Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riiit.com.mx

Comparación de los métodos de reciclaje empleados en los módulos fotovoltaicos de c-Si

A comparison of the recycling methods used for c-Si photovoltaic modules

Cabrera-Hernández, M.[1], Ramírez-Amador, R.[2]*, Jiménez-Xochimitl, S.[1], Cortés-Maldonado, R.[2], López-Hernández, O.[1]

[1] Facultad de Ciencias de la Electrónica, Ingeniería en Energías Renovables, FCE-BUAP, Puebla, México. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-7292-5085, https://orcid.org/0009-0003-6736-1409, https://orcid.org/0009-0001-6891-3952.

[2] Tecnológico Nacional de México/IT Apizaco, Av. Instituto Tecnológico No. 418, San Andrés Ahuashuatepec, Tzompantepec, 90491, Tlaxcala, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0716-4596*, https://orcid.org/0000-0001-8463-1325.

cabrerah.mariana@gmail.com; raquel.ra@apizaco.tecnm.mx*; sanjim@hotmail.com; raul.cm@apizaco.tecnm.mx; osvaldo.lopezhe@correo.baup.mx

Innovación tecnológica: Identificar los métodos de reciclaje en módulos fotovoltaicos con la finalidad de poder reciclar el material de estos, después de que terminan su vida útil.

Aplicación industrial: Crear un enlace entre los centros de recolección, plantas de reciclaje y fabricantes de módulos fotovoltaicos o empresas de interés, para reintegrar materiales recuperados en la cadena productiva.

Recibido: 04 diciembre 2025
Aceptado: 27 mayo 2026

Abstract

The recycling of photovoltaic modules that have reached the end of their useful life is an issue that has taken on greater importance worldwide due to the growing development of solar photovoltaic energy; Although first-generation photovoltaic modules (crystalline silicon) have an average lifespan of 25 years, it is important to pay attention to those photovoltaic installations that are reaching the end of their useful life or that are failing in the early stages of operation, as these devices may contain both valuable and toxic elements. In this study, research was conducted on methods for recycling crystalline silicon photovoltaic modules, as this is the predominant technology in the global market. Through detailed research, it was found that various methods and stages have been developed to separate the elements that make up photovoltaic modules, as well as to recycle each of their components at different stages of the recycling process. The findings indicate that certain countries in Europe and Asia dominate this field, while Latin America has a lower level of involvement. Furthermore, the most widely used technique for recycling

photovoltaic modules is mechanical delamination. This approach dominates the recycling market, as it is a cost-effective, technically feasible, and easily scalable process, with high processing capacity and low energy consumption, making these findings worthy of consideration by companies involved in recycling.

Keywords: Mechanical methods, thermal methods, chemical methods, crystalline silicon photovoltaic modules, photovoltaic module recycling.

Resumen

El reciclaje de los módulos fotovoltaicos que han llegado al final de su vida útil es un tema que, a nivel mundial, ha tomado una mayor importancia debido al creciente desarrollo de la energía solar fotovoltaica; si bien, los módulos fotovoltaicos de primera generación (silicio cristalino), tienen una vida útil promedio de 25 años, es importante prestar atención a aquellas instalaciones fotovoltaicas que están llegando al final de su vida útil y que presentan fallos en etapas tempranas de la instalación, ya que estos dispositivos pueden contener tanto elementos valiosos como elementos tóxicos. En este trabajo, se llevó a cabo una investigación sobre los métodos de reciclaje de módulos fotovoltaicos de silicio cristalino, por ser la tecnología predominante en el mercado mundial. Por medio de una investigación detallada, se encontró que se han desarrollado diferentes métodos y etapas para lograr una separación de los elementos que conforman a los módulos fotovoltaicos, así como para el reciclaje de cada uno de sus componentes en las diferentes etapas que conforman el proceso de reciclaje. Al término de este estudio, se pudo apreciar que algunos países de Europa y Asia son los que predominan en este campo y con una menor participación en Latinoamérica, además de que la técnica que más se usa para el reciclaje de módulos fotovoltaicos, es delaminación mecánica, el cual es uno de los métodos que más abarca el mercado de reciclaje, ya que es un proceso rentable, técnicamente factible y fácil de escalar, con alta capacidad de procesamiento y de bajo consumo energético, lo que permite que este estudio pueda ser considerado por empresas que se dedican al reciclaje.

Palabras clave: métodos mecánicos, métodos térmicos, métodos químicos, módulos fotovoltaicos de silicio cristalino, reciclaje de módulos fotovoltaicos.

I. Introducción

A nivel mundial, a partir del año 2000, el aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica ha tenido un gran crecimiento, de acuerdo con la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA, por sus siglas en inglés), donde se espera que para el año 2050, a nivel mundial, se alcance una capacidad instalada de 4,500 GW (Weckend *et al.* 2016). Por su parte, México es identificado como un país generador de energía solar fotovoltaica, ya que la IRENA reportó que hasta marzo del 2024 se tuvieron 10,910 MW instalados. Sin embargo, la gestión de los módulos fotovoltaicos al final de su vida útil se ha abordado muy poco, ya que las empresas responsables consideran que es una tecnología reciente que tiene muchos años de vida por delante. Desafortunadamente, no se han tomado en cuenta aquellas fallas que pueden afectar a los dispositivos en una etapa temprana o media de su vida útil (Rodríguez *et al*. 2017; IRENA, 2024).

Los componentes mayoritarios de los módulos fotovoltaicos son: vidrio, polímeros y aluminio, que representan alrededor del 90% de la masa total del módulo y son clasificados como residuos no peligrosos. Por otro lado, los componentes minoritarios como plata, estaño y plomo, se clasifican como materiales peligrosos, ya que representan un peligro para el medio ambiente y la salud de los seres vivos si no se tratan de manera adecuada. La cantidad de plomo contenida en un módulo fotovoltaico de silicio cristalino, con un peso de alrededor de 22 kg, es de aproximadamente 12.67 gramos. Si estos dispositivos se desechan en tiraderos a cielo abierto y son lixiviados por la lluvia, pueden liberar entre el 13% y el 90% de la cantidad de plomo contenida. Algunos investigadores han realizado evaluaciones eco toxicológicas, donde predijeron que durante los primeros meses después de su eliminación, los módulos mantienen su integridad debido al encapsulante, el cual está hecho de un polímero denominado etileno vinil acetato (EVA). Sin embargo, con el paso del tiempo los módulos pueden estar sometidos a diferentes cargas y pH, provocando la degradación del EVA, liberando alrededor de 30 toneladas de plomo para 2050 (Camargo *et al*. 2021).

Hasta 2018, a nivel mundial, sólo se reciclaba alrededor del 10% de los módulos fotovoltaicos que llegaban al final de su vida útil. El reciclaje de estos dispositivos puede favorecer la recuperación de energía y materiales, así como la reducción de emisiones de CO_2 (Dióxido de Carbono) relacionadas con esta industria (Reyes, 2013). Por ello, es necesario que se prevean e implementen mecanismos en materia de reciclaje de módulos fotovoltaicos, permitiendo lograr una planeación adecuada, estableciendo objetivos a mediano y largo plazo, donde se promuevan acciones en beneficio del medio ambiente y evitando que estos dispositivos sean desechados en tiraderos a cielo abierto, permitiendo la recuperación, reutilización y valorización de los materiales contenidos (Francovigh, 2023).

II. Desarrollo

Los módulos fotovoltaicos son dispositivos conformados por capas de diferentes materiales. Su componente de generación eléctrica son las celdas solares, ya que estos dispositivos convierten las partículas energéticas de la luz solar en energía eléctrica por medio de su incidencia en la superficie del material semiconductor (Inguanzo Saucedo *et al. 2016;* Casas Rueda & Cordero Castellanos, 2023). Los módulos fotovoltaicos de primera generación están conformados por celdas solares de silicio cristalino, formadas por la unión de semiconductores n-p, dopados con boro y fósforo. En la Figura 1 se muestra la conformación en capas a los módulos fotovoltaicos de primera generación (Casas Rueda & Cordero Castellanos, 2023; Wang *et al*. 2022).

