO SUSTAINABILITY

Ana Ximena Aguirre Osorio¹,
Alberto Coronado Mendoza¹,
Belkis Sulbarán-Rangel¹,
Alejandro Martín Solís Tenorio² y
Víctor Hugo Romero Arellano¹

1 Departamento de Estudios del Agua y la Energía. Centro Universitario de Tonalá. **Universidad de Guadalajara**

2 Centro de Sustentabilidad y Energía Renovable. **Universidad Autónoma de Guadalajara**

Palabras clave:

Economía circular, industria fotovoltaica, transición energética, gestión de residuos electrónicos

DOI: [10.59730/rer.v12n57a2](https://doi.org/10.59730/rer.v12n57a2)

RESUMEN

La expansión de la industria fotovoltaica a nivel mundial ha generado nuevas consideraciones en torno al manejo de residuos, especialmente ante la proyección de que entre 2030 y 2035, una gran cantidad de módulos solares alcanzarán el final de su vida útil. La generación esperada de residuos plantea desafíos técnicos, normativos y logísticos. La economía circular se plantea como un enfoque que reorganiza el uso de materiales mediante estrategias como la reutilización, el reciclaje, el ecodiseño y la sustitución de materias primas.

El análisis de ciclo de vida se ha empleado para evaluar la cadena de suministro fotovoltaica y comparar su impacto ambiental con otras tecnologías de generación eléctrica. A partir de este enfoque, se han propuesto herramientas complementarias como las 9Rs y la modificación de hábitos de consumo, con el objetivo de mantener los materiales en uso el mayor tiempo posible. La estructura típica de los paneles solares permite recuperar entre el 80 % y el 95 % de su masa mediante procesos actuales de reciclaje.

Actualmente, existen limitaciones en términos de diseño, incentivos económicos y legislación, donde la mayoría de los países no cuenta con marcos regulatorios específicos para el tratamiento de módulos fotovoltaicos desechados. En este sentido, la economía circular se articula con la industria solar a través del rediseño de productos, la estandarización de componentes, y el desarrollo de modelos de negocio orientados a la recuperación de materiales. Su implementación implica la intervención de múltiples actores de la cadena de valor, desde fabricantes hasta consumidores.

INTRODUCCIÓN

Las perspectivas sugieren que el mercado mundial de la energía solar fotovoltaica seguirá creciendo en los próximos años, impulsado por el papel clave que esta tecnología desempeña en la lucha contra el cambio climático. Si bien la generación de energía fotovoltaica no genera emisiones durante su operación, conforme la industria fotovoltaica crece y se expande globalmente, surge la problemática de lo que sucederá con los módulos fotovoltaicos 25 años después de su instalación. Se prevé que entre 2030 y 2035 gran parte de los paneles deberán ser renovados, lo que generará un aumento abrupto de residuos.

Gran parte de los componentes de los módulos fotovoltaicos se pueden reciclar. Por ejemplo, la mayor parte del panel está compuesta de vidrio (aproximadamente el 70% del peso total), el cual puede reutilizarse en nuevos paneles u otras aplicaciones en la construcción. El silicio de las celdas fotovoltaicas puede purificarse para fabricar nuevos módulos solares o dispositivos electrónicos. Los metales como el aluminio del marco y el cobre del cableado son altamente reciclables, al igual que la plata y el estaño presentes en las conexiones eléctricas. Sin embargo, algunos paneles contienen materiales tóxicos, como cadmio o plomo, que requieren un manejo especial para evitar la contaminación.

De todos los métodos de generación de energía renovable, la solar es la de mayor potencial, por la incidencia solar en todos los territorios, además de la capacidad de los módulos fotovoltaicos de instalarse a distintas escalas, y la capacidad de modificar su capacidad según se modifique la demanda. Según la Agencia Internacional de Energía, hasta 2024 la capacidad instalada de energía fotovoltaica es de 1,858,622 MW a nivel mundial [1], lo que se traduce a casi 108 millones de toneladas de residuos, exclusivamente considerando la masa de un módulo de 550W.