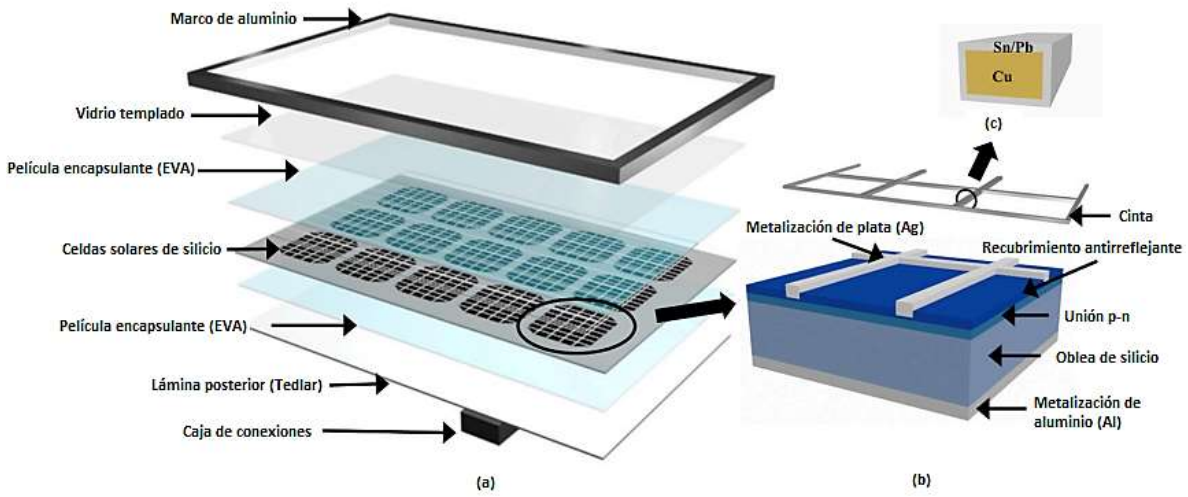


Figura 1. *Conformación del módulo fotovoltaico de silicio cristalino. (a) Estructura del módulo fotovoltaico c-Si, (b) Composición de la celda solar c-Si, (c) Estructura de la cinta fotovoltaica; adaptada de (Wang et al. 2022).*

En 1990, en la Unión Europea, un grupo de científicos identificó que estos dispositivos podían ser reciclados, ya que se tenía una cantidad significativa de instalaciones fotovoltaicas que, más adelante, podrían representar un problema si únicamente eran desechados de manera convencional. Sin embargo, durante los estudios realizados, determinaron que la eliminación de la capa de encapsulante sería una tarea desafiante, y que posee gran adhesión para aislar a las celdas solares del aire y la humedad (Suárez *et al. 2023; Universidad de la Laguna, 2017.;* Latunussa *et al. 2016).*

Alrededor del 85% de los módulos fotovoltaicos instalados a nivel mundial corresponden a la tecnología de silicio cristalino (c-Si). Sin embargo, las características físicas de cada dispositivo varían de acuerdo a su fabricante. El reciclaje de estos dispositivos se enfoca en disminuir los desechos, reducir el impacto ambiental que los dispositivos generan al final de su vida útil, además de ser un proceso esencial para el desarrollo sostenible de la energía solar (Maani *et al*. 2020; Universidad de Antofagasta, 2022; Späth *et al*. 2022).

Considerando la conformación en capas de los módulos fotovoltaicos, se requieren diferentes procesos para separar los elementos. Las etapas de reciclaje de estos dispositivos se dividen en (Cabrera Hernández, 2024):

- Desmantelamiento: Separación del marco de aluminio y cableado externo; se lleva a cabo por medio de procesos mecánicos, ya sea manuales o automatizados.
- Delaminación: Separación de las capas que conforman los módulos fotovoltaicos, pudiendo triturar al módulo, fundir o diluir el EVA; se han desarrollado diferentes procesos para lograr la separación de las capas, dentro de los cuales se conocen procesos mecánicos, procesos térmicos y procesos químicos.
- Separación y purificación de materiales: Separación de los materiales que conforman la celda solar (Si, Cu y Ag); para este paso, se han desarrollado procesos químicos para la recuperación y purificación de los elementos.

Se identificó que, en algunos países, principalmente en aquellos pertenecientes a la Unión Europea, se han desarrollado e implementado procesos de reciclaje a escala industrial donde algunas de las empresas especializadas en el reciclaje de los módulos fotovoltaicos llevan a cabo procesos de reciclaje de alto valor, cuyo principal objetivo es recuperar la mayor cantidad de elementos del laminado solar para darle una segunda vida útil y, de este modo, contribuir a la economía circular. Algunas de las principales empresas se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Proceso de reciclaje llevado a cabo por empresas a escala industrial.

Empresa	Tipo de planta	Capacidad de procesamiento	Proceso de reciclaje	Consumo energético
Reiling Glas Recycling, Alemania	Reciclaje de vidrio y módulos fotovoltaicos	10,000 – 50,000 ton/año	Proceso mecánico (trituración del módulo)	≈ 60 kWh/ton
LuxChemtech GmbH, Alemania	Reciclaje de módulos fotovoltaicos	1,000 ton/año (planta piloto)	Proceso mecánico (trituración por chorro de agua) + grabado químico para recuperar metales	≈ 130 kWh/ton
Flaxres, Alemania	Reciclaje de módulos fotovoltaicos	1,000 ton/año (planta piloto)	Proceso térmico (delaminación por pulsos de luz)	≈ 60 kWh/ton
ROSI SAS, Francia	Reciclaje de módulos fotovoltaicos	3,000 ton/año	Proceso térmico (incineración del laminado solar) + grabado químico para recuperar metales	No divulgado
Tialpi SRL, Italia	Reciclaje de módulos fotovoltaicos	1,000 – 3,000 ton/año	Proceso térmico (pirólisis del laminado solar) + lixiviación química + electrólisis para recuperar metales	≈ 136 kWh/ton
Shynrio Corporation, Japón	Reciclaje de módulos fotovoltaicos	1,440 ton/año	Proceso térmico (pirólisis del laminado solar)	No divulgado
Solar Cycle, EE.UU.	Reciclaje de módulos fotovoltaicos	50,000 ton/año	Proceso mecánico (trituración del laminado solar)	No divulgado
Rafiqui, México	Reciclaje de módulos fotovoltaicos	1,000 ton/año	Proceso mecánico (trituración del laminado solar)	Proceso en desarrollo

Elaboración propia con datos de (Cabrera Hernández, 2024; Wambach *et al.* 2024; Collins, 2023).

Sin embargo, la planta recicladora mexicana, Rafiqui, ubicada en Jalisco, recibió su equipo de reciclaje en enero del presente año, permitiendo iniciar con su proceso de reciclaje industrial, ya que estuvo en un proceso de fabricación durante algunos meses. Sin embargo, esta asociación civil, en conjunto con la asociación Second Life of Solar, se encuentran desarrollando un proyecto para la intervención de artistas dentro del sector fotovoltaico, permitiendo convertir los módulos fotovoltaicos en piezas de arte, dando una alternativa de reúso y valorización (Usla, H., 2025).

La combinación de diferentes procesos y métodos, da paso a la recuperación de los componentes que conforman a los módulos fotovoltaicos (Latunussa *et* al. 2016; Cabrera Hernández, 2024). En la actualidad, se han desarrollado dos principales fases para el reciclaje de estos dispositivos, los cuales se muestran en la Figura 2.

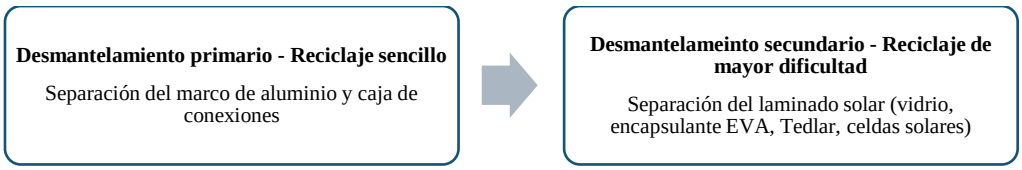


Figura 2. *Rutas de reciclaje consideradas para el reciclaje de los módulos fotovoltaicos; adaptada de (Suárez, 2023).*

A su vez, se tiene 2 posibles rutas para el reciclaje de estos dispositivos (Cabrera Hernández, 2024; Deng *et al.* 2019; Späth *et al.* 2022):

1. Ruta de reciclaje de bajo valor: Consiste en extraer materiales contaminados, teniendo un bajo valor en la reutilización y costo de los mismos. Se enfoca principalmente en recuperar los elementos mayoritarios.
2. Ruta de reciclaje de alto valor: Consiste en un proceso de mayor complejidad, donde se separan las capas que conforman al módulo fotovoltaico y se recupera la mayor cantidad de elementos minoritarios presentes en las celdas solares con una menor contaminación.

Es por ello que se han desarrollado y llevado a cabo diferentes procesos de delaminación del laminado solar, permitiendo separar y recuperar los elementos que conforman a los módulos fotovoltaicos. Algunos de los procesos estudiados a escala laboratorio y aplicados a escala industrial son los que se presentan en la Figura 3.

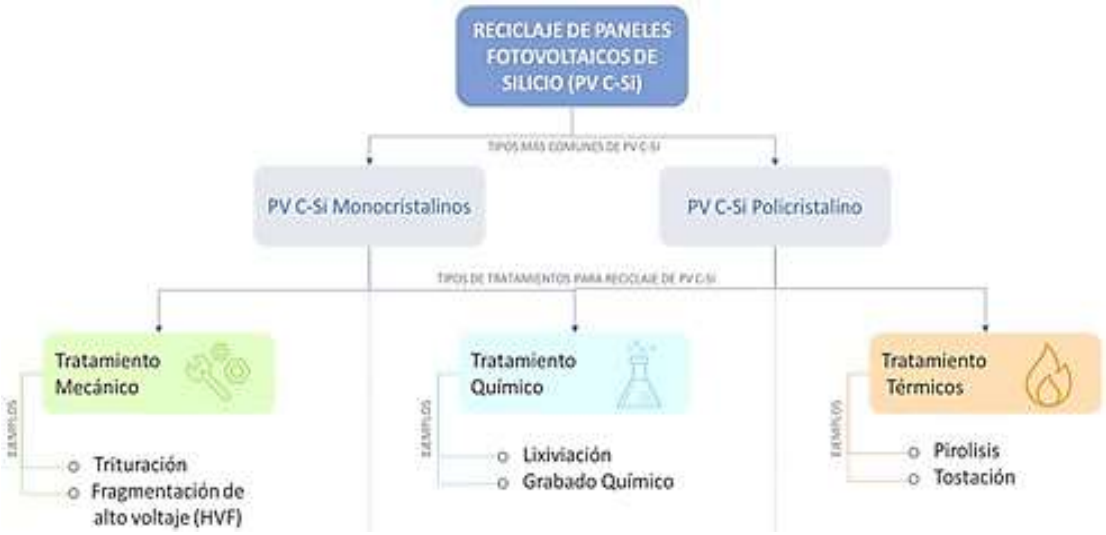


Figura 3. *Métodos de reciclaje aplicados para paneles c-Si (Universidad de Antofagasta, 2022).*

Métodos mecánicos: Se basan en la trituración del módulo para separar los elementos mayoritarios de los módulos fotovoltaicos, logrando una alta recuperación de material por masa. Sin embargo, los elementos minoritarios no pueden ser recuperados por completo. Este tipo de procesos son fáciles de aplicar, escalar, además de ser rentables. Algunos de los procesos que se han desarrollado en la actualidad son:

- Doble trituración después del desmontaje del marco de aluminio, obtenido un mayor porcentaje de vidrio recuperado.

- Trituración del módulo con pulsos de alto voltaje en un medio acuoso, obteniendo selectividad en las partículas y disminuyendo los puntos de contacto.
- Sistema automatizado para delaminación mecánica, se trata de un equipo desarrollado por un fabricante chino y, en la actualidad, es utilizado a escala industrial.

Métodos térmicos: Se basan en la descomposición progresiva de los polímeros presentes en los módulos fotovoltaicos (EVA y Tedlar) por medio de la aplicación de un gradiente de temperatura. Algunos de los procesos que se han desarrollado en la actualidad son:

- Delaminación térmica de 2 etapas de calentamiento bajo una atmósfera oxidante, donde, inicialmente, se retira el Tedlar (ver Figura 1) y se procede a la aplicación de un proceso térmico para degradar el EVA.
- Pirólisis de 2 etapas para delaminación térmica, donde se retira inicialmente el Tedlar calentando ligeramente el EVA, y se continúa con un proceso pirolítico bajo una atmósfera de nitrógeno para la degradación del EVA.
- Delaminación térmica con pretratamiento, donde se despegó la lámina trasera (Tedlar) del laminado solar, y el resto del laminado se sometió a un proceso de combustión.

Métodos químicos para delaminación: Se basan en la separación de los componentes que conforman a los módulos fotovoltaicos. Su principal objetivo es la degradación química del EVA, obteniendo materiales de alta pureza. Algunos de los procesos que se han desarrollado en la actualidad son:

- Delaminación solvotérmica. En este estudio, el principal objetivo fue el hinchamiento del EVA con ayuda de tolueno y etanol bajo una concentración de 0.2 M a 190°C después de un tratamiento de 2 horas, permitiendo recuperar las celdas solares intactas con ayuda de tolueno y etanol.
- Delaminación química con microondas, donde se utilizó tricloroetileno bajo una concentración de 4 mol/L a 70°C durante 2 horas y microondas, permitiendo reducir el tiempo de separación del EVA del resto de los elementos.
- Delaminación química con CO_2 supercrítico ($ScCO_2$), donde se utilizó tolueno con una relación sólido-líquido de 1-12 a 189° durante 45 minutos y $ScCO_2$ para la separación de los componentes por la degradación e hinchamiento del EVA.

Métodos químicos para purificación: Se basan en la purificación de los elementos minoritarios recuperados; los procesos que se han desarrollado son:

- Lixiviación ácida o alcalina, permiten separar los metales presentes en las celdas solares, disolviendo los electrodos de la celda solares, así como

impurezas adicionales debidas a los procesos de delaminación.
- Grabado químico, buscando recuperar el silicio, disolviendo las capas superficiales fuertemente dopadas (capa antirreflejante y uniones n-p).

III. Resultados y Discusión

Después de estudiar los métodos de reciclaje desarrollados a escala de laboratorio, se determinó que un proceso de reciclaje para módulos fotovoltaicos consiste en las etapas mostradas en la Figura 4, donde la etapa que más se ha estudiado es la delaminación del laminado solar, ya que, por la estructura del módulo fotovoltaico, el encapsulante EVA, que protege a las celdas solar del ambiente y actúa como adhesivo entre las diferentes capas, dificultando su separación.

El principal objetivo del reciclaje es recuperar materias primas con alta pureza para que éstas puedan ser reintroducidas al mercado. Para ello, se combinan los diferentes métodos, dando lugar a mayores tasas de recuperación y materiales menos contaminados.