El reciclaje de paneles solares puede estar estrechamente relacionado con la economía circular, un modelo que propone disminuir los desechos y optimizar la utilización de los recursos durante todo su ciclo de vida. En lugar de desechar los paneles al finalizar su ciclo de vida, el enfoque circular sugiere reutilizar, reciclar y recuperar sus materiales para la producción de nuevos productos, disminuyendo la necesidad de materias primas locales y reduciendo el impacto en el medio ambiente. Así, se ofrece una alternativa que permite maximizar el uso de materiales y reducir los desechos. En el presente artículo, se explorará la relación entre la economía circular y la industria fotovoltaica, para garantizar su viabilidad a largo plazo. Al adoptar un modelo de economía circular en la energía solar fotovoltaica, no sólo se reducirían los residuos electrónicos, sino que también se impulsaría una industria más resiliente y sostenible, alineada con los principios de eficiencia y sostenibilidad.



¿QUÉ ES LA ECONOMÍA CIRCULAR?

La economía circular es un sistema industrial que sustituye el concepto de fin de vida con la restauración, reconoce la importancia de que la economía trabaje efectivamente a cualquier escala, grandes y pequeñas empresas, organizaciones, individuos, global y localmente. En este sistema los materiales no se convierten en residuos, y la naturaleza se regenera, gracias a que los productos y materiales se mantienen en circulación durante la mayor cantidad de tiempo posible, mediante procesos como mantenimiento, reutilización, reacondicionamiento, remanufactura, reciclaje y compostaje, al mismo tiempo que desvincula la actividad económica del consumo de recursos finitos, lo que a su vez, minimiza el cambio climático, la pérdida de biodiversidad, los residuos y la contaminación de nuestros recursos.

La definición más reconocida de economía circular es la que propone Ellen MacArthur Foundation, donde se establece que la economía circular es un enfoque sistémico del desarrollo económico, que tiene beneficios para las empresas, la sociedad y el medio ambiente. A diferencia del modelo lineal de 'tomar, fabricar y desechar', este enfoque es regenerativo y busca desvincular el crecimiento económico del consumo de recursos limitados. Es un sistema industrial que propone reemplazar la 'caducidad' de la materia prima utilizada por la 'restauración' de la misma, aprovechando al máximo los materiales mediante ciclos técnicos y/o biológicos de reciclaje que permiten que sean útiles por más tiempo [2].

Indudablemente, para que cualquier sistema económico funcione, se requieren entradas y salidas, porque depende de un flujo continuo de recursos, producción y consumo para mantenerse activo. Sin embargo, este sistema en particular minimiza las entradas y salidas lo más posible, priorizando mantener los recursos y la energía contenidos en el sistema lo más cercano a la fuente posible como se muestra en la Figura 1.

Figura 1. Diagrama de mariposa de la Economía Circular [3], traducción propia.



¿QUÉ ES LA ECONOMÍA CIRCULAR? (cont...)

Hay tres principios claves en los que se fundamenta la economía circular:

1

Eliminar los residuos y la contaminación, gestionando los recursos finitos y equilibrando el uso de recursos renovables, con el apoyo de estrategias como el ecodiseño y la economía funcional.

2

Circular los productos y los materiales con su utilidad máxima en todo momento, manteniendo la mayor cantidad de energía.

3

Regenerar la naturaleza al cambiar el enfoque de extracción por uno de regeneración, imitando los ciclos de la naturaleza, en los cuales no existe el concepto de desperdicio.