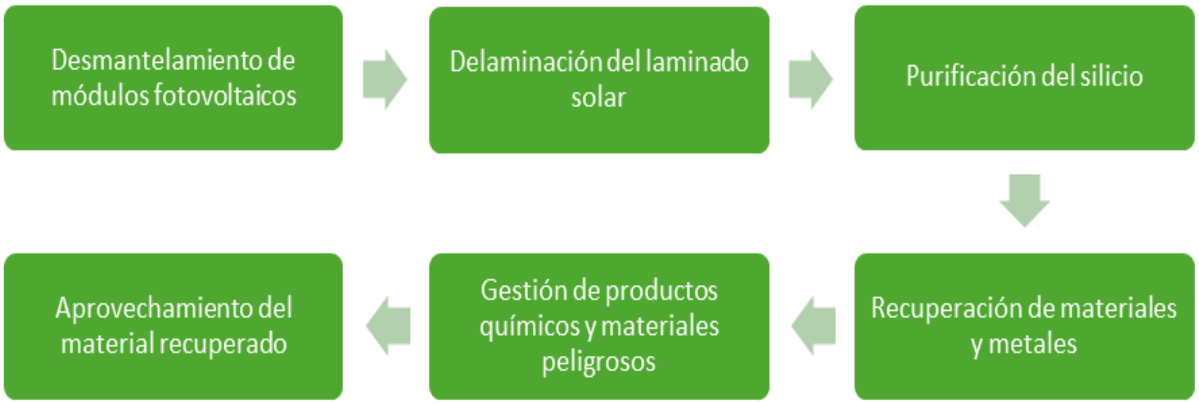


Figura 4. *Proceso de reciclaje para los módulos fotovoltaicos de silicio cristalino.* *Elaboración propia.*

Una ruta de reciclaje de alto valor ha logrado tener un menor impacto ambiental en comparación con una ruta de reciclaje de bajo valor, la cual es la más recomendable y menos costosa para el medio ambiente, que se enfoca en recuperar diferentes materiales para reintroducirlos a la cadena de valor en lugar de generar materiales primarios (Maani *et al*. 2020). Con base en la literatura estudiada sobre los métodos para el reciclaje para módulos fotovoltaicos c-Si, se presenta cada una de las etapas estudiadas para el reciclaje de estos dispositivos:

1. Desmantelamiento del módulo fotovoltaico

Su principal objetivo es dejar expuesto el laminado solar, por lo cual, se retira el marco de aluminio y la caja de conexiones. Este proceso es meramente mecánico (In-Data & RIGK, 2020), por lo que, únicamente puede llevarse a cabo de 2 formas, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Tabla comparativa de los procesos de desmantelamiento, ventajas y desventajas.

Proceso de desmantelamiento	Descripción	Ventajas	Desventajas
Manual	Por medio de destornilladores y sierras eléctricas puede cortar y separar el marco de aluminio y la caja de conexiones, dejando el laminado solar expuesto.	Proceso útil para módulos de diferentes tamaños, ya que no requiere de equipo especializado y se puede realizar sin complicación. El costo inicial es bajo.	Proceso prolongado, requiere de personal para realizar el proceso, quienes pueden estar expuestos a cortes. Es ideal para procesos con bajo volumen de procesamiento
Automatizado	Por medio de equipo automatizado se realiza la separación del marco de aluminio y la caja de conexiones, permitiendo obtenerlos por separado, liberando el laminado.	Es un proceso fácil, rápido y reduce la interacción humana en esta etapa del proceso de reciclaje. Se puede procesar gran volumen de módulos en corto tiempo	Al momento, el equipo solo se comercializa en el extranjero, pudiendo incrementar la inversión inicial para la compra de equipo y maquinaria.

Elaboración propia con datos de (Cabrera Hernández, 2024; In-Data & RIGK, 2020).

Los equipos de desmantelamiento automatizado son fabricados en el extranjero (Cabrera Hernández, 2024). Faircloth *et al*. (2019), establecen que se puede construir/adaptar un equipo para el desmantelamiento automatizados del marco de los módulos fotovoltaicos con ayuda de un robot cartesiano de 3 ejes.

- ***Delaminación del laminado solar***

El grado de separación de los elementos del laminado solar permiten determinar el valor de los materiales recuperados.

Los procesos de delaminación mecánica se basan en triturar el laminado, permitiendo obtener un tamaño de partícula que rompa con la estructura laminada. Para ello, es necesario repetir el proceso de 3 a 6 veces, produciendo una contaminación cruzada de los elementos del laminado solar. Por ello, es recomendable implementar un proceso de separación mecánica de materiales al finalizar con la trituración del laminado solar. La distribución de partículas, después de realizar la trituración y molienda del laminado, permite una mejor distribución de acuerdo con el tamaño de partícula obtenido, como se muestra en la Figura 5, dando paso a la separación de los elementos por medio de un cribador vibratorio.

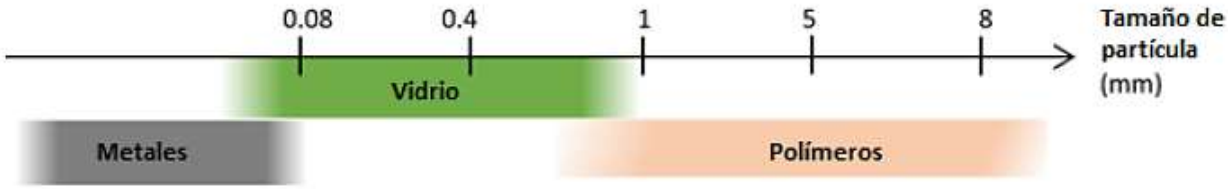


Figura 5. *Distribución de partículas de acuerdo con su tamaño después de un proceso de molienda y trituración (Éleonore, 2020).*

Los procesos de delaminación térmica se basan en la degradación del encapsulante EVA y la lámina posterior, permitiendo la recuperación de las celdas solares. Sin embargo, su degradación térmica es un proceso que requiere de una gran demanda energética (> 60 kWh/ton) y, a su vez, produce gases contaminantes, como dióxido

de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), dioxinas y furanos, vapor de agua, compuestos orgánicos volátiles (COVs) como metano, etano, propano, butano y plomo, siendo compuesto nocivos para la salud y el medio ambiente (Cabrera Hernández, 2024).

Los procesos de delaminación química se enfocan en la degradación del encapsulante EVA por medio de reactivos químicos. Sin embargo, se ha determinado que no es in process viable para tener una aplicación industrial, ya que tienen una larga duración, baja rentabilidad y son requeridas altas cantidades en el suministro de productos químicos, pues se identificó que pueden utilizarse entre 7 a 46 kg por proceso. Por otro lado, con base en los procesos de delaminación química estudiados, se identificó que el encapsulante EVA permanecía adherido a las celdas solares, por lo que se requería un proceso térmico adicional para eliminar completamente el encapsulante de la celda solar (Cabrera Hernández, 2024).

El principal objetivo de los procesos de delaminación térmica y química es recuperar la celda solar de manera ininterrumpida, para que pueda ser reutilizada en la fabricación de módulos fotovoltaicos. Sin embargo, las altas temperaturas dañan la integridad de la celda, así como algunos agentes químicos, ya que generan grietas en su superficie o conducen a su ruptura (Maani *et al.* 2020*;* Deng *et al.* 2019).

En la Tabla 3 se muestra una comparación entre los procesos de delaminación mecánica, térmica y química, considerando su tasa de recuperación y pureza de los elementos recuperados, materiales recuperados por cada proceso, ventajas y desventajas.

Tabla 3. Comparativa de los procesos de delaminación identificados.

Criterio	Delaminación mecánica	Delaminación térmica	Delaminación química
Tasa de recuperación	Vidrio: ≈ 85 – 90 % en partículas entre tamaños de 0.08 y 0.3 mm Celda solar: ≈ 95 – 98 % en partículas menores de tamaño menor a 0.08 mm Metales: ≈ 95 – 98 % en partículas menores de tamaño menor a 0.08 mm EVA y Tedlar: ≈ 95% con restos de vidrio en partículas de tamaño mayor a 1 mm	Vidrio: ≈ 100% con contaminación superficial de metales Celda solar: ≈ 100% recuperada en pedazos Metales: ≈ 98 – 99 % Tedlar: 100% fue retirado previo al proceso de combustión EVA: 0% degradado	Vidrio: ≈ 99% Celda solar: ≈ 85% con restos de EVA adheridos Metales: ≈ 99% de filamentos de plomo Tedlar: 100% fue retirado previo al proceso de delaminación EVA: No reportado; una parte permaneció adherido a las celdas solares.
Pureza de los elementos	Vidrio: No reportado. Sin embargo, entre los tamaños de partícula de 0.3 y 0.08 mm se recupera con 100% Celda solar: No reportado. Sin embargo, entre los tamaños de partícula menores a 0.08 mm se recupera con 100% Metales: No reportado. Sin embargo, entre los tamaños de partícula menores a 0.08 mm se recupera con 100% EVA y Tedlar: No reportado. En los tamaños de partícula	Vidrio: No reportado; aumentó la contaminación superficial de plata, cobre y plomo posterior al tratamiento térmico Celda solar: No reportado; aumentó la concentración de plata, plomo, cobre y estaño Metales: No reportado; se tuvo mayor contenido de plata, pero un menor contenido de plomo y estaño Tedlar: ≈ 99%	Vidrio: ≈ 98.69%; permanecieron restos de EVA adheridos Celda solar: No reportado; se obtuvo con baja pureza por la adhesión del EVA Metales: ≈ 96%; permanecieron en la celda solar por el EVA adherido Tedlar: 98% EVA: Una parte se degradó y la restante permaneció adherida a las celdas

	mayores a 1 mm recuperado con 100%		
Materiales recuperados	Vidrio fragmentado con impurezas, mezcla de polvo de silicio, metales, vidrio y polímeros	Vidrio intacto o roto, celdas solares rotas o ininterrumpidas y cintas de cobre	Vidrio intacto o roto, celdas solares rotas o ininterrumpidas, cintas de cobre y polímero.
Ventajas	Duración: ≈ 3 a 6 minutos Consumo energético: ≈ 2.2 kWh/m^2 Rendimiento: ≈ 3,000 – 8,000 ton/año, fácilmente escalable. Contaminación ambiental baja Proceso utilizado por la mayor parte de las plantas de reciclaje.	Duración: ≈ 30 min a 2 horas Consumo energético: ≈ 25 kWh/m^2 Rendimiento: ≈ 3,000 ton/año Contaminación ambiental alta, consistente en CO, CO_2, COVs, benceno, entre otros. Proceso que permite degradar completamente el EVA; está siendo implementado por las empresas europeas de reciclaje de alto valor.	Duración: ≈ 2 a 24 horas Consumo energético: > 25 kWh/m^2 (No especificado por los autores) Rendimiento: No identificado, ya que no posee viabilidad para ser aplicado a escala industrial Contaminación ambiental alta, por la emisión de gases o vapores nocivos Proceso que permite degradar el EVA.
Desventajas	Si no se complementa con otros procesos, solo permite recuperar elementos mayoritarios (vidrio y marco); se generan partículas finas que son tóxicas si se desechan en vertederos; requiere de un proceso adicional para eliminar el EVA o recuperar elementos minoritarios.	Proceso prolongado con elevado consumo de energía; emite gases nocivos para el medio ambiente y la salud; requiere un sistema de filtración y purificación de gases; rendimiento medio en el procesamiento; puede causar degradación, ruptura y defectos en las celdas solares recuperadas	Proceso muy prolongado y costoso; el EVA no se separa completamente del resto de los elementos; uso de reactivos tóxicos para la salud y el ambiente; muy bajo rendimiento de procesamiento; muy alto consumo de energía y productos químicos.

Elaboración propia con datos de (Cabrera Hernández, 2024: Dobra *et al*. 2022; Deng et al. 2019; Granata *et al.* 2014; Lovato *et al.* 2021; Sharma et al. 2019).

Maani *et al*. (2020), determinaron que el reciclaje, independientemente del proceso que se lleve a cabo, tiene mucho menor impacto que el proceso de fabricación de módulos fotovoltaicos. Para Riech *et al*. (2021), no es indispensable recuperar las celdas solares ininterrumpidas, sino que el reciclaje debería enfocarse en recuperar silicio para la producción de celdas solares. Xu *et al*. (2021), determinaron que recuperar celdas solares ininterrumpidas es un proceso complicado ya que, con un método de delaminación térmica, las celdas se someten a un estrés gaseoso por la descomposición del EVA, generando su ruptura. Hay que considerar que una de las principales razones por las que los módulos fotovoltaicos son retirados de operación es debido al daño mecánico que sufren durante su transporte o por una mala instalación, pues la ruptura de las celdas solares se relaciona con el daño que tenga el módulo, así como con los procesos de desmantelamiento aplicados (Strachala *et al*. 2017).

- ***Proceso de purificación del silicio***

El proceso de purificación se realiza para separar los elementos minoritarios recuperados en la fracción fina después del proceso de trituración, por medio de procesos de lixiviación para extraer los metales de forma selectiva (Wambach *et al*. 2024; Palden, 2021). Una solución de lixiviación se conforma de un agente de lixiviación, que reacciona con los sólidos metálicos para liberar iones metálicos, y un solvente, que disuelve los iones metálicos para que permanezcan en la solución. En la actualidad,

la mayor parte de los procesos de lixiviación se realizan a través de soluciones ácidas minerales (con ácidos inorgánicos), utilizando agua como solvente (Palden, 2021).

Una vez delaminado el módulo y separadas las fracciones finas y gruesas, se utilizan soluciones químicas para realizar una lixiviación selectiva de los metales, tomando en cuenta las propiedades químicas de los componentes de las celdas solares. En la Tabla 4, se muestran algunos procesos para la purificación del silicio.

Tabla 4. Procesos para la recuperación de silicio, soluciones utilizadas y resultados obtenidos.

Método	Solución	Resultado	Material recuperado [%]	Pureza de elementos recuperados [%]
Reciclaje de obleas c-Si (Shin *et al.* 2017)	Ácido nítrico (HNO_3) al 60% durante 5 min.	Disolución del electrodo de plata	100% de oblea de silicio	98 – 99 %
	Hidróxido de potasio (KOH) al 45% durante 8 min.	Disolución del electrodo de aluminio		
	Pasta de grabado con ácido fosfórico (H_3PO_4) a 400°C + inmersión en solución de hidróxido de potasio (KOH) al 0.05%	Disolución de capa antirreflejante y unión n-p		
Separación de materiales en el proceso de reciclaje (Riech *et al.* 2021)	Ácido nítrico (HNO_3) al 70% + Ácido fluorhídrico (HF) al 40% durante 24 horas en una porción 10:1	Disolución de capa antirreflejante, unión n-p y metales, que permanecieron en la solución	90% de silicio en polvo	98 – 99 %
Reciclaje de silicio puro y otros metales (Punathil *et al.* 2021)	Hidróxido de sodio (NaOH) 10 M a 63°C durante 5 min.	Lixiviación del electrodo el aluminio	No especificado por el autor	99% de silicio. El resto de los mentales permanecieron en la solución de lixiviación
	Ácido nítrico (HNO_3) 6M a 70°C durante 5 min.	Lixiviación del electrodo de plata y plomo		
	Ácido fosfórico (H_3PO_4) al 90% a 70°C durante 45 min.	Disolución de capa antirreflejante		

Elaboración propia con datos de (Cabrera Hernández, 2024: Shin et al. 2017; Riech et al. 2021; Luo et al. 2021; Punathil et al. 2021).