LOS DESAFÍOS DE LA GESTIÓN DE RESIDUOS DE PANELES SOLARES

La cantidad de residuos fotovoltaicos generados en todo el mundo ha sido subestimada, en gran parte porque no existen métodos precisos para determinar cuántos módulos han sido descartados. Sin embargo, es posible hacer una estimación más precisa al considerar cómo y cuándo se instalaron estos sistemas. Por ejemplo, en Brasil, y en México, todos los sistemas conectados legalmente a la red están registrados, lo que facilita el seguimiento y control de su vida útil, similar a lo que se hace en todo el mundo para garantizar el buen funcionamiento de la red eléctrica.

Aunque la cantidad y el tipo de residuos generados varían según la tecnología y la generación del panel, la mayoría de los módulos solares comparten una estructura similar: varias células conectadas entre sí, encapsuladas y colocadas entre capas protectoras en la parte frontal y trasera. Gracias a esta composición, entre el 80 y el 95 % de la masa de un módulo fotovoltaico puede recuperarse con las tecnologías de reciclaje actuales, principalmente materiales como cristal, aluminio y polímeros.

Los métodos efectivos para la gestión de residuos fotovoltaicos son necesarios para evitar que grandes volúmenes de residuos peligrosos sean depositados en vertederos, considerando que las proyecciones indican un crecimiento exponencial en las próximas décadas.

Hay una necesidad urgente de tecnología transformadora para el reciclado y la integración de materiales reciclados de residuos fotovoltaicos al proceso de fabricación, ya que, la demanda extrema futura de materias primas podría satisfacerse con materias primas secundarias, reduciendo así la dependencia de las importaciones y la minería excesiva, además de resolver el problema de la disposición y manipulación de chatarra, donde los componentes de los paneles contaminados con plomo, cadmio y otros materiales peligrosos deben tratarse por separado.

La adopción de un modelo circular en la industria de los paneles solares todavía enfrenta obstáculos importantes. Uno de los principales es que los módulos no se diseñan pensando en su desmontaje, lo que complica el reciclaje. Además de la falta de leyes que regulen la gestión de los módulos al final de su vida útil, a excepción de la Directiva sobre Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos de la Unión Europea. En consecuencia, los módulos suelen ser tratados como desechos electrónicos convencionales, lo que contribuye a una contaminación ambiental que, con la regulación adecuada, podría evitarse. El modelo de negocio actual sigue centrado en producir, vender y desechar, sin considerar nuevas formas de aprovechar los materiales, a esto se suma la falta de incentivos económicos que hagan viable el reciclaje y la modificación del proceso.



BENEFICIOS DE LA ECONOMÍA CIRCULAR EN LA INDUSTRIA SOLAR

La implementación de la economía circular a la industria fotovoltaica es posible mediante distintas estrategias, como la evaluación del ciclo de vida, la sustitución de materiales, la diversidad de diseño de las celdas, la colaboración entre sectores y el impulso de incentivos fiscales y subsidios para el uso de materiales reciclables o reciclados.

En la última década, se ha utilizado análisis del ciclo de vida para la evaluación sistemática de la cadena de suministro fotovoltaica. Esta herramienta permite comparar el impacto ambiental de la energía solar con otras formas de generación de energía. Este tipo de análisis siguiendo un enfoque de cuna a tumba, o de cuna a cuna es una ayuda a identificar oportunidades de un cierre del bucle. Sin embargo, no es suficiente por sí solo.