En la Tabla 5 se muestran algunas soluciones de lixiviación y grabado químico identificadas a través de los procesos estudiados, su uso, así como su impacto ambiental y a la salud.

Tabla 5. Tabla comparativa de las soluciones utilizadas en el proceso de purificación de las obleas de silicio.

Solución	Uso	Impacto ambiental	Impacto a la salud
Ácido nítrico (HNO_3)	Permite lixiviar el electrodo frontal de plata.	Contribuye a la acidificación de cuerpos de agua, y a la deposición de lluvia ácida.	Puede causar quemaduras graves e irritación en vías respiratorias si se inhalan sus humos.
Hidróxido de potasio (KOH)	Permite disolver el electrodo posterior de aluminio.	Contribuye a la modificación del pH de cuerpos de agua, produciendo una toxicidad moderada.	Puede causar quemaduras químicas graves, irritación en vías respiratorias si se inhalan sus humos.
Hidróxido de sodio (NaOH)	Permite disolver el electrodo posterior de aluminio y el silicio triturado.	Contribuye a la modificación del pH de cuerpos de agua en su forma no diluida.	Puede causar quemaduras químicas graves, irritación en vías respiratorias si se inhalan sus humos.
Ácido fluorhídrico (HF)	Permite disolver la capa antirreflejante y la unión n-p de celdas solares.	Es tóxico y corrosivo, causa daño severo a organismos vegetales y acuáticos; posee alto potencial bioacumulativo.	Puede causar quemaduras químicas profundas que pueden dañar los tejidos y huesos, puede ser mortal si se inhalan sus humos.
Ácido fosfórico (H_3PO_4)	Permite disolver la capa antirreflejante y el emisor.	Es biodegradable, pero grandes cantidades pueden afectar la vida acuática, causando un crecimiento excesivo de algas.	Puede causar irritación en la piel y vías respiratorias. Es menos corrosivo que otros ácidos.

Elaboración propia con datos de (Wang et al. 2024; Sistema globalmente armonizado de clasificación y etiquetado de productos químicos, s.f.; ISQUISA Solución y logística a tu favor, s.f.; Hoja de seguridad de II Hidróxido de solio, s.f.; Ácido clorhídrico, s.f.; Hojas de datos de seguridad Karal, s.f.; Hoja de datos de seguridad Karal, 2022; Hoja de datos de seguridad AFIPA, s.f.).

Huang *et al.* (2017), Deng *et al*. (2022) y Faircloth *et al*. (2019), identificaron que una solución de ácido nítrico (HNO_3) permite disolver los metales de la celda solar, ya que, a escala industrial, se utiliza para grabar y limpiar metales (Sistema globalmente armonizado de clasificación y etiquetado de productos químicos, s.f.). Tomando en cuenta esto, la lixiviación de las partículas metálicas en una solución de HNO_3 permitirá separar los fragmentos de silicio del resto de los metales, recuperándolo con una baja contaminación.

En la mayor parte de los procesos de reciclaje de alto valor se hace uso de ácido nítrico (HNO_3) como sustancia de lixiviación, sin embargo, es altamente corrosivo al entrar en contacto con metales, generando gases nocivos conocidos como óxidos de nitrógeno (NOx) y, a su vez, generan un impacto negativo en el medio ambiente, provocando la formación de lluvia ácida. Por ello, es necesario buscar alternativas más amigables con el medio ambiente y menos peligrosas para la salud humana. Para ello, se propone la investigación científica para la búsqueda de alternativas más respetuosas y amigables con el medio ambiente haciendo uso de solventes verdes, los cuales pueden ser ácidos orgánicos, puesto que no son tóxicos y son biodegradables, además de que, con su uso, se aplican principios de química verde.

Las soluciones de lixiviación minerales pueden ser reemplazadas por lixiviantes orgánicos, pudiendo ser: ácidos minerales combinados con disolventes orgánicos, ácidos orgánicos, agentes quelantes, entre otros. Permitiendo reemplazar las soluciones de lixiviación minerales utilizadas para la purificación de silicio y metales dentro de un proceso más amigable con el medio ambiente. Para lo cual, es importante realizar pruebas de solventes verdes en los procesos de purificación de los elementos minoritarios, comprobando su selectividad, viabilidad y escalabilidad con una mínima contaminación ambiental, promoviendo la disminución de residuos peligrosos.

Finalmente, es necesario llevar a cabo la recuperación de los metales que permanecen dentro de la solución de lixiviación, teniendo 2 posibles rutas para su recuperación (Cabrera Hernández, 2024):

1. Precipitación química: Se agregan reactivos químicos a la solución de lixiviación, permitiendo precipitar metales en forma de hidróxidos metálicos. Los hidróxidos metálicos pueden ser recuperados con purezas de entre 80 – 95 %.
2. Electroobtención o electrólisis: Se hace circular una corriente eléctrica de baja intensidad a través de dos electrodos sumergidos en la solución de lixiviación, la cual se mantiene en agitación constante, permitiendo recuperar metales con una pureza de entre el 95 – 99 %.

Algunas empresas como Tialpi, ROSI y LuxChemtech han desarrollado e implementado procesos de electrólisis para recuperar los metales que han sido lixiviados después de la delaminación del módulo fotovoltaico (Cabrera Hernández, 2024; Wambach *et al.* 2024).

- ***Reutilización de elementos recuperados en el proceso de reciclaje***

Los marcos de aluminio pueden ser reciclados por empresas de reciclaje de aluminio, ya estos no son sometidos a un proceso, puesto que son retirados en conjunto con la caja de conexión del módulo fotovoltaico. Por ello, podrán ser sometidos a procesos para la formación de lingotes en la producción de aluminio secundario (Itodo *et al.* 2024; Trivedi *et al.* 2023). Por su parte, las cajas de conexiones contienen componentes electrónicos que pueden ser recuperados y reutilizados [Itodo *et al.* 2024; Latunussa *et al.* 2016; Trivedi *et al.* 2023).

El vidrio puede reutilizarse para fabricar azulejo de vidrio, utilizarse como agente abrasivo en limpieza o dentro de sistemas de filtración de agua (Itodo *et al.* 2024). El encapsulante EVA y la capa posterior de Tedlar pueden emplearse para la fabricación de nuevas láminas de EVA, o bien, como materiales para aislamiento en la construcción, fabricación de pisos y colchonetas (Itodo *et al.* 2024).

El silicio, al ser recuperado como silicio de grado metalúrgico (98 – 99 % de pureza) puede reintroducirse para la fabricación de nuevas celdas solares después de un proceso de purificación para obtener silicio de grado solar (4 – 6N), o bien, utilizarse para la fabricación de carburo de silicio. La plata recuperada puede reintroducirse en la industria electrónica, joyería o dentro del sector de la fotografía. El cobre puede emplearse para la formación de aleaciones de cobre o ser reciclado. El plomo puede ser utilizado en la industria de fabricación de baterías de plomo-ácido, para la formación de aleaciones o como soldadura en los módulos fotovoltaicos o componentes electrónicos (Cabrera Hernández, 2024; Itodo *et al.* 2024).

Conclusiones

El reciclaje de módulos fotovoltaicos, a nivel mundial, es un tema que está siendo cada vez más importante dentro de la industria solar fotovoltaica. Países como China, Japón, Italia y Alemania han iniciado con la fabricación y comercialización de equipo o plantas de reciclaje con procesos mecánicos, como apoyo a empresas y organizaciones de diferentes países para implementar y promover estas prácticas a escala industrial, pero es importante considerar que se trata de procesos de reciclaje de bajo valor. En la actualidad, se busca que las empresas de reciclaje implementen procesos de reciclaje de alto valor, permitiendo dar un valor agregado a la industria solar fotovoltaica, ya

que, los materiales recuperados pueden ser reutilizados para la fabricación de nuevos módulos fotovoltaicos después de recibir un tratamiento adecuado.

Después de realizar un análisis comparativo de los métodos de reciclaje identificados, se determinó que un proceso de delaminación mecánico es una de las tecnologías que más abarca el mercado de reciclaje mundial por ser un proceso rentable, técnicamente factible y fácil de escalar, con alta capacidad de procesamiento y de bajo consumo energético, ya que puede tener un procesamiento de entre 10,000 a 50,000 toneladas de manera anual con un consumo de hasta 60 kWh/ton, mientras que el proceso de reciclaje térmico tiene un procesamiento de unas 1,000 – 3,00 toneladas de módulos al año con un consumo energético de entre 60 – 136 kWh/ton. Este proceso puede ser complementado con un proceso de purificación químico, así como un proceso de recuperación de metales, para recuperar los metales contenidos en la solución de lixiviación con una pureza mayor al 95%. Tomando en cuenta el impacto ambiental y a la salud que genera el uso de sustancias de lixiviación minerales, es necesario promover la investigación y divulgación científica para el uso de solventes menos dañinos (química verde), los cuales permitirán reducir el impacto ambiental del proceso de reciclaje químico, a la vez que se promueven el desarrollo de procesos más limpios y amigables con el medio ambiente.

Bibliografía

Ácido clorhídrico. ANIQ - Home. Recuperado 25 de agosto de 2025, de https://aniq.org.mx/pqta/pdf/HDMS%20Acido%20Clorhidrico%20El%20Salto.pdf

Cabrera Hernández, M. (2024). Análisis comparativo de los métodos de reciclaje de módulos solares fotovoltaicos de silicio mono y policristalino para realizar una propuesta de aplicación en Puebla. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla: Facultad de Ciencias de la Electrónica.

Camargo, P. S. S., Domingues, A. da S., Palomero, J. P. G., Kasper, A. C., Dias, P. R., & Veit, H. M. (2021). PHOTOVOLTAIC MODULE RECYCLING: THERMAL TREATMENT TO DEGRADE POLYMERS AND CONCENTRATE VALUABLE METALS. Detritus, 16, 48–62. Recuperado 03 de agosto de 2025 de https://doi.org/10.31025/2611-4135/2021.15119

Casas Rueda, A. Z. & Cordero Castellanos, B. M. (2023). Tecnologías y métodos para el reciclaje de materiales de paneles fotovoltaicos basados en silicio cristalino. Universidad Industrial de Santander: Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.

Collins, K. F. (2024). A Comparative Analysis Of Technology And Policy Of High-Value PV Recycling: The United States Versus The European Union. Appalachian State University. Thesis. Recuperado 18 de mayo 2026 de: https://doi.org/10.71889/5fylantbak.29868479.v1

Deng, R., Chang, N.L., Ouyang, Z., & Chong, C. M. (2019). A techno-economic review of silicon photovoltaic module recycling. Recuperado 03 de agosto de 2025 de https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119302321

Deng, R., Zhuo, Y. & Shen, Y. (2022). Recent progress in silicon photovoltaic module recycling processes. Resour., Conservation Recycling, vol. 187, p.

106612. Recuperado 03 de agosto de 2025 de https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106612

Dobra T, Vollprecht D, Pomberger R. Thermal delamination of end-of-life crystalline silicon photovoltaic modules. Waste Manag Res. 2022 Jan;40(1):96-103. doi: 10.1177/0734242X211038184. Epub 2021 Aug 19. PMID: 34407715; PMCID: PMC8832565.

Éléonore de Roissart (2020). Research and development of a pilot-scale recycling process for photovoltaic panels. Engineering Sciences [physics]. ⟨dumas-03609148⟩

Faircloth, C.C., Wagner, K.H., Woodward, K.E., Rakkwamsuk, P., Gheewala, S.H. (2019). The environmental and economic impacts of photovoltaic waste management in Thailand, Resources, Conservation and Recycling, Volume 143, Pages 260-272, ISSN 0921-3449. Recuperado 03 de agosto de 2025 de https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.01.008.

Francovigh, G. (2023). Inventario Asolmex: la capacidad fotovoltaica en México alcanzó los 10,479 MW - Energía Estratégica. Recuperado 03 de agosto de 2025 de https://www.energiaestrategica.com/inventario-asolmex-lacapacidad-fotovoltaica-en-mexico-alcanzo-los-10479-mw/

Granata, G., Pagnanelli, F., Moscardini, E., Havlik, T., Toro, L. (2014). Recycling of photovoltaic panels by physical operations. Solar Energy Materials and Solar Cells. Recuperado 14 de mayo de 2026 de 123. 239–248. 10.1016/j.solmat.2014.01.012.

Hoja de datos de seguridad. AFIPA - AFIPA. Recuperado 25 de agosto de 2025 de https://www.afipa.cl/HDSMelipilla/Acido%20Fosforico%20-%2000233.pdf

HOJA DE SEGURIDAD II HIDROXIDO DE SODIO. Inicio - Facultad de Química. Recuperado 25 de agosto de 2025 de https://quimica.unam.mx/wp-content/uploads/2008/05/2hsnaoh.pdf

Hoja de datos de seguridad. Karal - Reactivos Analíticos. Recuperado 25 de agosto de 2025 de https://www.karal.com.mx/admin/seguridad/uploads/%20ÁCIDO%20FLUORHÍDRICO%20Solución%20al%205%200777.pdf

Hoja de datos de seguridad. Koura Global | Global Leader | Largest Fluorspar Manufacturer. Recuperado 25 de agosto de 2025 de https://www.kouraglobal.com/wp-content/uploads/FINAL-Aqueous-HF-v2-NAFormat-4-April-2022-Spanish.pdf

Huang, W.-H., Shin, W. J., Wang, L., Sun, W.-C. y Tao, M. (2017). Strategy and technology to recycle wafer silicon solar modules. Sol. Energy, vol. 144, pp. 22–31. Recuperado 15 de agosto de 2025 de https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.01.001

Inguanzo Saucedo, J., de la Torres Moya, J. A., Gómez Morales, L. & Inguanzo Saucedo, O. (2016). Caracterización estructural t eléctrica de celdas Fotovoltaicas de doble y triple capa. Centro de investigación en materiales avanzados: Departamento de estudios de posgrado

In-Data & RIGK. (2020). *Alternativas de tratamiento de módulos fotovoltaicos*

luego de su vida útil. Economía Circular. Recuperado 8 de mayo de 2026, de: https://economiacircular.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2021/06/2-Informe-2.pdf

IRENA (2024), Renewable capacity statistics 2024, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

ISQUISA Solución y logística a tu favor. (s.f.) HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD Hidróxido de Potasio 45%. ISQUISA | EXPERIENCIA DE VALOR AGREGADO. Recuperado 25 de agosto de 2025 de https://isquisa.com/assets/files/HDSLISTOS/HIDROXIDOS/HDSHidróxido%20de%20Potasio%2045_.pdf

Itodo, A., Onche, E., Ofoegbu, O., Ajakaye, D., Japheth, L. (2024). RECYCLING OF SOLAR PANEL CELLS: PAST, PRESENT AND FUTURE. International Journal of Science and Research (IJSR). 11. 11-30. 10.5281/zenodo.10577851. Recuperado 16 de mayo de 2026 de https://www.researchgate.net/publication/377874931_RECYCLING_OF_SOLAR_PANEL_CELLS_PAST_PRESENT_AND_FUTURE/citation/download