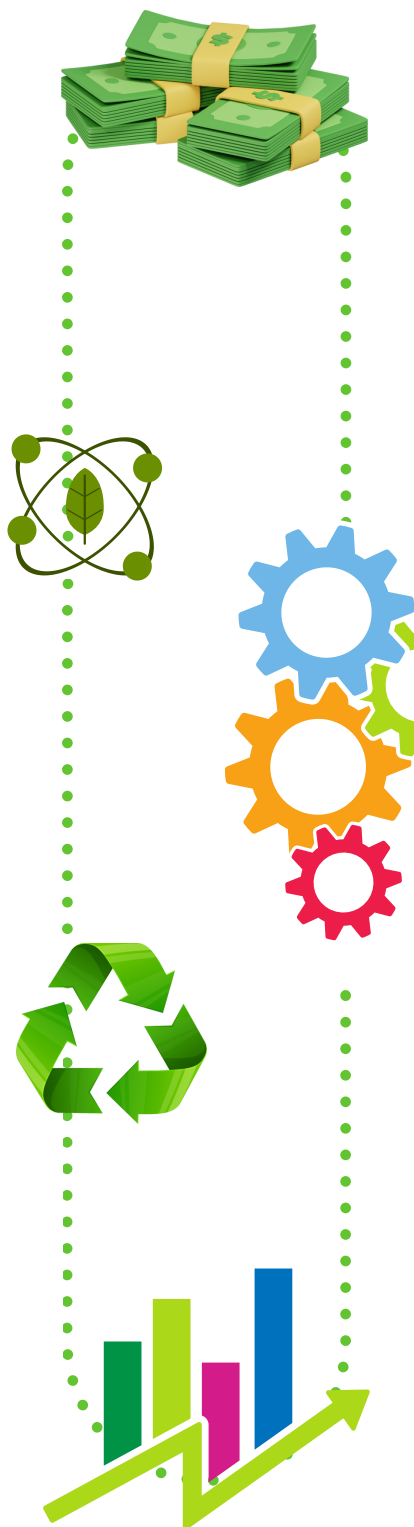
Para lograr la transición hacia la economía circular se necesita un enfoque multidisciplinario que integre las diferentes herramientas complementarias como el ecodiseño, las 10Rs (rechazar, reanalizar, reducir, reutilizar, reparar, renovar, remanufacturar, readaptar, reciclar, recuperar), así como un cambio en los hábitos de consumo, fomentando decisiones más responsables y sostenibles de los usuarios [4], [5], [6].

La circularidad interviene en cada una de las etapas de cada producto, en este caso, de un panel fotovoltaico, para reducir el impacto ambiental, y lo hace desde el diseño de paneles más sostenibles, hasta la implementación de programas de reciclaje, siguiendo un rastreo del comportamiento de las emisiones generadas en el proceso, pero también garantizando que la actividad productiva no se vea afectada. Al promover el uso de materiales reciclados, se fomenta un uso más eficiente de los recursos naturales, disminuyendo la cantidad de material virgen necesario para la producción.

La economía circular en el sector fotovoltaico presenta beneficios en las tres dimensiones de la sustentabilidad. En lo ambiental, reduce la cantidad de residuos que se generan cuando los paneles alcanzan el fin de su vida útil. En lo económico, puede bajar los costos de producción al reutilizar componentes valiosos, abrir nuevas oportunidades de negocio con el reciclaje especializado. Además de en lo social, con la generación de empleos en sectores locales y fomentar la innovación.

A pesar de que los avances en reciclaje, el ecodiseño y la integración de materiales reciclados en la producción de paneles solares son prometedores, persisten desafíos. La falta de leyes y normas, aunado a la necesidad de una mejor infraestructura de gestión de residuos ralentizan el progreso. La colaboración entre gobiernos, empresas e instituciones de investigación es esencial para establecer políticas que promuevan la eliminación y el reciclaje responsable de los componentes fotovoltaicos [7], [8].

En Jalisco se firmó un convenio entre 'rafiqui' y el gobierno estatal, para la apertura de la primera planta recicladora de paneles fotovoltaicos en el país



CONCLUSIÓN

La economía circular representa una solución alternativa para la gestión de residuos de la industria fotovoltaica, como son los residuos generados al final de la vida útil de los módulos. A medida que la demanda de energía, y por ende el aumento en la demanda mundial de energía renovable, es indispensable adoptar estrategias que den prioridad a la reutilización de materiales, que reduzcan la dependencia de recursos finitos y minimicen el impacto ambiental asociado a su producción y disposición final.

Más allá de su impacto ambiental positivo, la implementación de modelos circulares en la industria solar puede traer importantes beneficios económicos y sociales. El desarrollo de iniciativas de reciclaje no solo contribuye a la generación de empleo, sino que también permite reducir costos de producción mediante la integración de materiales recuperados, disminuyendo así la dependencia de materias primas importadas. Además, la economía circular impulsa la innovación tecnológica, optimizando los procesos de fabricación, diseño y reutilización de materiales, lo que a su vez mejora el rendimiento y la accesibilidad de los sistemas fotovoltaicos, especialmente en mercados emergentes.

El enfoque circular se articula con la industria fotovoltaica al intervenir de manera transversal en su estructura, funcionamiento y proyección a largo plazo. Propone repensar cada etapa del ciclo de vida para evitar el modelo lineal de 'usar y desechar', desde el diseño de los paneles hasta su disposición final. Se promueve el rediseño de los módulos para facilitar su desmontaje, reparación y reutilización, priorizando la estandarización de componentes y materiales reciclables. Además de esto, se introducen nuevas dinámicas económicas, como modelos de negocio basados en el reacondicionamiento o la devolución al final de la vida útil. Todo esto contribuye a reducir la presión sobre los recursos naturales, disminuir los costos de producción y el manejo de residuos y fortalecer la resiliencia del sistema energético.

La transición hacia una economía circular en la energía fotovoltaica representa un enfoque que busca reducir el impacto ambiental y optimizar el uso de recursos a lo largo del ciclo de vida de los sistemas solares. La integración de estrategias basadas en innovación tecnológica, mecanismos de inversión y marcos normativos puede contribuir a mantener la viabilidad operativa y ambiental de esta fuente energética en el largo plazo. La implementación de dichas estrategias requiere la participación coordinada de los actores involucrados en la cadena de valor, incluyendo consumidores, fabricantes y gobiernos, con el objetivo de fortalecer la seguridad energética y la gestión sostenible del sector fotovoltaico.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] International Renewable Energy Agency, "Renewable capacity statistics", 2025. Consultado: el 7 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.irena.org/Publications/2025/Mar/Renewable-capacity-statistics-2025>
- [2] Ellen MacArthur Foundation, "The circular economy in detail: Deep dive", Ellen MacArthur Foundation. Consultado: el 7 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/the-circular-economy-in-detail-deep-dive>
- [3] Ellen MacArthur Foundation, "The butterfly diagram: visualising the circular economy". Consultado: el 1 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy-diagram>
- [4] C. E. L. Latunussa, F. Ardente, G. A. Blengini, y L. Mancini, "Life Cycle Assessment of an innovative recycling process for crystalline silicon photovoltaic panels", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 156, pp. 101–111, nov. 2016, doi: 10.1016/j.solmat.2016.03.020.
- [5] D. Sica, O. Malandrino, S. Supino, M. Testa, y M. C. Lucchetti, "Management of end-of-life photovoltaic panels as a step towards a circular economy", el 1 de febrero de 2018, Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.rser.2017.10.039.
- [6] M. K. H. Rabaia et al., "Enabling the circular economy of solar PV through the 10Rs of sustainability: Critical review, conceptualization, barriers, and role in achieving SDGs", *Sustainable Horizons*, vol. 11, p. 100106, sep. 2024, doi: 10.1016/j.horiz.2024.100106.
- [7] H. Mirletz, S. Ovatt, S. Sridhar, y T. M. Barnes, "Prioritizing circular economy strategies for sustainable PV deployment at the TW scale", *EPJ Photovoltaics*, vol. 15, p. 18, may 2024, doi: 10.1051/epjpv/2024015.
- [8] S. L. Shaw, M. L. Rencheck, G. A. Siegfried, y C. Libby, "A circular economy roadmap for solar photovoltaics", *Solar Energy*, vol. 276, p. 112580, jul. 2024, doi: 10.1016/j.solener.2024.112580.