Latuussa, C., Ardente, F., Blengini, G.A., Mancini, L., Pennington, D. (2016). Analysis of material recovery from silicon photovoltaic panels. JRC Publications Repository. Recuperado 18 de agosto de 2025 de doi:10.2788/786252

Lovato, E., Donato L., Lopes, P., Tanabe, E., Bertuol, D. (2021). Application of supercritical CO2 for delaminating photovoltaic panels to recover valuable materials, Journal of CO2 Utilization, Volume 46, 101477, ISSN 2212-9820, https://doi.org/10.1016/j.jcou.2021.101477. Recuperado 20 de agosto de 2025 de https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212982021000445

Luo, M., Liu, F., Zhou, Z., Jiang, L., Jia, M., Lai, Y., Li, J., Zhang, Z. (2021). A comprehensive hydrometallurgical recycling approach for the environmental impact mitigation of EoL solar cells. J. Environmental Chem. Eng., vol. 9, n.º 6, p. 106830. Recuperado 18 de agosto de 2025 de https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106830

Maani, T., Celik, I., Heben, M.J., Ellingson, R.J., Apul, D. (2020). Environmental impacts of recycling crystalline silicon (c-SI) and cadmium telluride (CDTE) solar panels, Science of The Total Environment, Volume 735, 138827, ISSN 0048-9697. Recuperado 18 de agosto de 2025 de https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138827

Palden, T., Binnemans, K., & Regadío, M. (2021). Organic lixiviants for metal recovery from industrial process residues. Degree of Doctor of Science. Faculty of science, Department of chemistry, molecular desing & synthesis.

Punathil, L., Mohanasundaram, K., Tamilselavan, K.S., Sathyamurthy, R. y Chamkha, J. (2021). Recovery of Pure Silicon and Other Materials from Disposed Solar Cells. Wiley Online Library. Recuperado 20 de agosto de 2025 de https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2021/5530213

Reyes, C. (2013). La reutilización de los Paneles Fotovoltaicos. Academia.edu.

Recuperado 20 de agosto de 2025 de https://www.academia.edu/28642300/La_reutilizacion_de_los_Paneles_Fotovoltaicos

Riech I., Montalvo, C.C., Wittersheim, L., Vallejos Giácoman, G., González Sánchez, A., Gamboa Loira, C., Acosta M., Méndez Gamboa, J. (2021). Experimental Methodology for the Separation Materials in the Recycling Process of Silicon Photovoltaic Panels. Materials, vol. 14, n.º 3, p. 581. Recuperado 18 de agosto de 2025 de https://doi.org/10.3390/ma14030581

Rodríguez Suárez, J.S., Espinoza Navarrete, E., Rosenbuch, J., Ortega Navarro, H.O., Martínez Fernández, M., Cedano Villavicencio, K.G., Armenta, M.M. (2017). La industria solar fotovoltaica y fototérmica en México. PROMEXICO. Recuperado 15 de agosto de 2025 de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/428621/La_industria_solar_fv_y_ft_en_M_xico-compressed.pdf.

Sharma A., Pandey S. y Kolhe M. (2019). Global review of policies & guidelines for recycling of solar PV modules. Int. J. Smart Grid Clean Energy, pp. 597–610. Recuperado 20 de agosto de 2025 de https://doi.org/10.12720/sgce.8.5.597-610

Shin, J., Park, J. y Park, N. (2017). A method to recycle silicon wafer from end-of-life photovoltaic module and solar panels by using recycled silicon wafers. Sol. Energy Mater. Sol. Cells, vol. 162, pp. 1–6. Recuperado 20 de agosto de 2025 de https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.12.038

Sistema Globalmente Armonizado de Clasificación y Etiquetado de Productos Químicos. (s.f.) Ficha de datos de seguridad de materiales: Ácido Nítrico. CIAFA. Recuperado 25 de agosto de 2025 de https://www.ciafa.org.ar/files/t8nqSMsoIxouFBASKVgK1UinhYtE1aaeCY7UkvV2.pdf

Späth M., Wieclawska S., Sommeling P., Lenzmann F. (2022) Balancing Costs and Revenues for Recycling End-of-life PV Panels in the Netherlands. Recuperado 20 de agosto de 2025 de https://publications.tno.nl/publication/34640523/crl8a6/TNO-2022-R10860.pdf.

Strachala, D., Hylský, J., Vanek, J., Fafilek, G. (2017). Methods for recycling photovoltaic modules and their impact on environment and raw material extraction. Acta Montan. Slovaca, vol. 22, n.º 3, pp. 257–269. Recuperado 20 de agosto de 2025 de https://www.researchgate.net/publication/322043679_Methods_for_recycling_photovoltaic_modules_and_their_impact_on_environment_and_raw_material_extraction

Suárez, E. (2023). Reciclaje de paneles fotovoltaicos. Trabajo de fin de máster, Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado 18 de mayo de 2026 de https://oa.upm.es/75365/1/TFM_EMMA_SUAREZ_SOTO_JOVE.pdf

Trivedi, H., Meshram, A., Gupta R. (2023). Recycling of photovoltaic modules for recovery and repurposing of materials, Journal of Environmental Chemical Engineering, Volume 11, Issue 2, 109501, ISSN 2213-3437, https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109501. Recuperado 20 de agosto de

2025 de https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213343723002403

Universidad de Antofagasta. (2022). Vigilancia Tecnológica. Reciclaje De Paneles Solares. Recuperado 23 de agosto de 2025 de https://energia.gob.cl/sites/default/files/informe_final_recuperacion_de_materiales_-_vt_16.05.22.pdf#:~:text=En%20este%20informe%20se%20presenta%20la%20vigilancia%20tecnol%C3%B3gica,y%20la%20Organizaci%C3%B3n%20Mundial%20de%20la%20Propiedad%20Intelectual.

Universidad de la Laguna (2017). Estudio sobre las posibilidades de valorización de residuos de paneles fotovoltaicos. Recuperado 20 de mayo de 2026 de https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/5835/Estudio+sobre+las+posibilidades+de+valorizacion+de+residuos+de+paneles+fotovoltaicos.pdf?sequence=1

Usla, H. (2025, diciembre 18). *Así es Rafiqui, primera recicladora de paneles solares de México*. El Financiero. Recuperado 20 de mayo de 2026 de https://www.elfinanciero.com.mx/economia/2025/12/18/asi-es-rafiqui-primera-recicladora-de-paneles-solares-de-mexico/

Wambach K., Libby C. y Shaw S. (2024). Advances in Photovoltaic Module Recycling - Literature Review and Update to Emírical Life Cycle Inventory Data and Patent Review. Rep. IEA-PVPS. Recuperado 25 de agosto de 2025 de https://doi.org/10.69766/IPDB8111

Wang, O. & Ma, X. (2024). Innovating the recycling of silicon-based solar panels with an eco-friendly alkaline leaching process. Resour., Conservation Recycling, vol. 211, p. 107887. Recuperado 15 de agosto de 2025 de https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107887

Wang, X., Tian, X., Chen, X., Ren, L., Geng, C. (2022). A review of end-of-life crystalline silicon solar photovoltaic panel recycling technology, Solar Energy Materials and Solar Cells, Volume 248, 111976, ISSN 0927-0248. Recuperado 15 de agosto de 2025 de https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.111976

Weckend S., Wade A., Heath G. (2016). End-of-life management: Solar photovoltaic panels. Photovoltaic Power Systems Programme, 1-100. Recuperado 15 de agosto de 2025 de https://iea-pvps.org/key-topics/irena-iea-pvps-end-of-life-solar-pv-panels-2016/.

Xu, X., Lai, D., Wang, G., & Wang, Y. (2021). Nondestructive silicon wafer recovery by a novel method of solvothermal swelling coupled with thermal decomposition. ScienceDirect. Recuperado 20 de agosto de 2025 de https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894721010445